



## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN DE TESIS

Yo..... WILBER ANGEL JESUS SALINAS .....

autor/a de la tesis titulada:

### DETECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO GOOGLE EARTH ENGINE CON IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-1 EN EL MUNICIPIO DE SUCRE

mediante el presente documento, declaro que la obra mencionada es de mi exclusiva autoría y producción. Esta tesis ha sido elaborada como uno de los requisitos previos para la obtención del título de: “**Magíster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica**” en la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Central Sucre.

#### Cesión de Derechos:

1. **Derechos Cedidos:** A partir de la fecha de la defensa de grado, cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar, Sede Central Sucre, los derechos exclusivos de reproducción, comunicación pública, distribución y divulgación de la obra. La Universidad está autorizada a utilizar esta obra por cualquier medio, actualmente conocido o que se desarrolle en el futuro, siempre y cuando dicha utilización no se realice con fines de lucro. Esta cesión incluye la reproducción total o parcial en formatos virtual, electrónico, digital, u óptico, así como su uso en red local e Internet.
2. **Responsabilidades del Autor:** Declaro que, en caso de presentarse cualquier reclamación o demanda por parte de terceros respecto de los derechos de autor de la obra mencionada, asumiré toda la responsabilidad legal frente a dichos terceros y frente a la Universidad, incluyendo, sin limitación, la defensa de tales reclamaciones y el mantenimiento de la Universidad indemne frente a las mismas.
3. **Entrega de Ejemplares:** En esta fecha, entrego a la biblioteca de la Universidad un ejemplar de la obra y sus anexos, en formatos impreso y digital o electrónico.

Fecha..... 5 - MARZO - 2025 .....

Firma: .....



**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR  
SEDE CENTRAL  
Sucre – Bolivia**

**MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

**DETECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO GOOGLE  
EARTH ENGINE CON IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-1 EN EL  
MUNICIPIO DE SUCRE**

**Tesis presentada para optar al Grado  
Académico de Magíster en Teledetección y  
Sistemas de Información Geográfica**

**MAESTRANTE: WILBER JESUS SALINAS**

**Sucre – Bolivia**

**2025**



**UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR  
SEDE CENTRAL  
Sucre – Bolivia**

**MAESTRÍA EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA**

**DETECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS UTILIZANDO GOOGLE  
EARTH ENGINE CON IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-1 EN EL  
MUNICIPIO DE SUCRE**

**Tesis presentada para optar al Grado  
Académico de Magíster en Teledetección y  
Sistemas de Información Geográfica**

**MAESTRANTE: WILBER JESUS SALINAS  
TUTOR: JUAN PABLO BELLER DELGADILLO**

**Sucre – Bolivia**

**2025**

**DEDICATORIA**

A mis padres, todo mi cariño y agradecimiento por el amor, las enseñanzas y la dedicación que siempre tuvieron por mí y mis hermanos.

A mi esposa, por ser fuente de amor sincero y un gran apoyo para mi vida y el cumplimiento de mis sueños.

A mis hijas, todo mi amor por ser la fuerza que me permite seguir adelante.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, porque siempre me bendijo y doy fe de su grandeza.

A mis docentes, que en esta maestría han logrado impartir la ciencia, el saber y la enseñanza; que permiten a muchos profesionales descubrir los conocimientos necesarios para poder llevar adelante un mejor desarrollo profesional.

A la Universidad Andina, por permitirme ser parte de esta gran familia.

## RESUMEN

La investigación se centra en la detección de acuíferos subterráneos en Sucre durante 2022 y 2023, utilizando la plataforma Google Earth Engine y las imágenes satelitales Sentinel 1. Se destaca la importancia de gestionar de manera sostenible el agua subterránea, especialmente en Bolivia. La metodología propuesta aprovecha herramientas de teledetección para obtener representaciones gráficas de los acuíferos, contribuyendo a su gestión adecuada.

El análisis comienza contextualizando la relevancia global de la gestión sostenible del agua subterránea, con un enfoque específico en Bolivia y Sucre. Se evalúa la situación del recurso en Sucre, identificando desafíos y problemáticas particulares. El propósito es fundamentar la investigación y resaltar la importancia de identificar acuíferos subterráneos en el contexto actual. Se enfatizan las técnicas innovadoras que se implementarán para la detección eficiente de fuentes de agua subterránea, representando un avance significativo en la investigación.

Los objetivos de la investigación buscan desarrollar una metodología avanzada mediante teledetección y análisis espacial para la gestión sostenible del agua subterránea en Sucre, con potencial para replicarse en otras ciudades con problemas similares. El segundo capítulo abarca teorías y metodologías relacionadas con imágenes satelitales Sentinel-1. El tercero contextualiza el estudio en Sucre, considerando aspectos geográficos, climáticos y geológicos. El cuarto capítulo detalla el proceso, desde la recopilación de datos hasta el análisis, destacando conceptos clave como acuíferos, radar, scripts e imágenes Sentinel-1 images.

**Palabras claves:** Acuífero, Radar, Script, Imágenes satelitales

## ABSTRACT

The research focuses on the detection of underground aquifers in Sucre during 2022 and 2023, using the Google Earth Engine platform and Sentinel-1 satellite images. The importance of sustainably managing groundwater is highlighted, especially in Bolivia. The proposed methodology takes advantage of remote sensing tools to obtain graphic representations of the aquifers, contributing to their proper management.

The analysis begins by contextualizing the global relevance of sustainable groundwater management, with a specific focus on Bolivia and Sucre. The situation of the resource in Sucre is evaluated, identifying particular challenges and problems. The purpose is to base the research and highlight the importance of identifying underground aquifers in the current context. The innovative techniques that will be implemented for the efficient detection of groundwater sources are emphasized, representing a significant advance in research.

The research objectives are presented with the intention of developing an advanced methodology, taking advantage of remote sensing tools and spatial data analysis. The aim is to obtain clear and applicable results that contribute to the proper use and management of groundwater in the region. The comprehensive approach supported by a solid theoretical and technical justification aims to provide spatial information for the sustainable use of groundwater in Sucre, possibly serving as a model for other cities with similar problems.

The second chapter summarizes theories, methodologies and bibliographies related to Sentinel-1 satellite images. The third contextualizes the research in Sucre, highlighting geographical, climatic and geological elements. The fourth chapter details the steps of the work, from information collection to results analysis, emphasizing the key words: aquifer, radar, script and Sentinel-1 images.

**Keywords:** Aquifer, Radar, Script, Satellite images

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Situación Problémica .....	3
1.3 Formulación del Problema .....	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Objeto de Estudio.....	4
1.6 Campo de Acción.....	4
1.7 Objetivos.....	4
1.7.1 Objetivo general .....	4
1.7.2 Objetivos específicos .....	4
1.8 Hipótesis.....	4
1.8.1 Identificación de variables e indicadores.....	5
1.9 Delimitación.....	6
1.10 Diseño Metodológico.....	7
1.10.1 Enfoque de investigación.....	7
1.10.2 Tipo de diseño.....	7
1.10.3 Métodos de investigación .....	8
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>10</b>
2.1 Marco Conceptual .....	10
2.1.1 Ciclo hidrológico.....	10
2.1.2 Definición de acuífero y aguas subterráneas .....	11
2.1.3 Importancia del agua subterránea .....	12
2.1.4 Hidrogeología .....	13
2.1.5 Prospección de aguas subterráneas .....	14
2.1.5.1 Prospección geofísica .....	14

2.1.5.2	Métodos magnéticos .....	14
2.1.5.3	Métodos gravimétricos .....	14
2.1.5.4	Métodos eléctricos.....	15
2.1.5.5	Métodos sísmicos.....	15
2.1.5.6	Tendencias actuales.....	15
2.2	Marco Legal e Institucional .....	15
2.2.1	Leyes y normas relevantes .....	15
2.3	Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota).....	16
2.3.1	Historia de la teledetección.....	17
2.3.2	Componentes de la teledetección .....	18
2.4	Clasificación de Sensores.....	20
2.4.1	Sensores pasivos .....	20
2.4.2	Sensores activos .....	22
2.5	Componentes de la Teledetección Activa .....	23
2.5.1	Satélites activos .....	23
2.5.2	Microondas.....	23
2.5.3	Sistemas de sensores.....	24
2.6	Conceptos Básicos de la Teledetección por Radar .....	25
2.7	Historia del SAR.....	26
2.7.1	SAR (Radares de Apertura Sintética).....	26
2.7.2	Ventajas del SAR (Radares de Apertura Sintética).....	27
2.7.3	Ventajas y desventajas de la teledetección con radar en comparación a la óptica	28
2.7.4	Parámetros del radar a considerar .....	28
2.7.4.1	Dispersión superficie lisa.....	29
2.7.4.2	Dispersión superficie rugosa .....	29
2.7.4.3	Dispersión por volumen.....	29
2.7.4.4	Dispersión por doble rebote .....	30
2.7.5	Características de la superficie relacionados a estructura.....	30

2.7.5.1	Tamaño relativo a la longitud de onda.....	30
2.7.5.2	Orientación .....	30
2.7.5.3	Densidad.....	30
2.7.6	La relación entre la longitud de onda y la señal de radar .....	31
2.7.6.1	Longitud de onda.....	31
2.7.6.2	Polarización .....	32
2.7.6.3	Factores involucrados en la captación de datos de radar .....	33
2.7.6.4	Humedad del suelo y su relación con el agua subterránea .....	35
2.8	Satélite SENTINEL.....	36
2.8.1	Sentinel -1A (GRD) .....	36
2.8.2	Sentinel 1-C-Band SAR .....	36
2.8.3	Modos de operación del sensor.....	38
2.8.4	Stripmap (SM) .....	39
2.8.5	Interferometric Wide Swath (IW).....	39
2.8.6	Extra Wide Swath (EW) .....	40
2.8.7	Wave (WV).....	40
2.9	Google Earth Engine (GEE).....	41
2.9.1	La plataforma .....	42
2.10	Global Mapper.....	44
2.10.1	Breve historia de Global Mapper .....	45
2.10.2	Funcionalidades relevantes .....	46
2.10.3	Variedad de archivos .....	47
2.10.4	Geo-referenciación y orto-rectificación de imágenes.....	47
2.10.5	Nuevas características significativas .....	47
	<b>CAPÍTULO III. MARCO CONTEXTUAL.....</b>	<b>49</b>
3.1	Macrolocalización.....	49
3.2	Microlocalización .....	50
3.3	Características Generales .....	51

3.3.1	Geografía.....	51
3.3.2	Descripción del Terreno.....	51
3.3.3	Demografía.....	51
3.3.4	Idioma.....	52
3.3.5	Religión.....	52
3.3.6	Clima.....	52
3.3.7	Temperatura.....	53
3.3.8	Precipitación Pluvial.....	53
3.4	Sistema de abastecimiento de agua potable.....	53
3.4.1	Marco Hidrogeológico Regional.....	54
3.4.2	Geomorfología.....	54
3.4.3	Estratigrafía.....	56
3.4.4	Geología Estructural o Tectónica.....	57
3.4.5	Hidrología superficial.....	57
3.4.6	Estudios anteriores sobre aguas subterráneas.....	58
3.4.7	Recarga del sistema acuífero urbano de la ciudad de Sucre.....	58
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>		<b>60</b>
4.1	Material y equipos utilizados.....	60
4.2	Metodología.....	60
4.3	Diseño metodológico.....	62
4.4	Recopilación de datos.....	63
4.5	Desarrollo del script.....	66
4.5.1	Determinación de área de interés.....	67
4.6	Importar el área de interés script.....	68
4.7	Análisis y discusión de resultados.....	74
4.7.1	Validación de los Resultados.....	74
4.8	Coincidencia con Registros de ELAPAS.....	75
4.8.1	Aplicabilidad de Google Earth Engine.....	76

4.8.2 Comparación con Estudios Geofísicos.....	77
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>83</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>84</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estructura de las dimensiones, variables y unidades de observación.....	5
Tabla 2: Longitudes de onda de las diferentes bandas .....	32
Tabla 3. Registro del estudio Geofísico realizado en Lajastambo .....	80

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación del Ciclo Hidrológico.....	11
Figura 2: Tipos de acuíferos .....	12
Figura 3: Distribución del agua en el planeta.....	13
Figura 4: Representación de los poros en el suelo.....	14
Figura 5: Componentes de un sistema de teledetección.....	20
Figura 6: Sensores pasivos .....	21
Figura 7: Sensores activos .....	23
Figura 8: Espectro electromagnético.....	24
Figura 9: SAR (Radares de Apertura Sintética).....	27
Figura 10: Dispersión de la señal de SAR .....	29
Figura 11: Características de la superficie relacionados a estructura.....	31
Figura 12: Imagen Polarización.....	33
Figura 13: Ángulo de incidencia .....	34
Figura 14: Trayectoria del satélite Sentinel I.....	38
Figura 15: Modos de adquisición del sensor SAR del Sentinel-1.....	38
Figura 16: Modos de adquisición del sensor SAR.....	40
Figura 17: Proceso de adquisición de datos en el modo WV.....	41
Figura 18: Entorno de trabajo code editor.....	43
Figura 19: Entorno de trabajo de Global Mapper.....	44
Figura 20: Interfaz del programa DGL.....	46
Figura 21: Interfaz del programa Global Mapper .....	48
Figura 22: Localización geográfica.....	50
Figura 23: Mapa geológico del área de Estudio, 2009. ....	55
Figura 24: Mapa geomorfológico del área de estudio.....	56
Figura 25: Diseño metodológico del proyecto.....	62
Figura 26: Recopilación de información .....	63
Figura 27: Geometría del municipio de Sucre - Bolivia.....	64
Figura 28: Generación de metadatos del municipio de Sucre - Bolivia .....	64
Figura 29: Generación de metadatos del municipio de Sucre – Bolivia.....	65

Figura 30: Determinación del AOI en Google Earth Engine.....	67
Figura 31: Obtención de información de datos Sentinel-1.....	67
Figura 32: Insertar el área de interés .....	68
Figura 33: Determinación de la serie temporal .....	68
Figura 34: Determinación de la colección de imágenes Copernicus. ....	69
Figura 35: Calibración de las imágenes Sentinel 1 de la serie temporal .....	69
Figura 36: Determinación de tipo de polarización.....	69
Figura 37: Cálculo de cambio de índice de bandas (diferencia VH - VV) .....	70
Figura 38: Función de índice de cambio de la colección de Sentinel. ....	71
Figura 39: Cálculo de la mediana de la serie temporal. ....	71
Figura 41: Generación de máscara para detectar aguas subterráneas.....	72
Figura 42: Visualización de áreas propensas a aguas subterráneas.....	73
Figura 43: Exportación de mapa de imágenes Sentinel con información polarizada .....	74
Figura 44: Sobreposición de la información de pozos registrados.....	75
Figura 45: Sobreposición de la información de pozos registrados con los analizados del año 2015 y 2023 .....	76
Figura 46: Ubicación de aguas subterráneas con GEE.....	77
Figura 47: Caracterización acuíferos subterráneos con sondeo eléctrico .....	78
Figura 48: Distribución de lugares potenciales a aguas subterráneas en Sucre.....	79
Figura 49: Identificación espacial de los lugares con alto potencial para aguas subterráneas .....	81

## **CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Antecedentes**

Las aguas subterráneas juegan un papel importante en el abastecimiento de agua para el consumo humano, la agricultura y otros usos. Estas fuentes de agua se encuentran debajo de la superficie de la tierra, en acuíferos subterráneos. La detección y gestión adecuada de estas aguas subterráneas son fundamentales para garantizar su uso sostenible.

Para llevar a cabo la detección de aguas subterráneas, es necesario utilizar diferentes métodos y técnicas. Uno de los métodos más comunes es la perforación de pozos, donde se excavan estos en la tierra hasta alcanzar el nivel del agua subterránea. Una vez encontrado el agua, se puede tomar muestras para su análisis y evaluar la calidad y cantidad del recurso.

Otra técnica es la utilización de la tecnología geofísica, que emplea principios físicos para determinar la ubicación y las características de los acuíferos subterráneos. La resistividad eléctrica y la refracción sísmica son dos métodos comunes utilizados en este enfoque. Estos permiten mapear las capas de suelo y roca, identificar las zonas con mayor contenido de agua y estimar la profundidad y espesor de los acuíferos.

La teledetección es otra herramienta valiosa en la detección de aguas subterráneas. A través del uso de imágenes satelitales y técnicas de procesamiento de datos, es posible detectar cambios en el terreno que indiquen la presencia de agua subterránea. La variación de la vegetación, la humedad del suelo y la temperatura superficial son algunos de los indicadores que pueden ser analizados con sistemas de información geográfica.

Es importante señalar que la detección de aguas subterráneas no solo se trata de encontrar su ubicación, sino también de comprender su comportamiento y disponibilidad a lo largo del tiempo. Para ello, es necesario llevar a cabo un monitoreo constante del nivel del agua, la calidad y el registro de la tasa de recarga de los acuíferos, mediante la instalación de pozos de observación y la recolección regular de datos hidrogeológicos.

La teledetección mediante radares de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) es una técnica que ha demostrado ser útil para el monitoreo de aguas subterráneas en las últimas décadas. Los radares SAR emiten ondas electromagnéticas hacia la superficie terrestre y miden la intensidad y fase de la señal retrodispersada. Las variaciones en estas mediciones pueden estar relacionadas con cambios en el contenido de humedad del subsuelo.

Los primeros estudios que exploraron el uso de SAR para la detección de aguas subterráneas se remontan a la década de 1980. Por ejemplo, un estudio de 1985 utilizó datos del SAR aerotransportado del Jet Propulsion Laboratory's para mapear inundaciones y aguas

subterráneas someras en el desierto de Mojave en California (Rouse et al., 1985). En la década de 1990, se llevaron a cabo más investigaciones utilizando datos de sensores SAR espaciales como el ERS-1 de la ESA para detectar agua subterránea en regiones áridas (e.g. Elachi et al., 1994).

En la última década, el monitoreo de aguas subterráneas con SAR se ha beneficiado del lanzamiento de nuevas misiones satelitales con sensores SAR avanzados, como TerraSAR-X y Sentinel-1. Varios estudios recientes han demostrado la efectividad de estos sensores para mapear inundaciones, humedad del suelo y fluctuaciones de aguas subterráneas en diversas partes del mundo, incluyendo regiones áridas y semiáridas (e.g. Moran et al., 2020; Pham et al., 2019). La creciente disponibilidad de datos SAR, de diferentes fuentes a nivel mundial, ha permitido un monitoreo de calidad, con resoluciones espaciales y temporales para el procesamiento de datos, mejorando así las capacidades para la detección de aguas subterráneas mediante teledetección radar.

Además de los estudios iniciales en las décadas de 1980 y 1990, en los años 2000 hubo importantes avances en las técnicas de procesamiento de datos SAR para aplicaciones hidrogeológicas. Por ejemplo, se desarrollaron métodos de polarización de las frecuencias electromagnéticas, para medir deformaciones del terreno relacionadas con fluctuaciones en los niveles de aguas subterráneas (e.g. Hoffmann et al., 2003).

Otras técnicas como la tomografía SAR han permitido derivar modelos 3D de humedad del subsuelo (e.g. Hsu et al., 2010). Asimismo, se han propuesto enfoques de fusión de datos SAR multitemporal y multifrecuencia para mejorar la detección de agua subterránea (e.g. Song et al., 2015).

Otros avances recientes incluyen el monitoreo de subsidencia del terreno por sobreexplotación de acuíferos usando datos SAR e InSAR (Béjar-Pizarro et al., 2017), y la fusión con datos de gravitación para mejorar la detección de agua subterránea (Mohammadimanesh et al., 2019).

A nivel mundial, la extracción de aguas subterráneas se ha incrementado significativamente desde mediados del siglo XX. Se estima que actualmente alrededor del 20% del agua extraída para todos los usos proviene de acuíferos. Los acuíferos más productivos se encuentran en regiones áridas y semiáridas como la llanura central de Estados Unidos, el norte de India y las regiones centrales de América del Sur (WWAP, 2021).

En América Latina, la agricultura es el principal usuario de las aguas subterráneas, representando el 77% del total extraído en la región (Bocanegra et al., 2020). Los acuíferos más importantes en Sudamérica son el Guarani, el Hamada en Chile, el Lerma-Chapala en México y varios sistemas acuíferos costeros pequeños pero muy productivos. La

sobreexplotación de acuíferos es un problema creciente en varios países como México, Perú y Argentina.

En Bolivia, el uso de las aguas subterráneas se ha incrementado en las últimas décadas, especialmente para riego en los valles interandinos. Los principales sistemas acuíferos en explotación son los del valle central de Cochabamba y del Cono Sur en Tarija. Se estima que el 39% de las aguas subterráneas disponibles en el país son usadas principalmente para agricultura (89% del total extraído) (MMAyA, 2009). La falta de un marco regulatorio ha derivado en problemas de sobreexplotación y contaminación de acuíferos en varias regiones.

## **1.2 Situación Problémica**

La necesidad de agua en los asentamientos humanos es siempre un problema; entre más densa sea la población, es mayor la necesidad de agua. Por tanto, es un problema permanente y se agudiza con el paso del tiempo.

La ciudad de Sucre ha afrontado escasez de agua en varias oportunidades; Las cuales se superaron con relativo éxito. (Rúa et al, 1992). Se buscaron siempre fuentes de agua superficiales, esas fuentes al tornarse insuficientes con el tiempo, obligaron a buscar cada vez más lejos; al inicio Sucre utilizaba agua de los manantiales que surgían de los cerros Sica Sica y Churuquilla, luego en 1930 la captación fue del río Aritumayu y en 1950 se utilizó la captación del río Ravelo. (Rúa et. al, 1992).

## **1.3 Formulación del Problema**

¿De qué manera las imágenes satelitales de Sentinel-1 y el uso de Google Earth Engine, permitirá la detección de aguas subterráneas para la ciudad de Sucre?

## **1.4 Justificación**

Sucre ha experimentado un acelerado crecimiento demográfico y expansión urbana en las últimas décadas, esta situación ejerce mayor presión sobre la necesidad los recursos hídricos disponibles. Las principales fuentes de abastecimiento como el canal de Ravelo y Cajamarca se encuentran operando en su capacidad máxima. Ante este panorama, resulta indispensable aprovechar el potencial de aguas subterráneas en la ciudad, para diversificar las fuentes de suministro.

La detección de aguas subterráneas en la ciudad de Sucre reviste una importancia estratégica debido a la creciente escasez de agua que enfrenta la región.

La búsqueda de acuíferos mediante métodos geofísicos y perforaciones exploratorias revestirían mucho costo para las entidades encargadas del suministro de agua potable, por

lo que la detección de aguas subterráneas con sensores activos, del radar de apertura sintética del satélite Sentinel 1 permitiría identificar la ubicación de nuevos acuíferos para satisfacer la demanda de agua potable, uso industrial, riego agrícola y otros usos en Sucre.

El aprovechamiento planificado y sostenible de estas aguas subterráneas es fundamental para aminorar la presión sobre sistemas superficiales de Ravelo y Cajamarca en la actualidad.

## **1.5 Objeto de Estudio**

En la presente investigación el objeto de estudio son el conjunto de métodos y procedimientos que permitan la detección de aguas subterráneas en la ciudad de Sucre, con herramientas actuales como la teledetección, sistemas de información geográfica, los lenguajes de programación y otros.

## **1.6 Campo de Acción**

El campo de acción de la presente investigación son los límites urbanos de la ciudad de Sucre, básicamente en los distritos I, II, III, IV y V.

## **1.7 Objetivos**

### **1.7.1 Objetivo general**

Aplicar la plataforma Google Earth Engine, con imágenes satelitales Sentinel-1 usando radar de apertura sintética (SAR) para la evaluación de la variabilidad de la respuesta del radar SAR en la detección de lugares potenciales a aguas subterráneas en la ciudad de Sucre.

### **1.7.2 Objetivos específicos**

Seleccionar bibliografía relacionada a la detección de aguas subterráneas aplicando imágenes de radar de apertura sintética de Sentinel 1.

Identificar el área de estudio tomando en cuenta los aspectos climatológicos, morfológicos y principalmente la ubicación geográfica de la ciudad de Sucre.

Diseñar una metodología para la detección de aguas subterráneas, con el lenguaje de programación Java Script de Google Earth Engine usando información del radar de apertura sintética de Sentinel 1.

## **1.8 Hipótesis**

Las imágenes satelitales de Sentinel-1, a través del análisis de la respuesta del radar de apertura sintética (SAR) y su procesamiento en Google Earth Engine, permitirán identificar variaciones en la reflectividad del subsuelo asociadas a la presencia de aguas subterráneas

en la ciudad de Sucre. Estas diferencias en la señal radar serán indicativas de zonas con mayor probabilidad de contener acuíferos, contribuyendo a una detección más eficiente y no invasiva de recursos hídricos subterráneos en entornos urbanos.

### 1.8.1 Identificación de variables e indicadores

**Variable independiente:** Respuesta de radar de apertura sintética de las imágenes Sentinel-1.

**Variable dependiente:** Presencia de aguas subterráneas, en la ciudad de Sucre.

Análisis de indicadores

**Tabla 1:** Estructura de las dimensiones, variables y unidades de observación

HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Diferencias en la respuesta de radar de apertura sintética de las imágenes Sentinel-1 detectará la presencia de aguas subterráneas debajo de la superficie del suelo, en la ciudad de Sucre.	<b>Variable Independiente</b>  Respuesta de radar de apertura sintética de las imágenes Sentinel-1.	El plan de acción refleja el encadenamiento de los productos, resultados y metas alcanzadas, a los objetivos específicos y al objetivo general.	Evaluación de la metodología aplicada	Realizar la comparación de los diferentes métodos para la detección de aguas subterráneas.
			Medios y procedimientos	Tiempo y procedimiento de la metodología a ser aplicada
			Recolección de información multitemporal	Requerimiento de información
	<b>Variable Dependiente</b>  Presencia de aguas subterráneas, en la ciudad de Sucre.	Permite identificar con valores numéricos la presencia de aguas subterráneas que luego serán transformadas en cartografía digital.	Procesamiento de los datos, análisis e interpretación	Realizar el análisis de la información espacial proporcionada por Sentinel I
			Procesamiento de los datos, análisis e interpretación	Realizar el análisis de la aplicación de los programas como Google Earth Engine
			Oportunidad de resultados	Proponer nuevas

				metodologías para la detección de acuíferos subterráneos.
--	--	--	--	---

Nota: Elaboración Propia, 2024

## 1.9 Delimitación

La delimitación espacio – temporal en el presente estudio de investigación es el siguiente:

- a) **DELIMITACIÓN ESPACIAL.** - Este proceso de investigación científica, se desarrolló en el municipio de Sucre, zona urbana.
- b) **DELIMITACIÓN TEMPORAL.** - Se escogió dos periodos de tiempo uno en el año 2016, fecha en que entro en funcionamiento el satélite Sentinel I y otro el año 2023 que es la fecha donde se realizó sondeos electromagnéticos para la detección de aguas subterráneas.

### c) **LIMITACIONES DE LAS IMÁGENES SENTINEL-1 EN ENTORNOS URBANOS.** -

Las imágenes Sentinel-1, obtenidas mediante radar de apertura sintética (SAR), presentan ciertas limitaciones en el análisis de entornos urbanos debido a su resolución espacial moderada, que oscila entre 5 y 20 metros, dependiendo del modo de adquisición. Esta resolución puede no ser suficiente para la identificación detallada de estructuras pequeñas o cambios sutiles en la morfología urbana.

Además, las interferencias derivadas de la geometría de los edificios pueden afectar la precisión de los datos. Fenómenos como el efecto de sombra y la dispersión múltiple generan distorsiones en las imágenes, dificultando la interpretación y el procesamiento de información en áreas densamente edificadas. Estas limitaciones deben considerarse al aplicar Sentinel-1 en estudios urbanos

### d) **LIMITACIONES DE GOOGLE EARTH ENGINE EN LA DETECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.**-

Google Earth Engine (GEE) es una poderosa plataforma para el análisis de datos geoespaciales, pero presenta limitaciones en la detección de aguas subterráneas. Su enfoque basado en imágenes satelitales y datos de teledetección dificulta la identificación directa de acuíferos, ya que estos se encuentran bajo la superficie y no son detectables mediante sensores ópticos o de radar convencionales.

Además, la resolución espacial y temporal de los datos disponibles puede no ser suficiente para el monitoreo detallado de variaciones en los niveles freáticos,

especialmente en regiones con acuíferos profundos o en áreas con cobertura vegetal densa. Si bien GEE permite el análisis de proxies como la humedad del suelo (a partir de sensores como SMAP o Sentinel-1) y cambios en la gravedad terrestre (con datos GRACE), estos métodos requieren calibración y validación con mediciones in situ para mejorar su precisión.

- e) **IMPACTO SOCIAL Y AMBIENTAL.** - Desde el punto de vista social, la identificación de recursos hídricos subterráneos permitirá mejorar la planificación y gestión del agua, beneficiando a las zonas que enfrentan escasez hídrica. Además, facilitará la toma de decisiones en sectores como el abastecimiento urbano y la seguridad hídrica, reduciendo conflictos por el acceso al agua y promoviendo el desarrollo sostenible.

En cuanto al impacto ambiental, el uso de tecnologías satelitales evitará la necesidad de exploraciones invasivas, minimizando la alteración del ecosistema y reduciendo costos en perforaciones innecesarias. Asimismo, al conocer la disponibilidad de agua subterránea, se podrán implementar estrategias de conservación y uso eficiente del recurso, mitigando problemas como la sobreexplotación y el hundimiento del suelo.

## **1.10 Diseño Metodológico**

### **1.10.1 Enfoque de investigación**

Una vez que se ha desarrollado el problema de investigación, así como las preguntas, objetivos e hipótesis, se procede a diseñar el estudio y a seleccionar la muestra que se utilizará, conforme al enfoque establecido. La siguiente fase implica la recopilación de datos relevantes sobre las variables, eventos y elementos que forman parte de la investigación (Gómez, 2006:121).

“En este marco, Hernández, Fernández y Baptista (2010:4) en su libro Metodología de la Investigación, argumentan que cualquier trabajo de investigación se basa en dos enfoques fundamentales: el enfoque cuantitativo y el enfoque cualitativo, que en conjunto dan origen a un tercer enfoque: el enfoque mixto. “

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, aplicando diversos métodos que faciliten el logro de los objetivos, mediante procedimientos que organizarán las actividades del estudio, donde se analizará la información espacial generada a partir de las mediciones para identificar aguas subterráneas en la ciudad de Sucre.

### **1.10.2 Tipo de diseño**

En virtud de lo propuesto, referente a la recolección, análisis e interpretación de información espacial, el diseño adoptará una figura narrativa. Este enfoque se implementará

con el fin de complementar las teorías utilizadas como parte integral del proceso investigativo y de la acumulación de datos que se llevará a cabo para este estudio.

Se ha determinado que la presente investigación tiene carácter descriptivo, teniendo en cuenta que su propósito fundamental es ejecutar un análisis de los datos espaciales. Asimismo, se procederá a la aplicación de programas especializados y a la comparación meticulosa de los resultados derivados de la detección de aguas subterráneas en la zona urbana de la ciudad de Sucre, utilizando para ello imágenes proporcionadas por la misión Sentinel I.

### **1.10.3 Métodos de investigación**

El método es el camino a seguir para alcanzar un objetivo. Si relacionamos este término con el proceso investigativo, se puede afirmar que el método es el procedimiento óptimo que se aplica para lograr dicho objetivo. De acuerdo con el diseño de la investigación, se utilizaron los siguientes métodos:

#### **Métodos teóricos**

- Análisis y síntesis: El análisis consiste en la separación de las partes de un todo para poder estudiarlas de forma individual (analizar cada variable en este caso).

La síntesis integra esos elementos para tener una comprensión total (sintetizar las variables en un modelo simple). Esto permite procesar la información recopilada de manera útil y ordenada.

- Inducción y deducción: La inducción va de casos particulares a conclusiones generales. En este caso, observar en varios puntos que ante cierta respuesta de radar hay presencia de agua subterránea, inductivamente se concluye que ese tipo de respuesta indica presencia de aguas subterráneas. La deducción aplica principios generales a casos específicos. Por ejemplo, partir de la teoría sobre la respuesta de radar de apertura sintética ante humedad para deducir dónde se espera esa respuesta en las zonas de estudio en Sucre.

- Modelación y abstracción: Los modelos representan de forma simplificada las relaciones clave entre elementos. En este caso, un modelo conceptual del acuífero con sus variables principales. La abstracción consiste en extraer de la realidad los aspectos esenciales al tema de estudio. Se puede, abstraer la respuesta de radar y la geología como factores determinantes.

- Histórico-lógico: Revisar antecedentes y la evolución en el tiempo del conocimiento sobre un tema, sus enfoques y metodologías, permite orientar adecuadamente el estudio actual.

## **Métodos e instrumentos para la indagación empírica**

Métodos empíricos:

Observación: a través del análisis visual de imágenes satelitales del satélite Sentinel-1.

Medición: de las variables del estudio a través de sensores remotos y trabajo de campo.

Recolección de datos: mediante teledetección, registros históricos, muestreos de campo.

Modelación estadística: construyendo modelos a partir de los datos recopilados.

Métodos geofísicos: como apoyo para validar presencia de agua subterránea.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Marco Conceptual**

#### **2.1.1 Ciclo hidrológico**

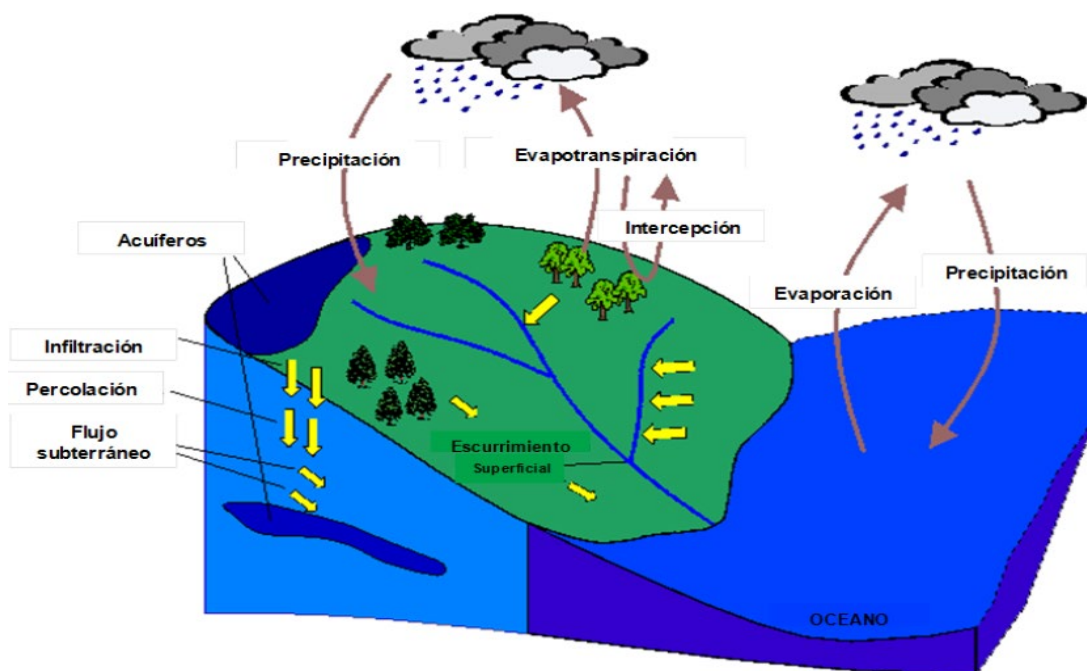
El ciclo del agua en la Tierra, o ciclo hidrológico, es la circulación continua del agua en sus diferentes estados en el planeta. No tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico suele describirse normalmente comenzando desde los océanos, porque estos constituyen de lejos la fuente principal del agua en circulación. La radiación solar evapora el agua de los océanos y, en la atmósfera, el vapor de agua asciende formando las nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad de estas se condensa y cae a la superficie como lluvia, granizo o nieve, las diferentes formas de precipitación (Arocha, 1980).

La precipitación que cae en tierra es el origen de prácticamente toda el agua dulce. Parte de esta precipitación, después de mojar las hojas y el suelo, corre por la superficie terrestre hacia los cursos de agua, constituyendo el escurrimiento superficial; otra parte se infiltra en el suelo. Mucha de esta última es retenida en la zona de las raíces de las plantas y parte de ella vuelve a la atmósfera por la evapotranspiración (Arocha, 1980).

El excedente percola de la zona de raíces hacia abajo por la fuerza de gravedad y continúa su descenso hasta ingresar a un reservorio de agua subterránea. El agua subterránea fluye a través de los materiales porosos saturados del subsuelo hacia niveles más bajos que los de infiltración y puede volver a surgir naturalmente como manantiales y caudal de base de los ríos. La mayoría de estos devuelven el agua a los mares o la lleva a cuencas cerradas donde se evapora (Arocha, 1980).

De esta manera, el agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes. Estas están almacenadas en acuíferos, ubicados a diferentes niveles de profundidad, hasta sistemas confinados que están a varios kilómetros por debajo de la superficie. Se pueden encontrar aguas subterráneas en casi cualquier parte, tratándose de zonas húmedas, áridas o semiáridas. El agua del subsuelo es un recurso importante, pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación (Arocha, 1980).

**Figura 1: Representación del Ciclo Hidrológico**



Nota: López, J. (2020). El ciclo del agua: Fundamentos y aplicaciones. Editorial Universitaria.

El ciclo hidrológico involucra un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente. Este movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol, que proporciona la energía para elevar el agua (evaporación); y la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento) (López, 2020).

### 2.1.2 Definición de acuífero y aguas subterráneas

Las aguas subterráneas se definen como agua que se filtra y satura los poros y grietas de formaciones geológicas permeables bajo la superficie terrestre. Estas aguas provienen de la infiltración del agua de lluvia o superficial. Debido a su largo tiempo de residencia y al proceso de filtrado, generalmente tienen buena calidad. Este recurso puede ser colectado mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje, o puede fluir naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones en los cursos fluviales (Instituto Geológico y Minero de España, 2021).

Un acuífero es una formación geológica porosa y permeable que permite la circulación y el almacenamiento de agua subterránea en su interior, posibilitando su extracción en cantidades aprovechables. El agua subterránea almacenada en los acuíferos constituye una parte importante del ciclo hidrológico (Instituto Geológico y Minero de España, 2021).

Los acuíferos y las napas freáticas son formaciones geológicas que contienen y permiten la circulación de agua subterránea. Este recurso se origina por la infiltración del

agua de lluvia o superficial a través de poros y grietas de suelos y rocas permeables. Las aguas subterráneas representan un recurso de gran importancia para el consumo humano, agrícola e industrial (Instituto Geológico y Minero de España, 2021).

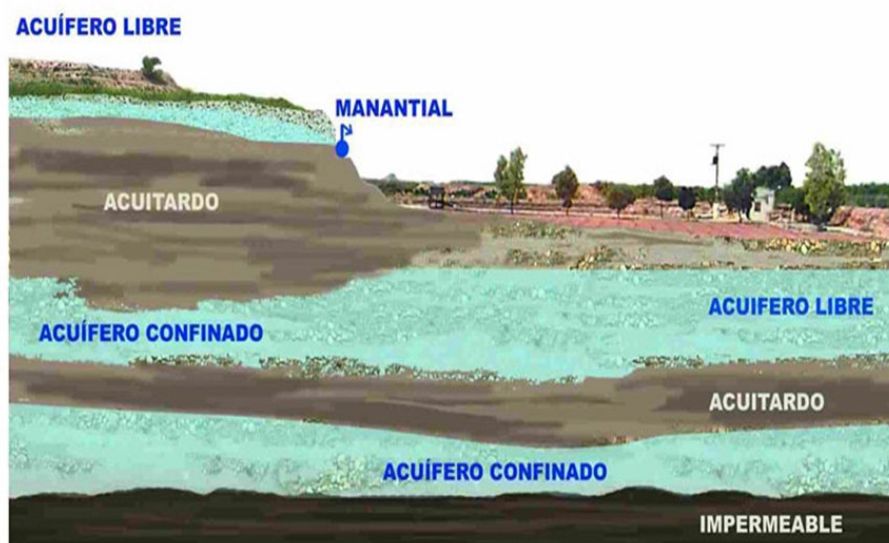
Los acuíferos se clasifican en los siguientes tipos:

**Acuíferos libres.** Son aquellos en los que el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable. Liberan agua por desaturación; es decir, el agua que ceden proviene del drenaje de sus poros.

**Acuíferos confinados.** Son aquellos cubiertos por una capa impermeable confinante. El nivel de agua en los acuíferos cautivos está por encima del techo de la formación acuífera. El agua que ceden proviene de la expansión del agua y de la descompresión de la estructura permeable vertical, cuando se produce la depresión en el acuífero. También se les denomina acuíferos cautivos.

**Acuíferos semiconfinados.** Son un caso particular de los acuíferos cautivos en los que el muro, el techo, o ambos no son totalmente impermeables, sino que permiten una circulación vertical del agua (Instituto Geológico y Minero de España, 2021).

**Figura 2: Tipos de acuíferos**



Nota: <https://www.igme.es/tipos-de-acuiferos>

### 2.1.3 Importancia del agua subterránea

Las aguas subterráneas constituyen la mayor reserva de agua dulce en las regiones habitadas por los seres humanos, representando más del 95% del total de las aguas disponibles en todos los continentes e islas. Estas reservas son esenciales para mantener el caudal de base de muchos ríos y la humedad del suelo en las riberas y áreas bajas de las cuencas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Col.).

La importancia global del agua subterránea puede observarse en las estadísticas sobre la disponibilidad de recursos hídricos. El 75% del planeta está cubierto por agua, de la cual el 97.5% corresponde a los océanos. Del 2.5% restante de agua dulce, más del 70% no está disponible para consumo humano, ya que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo. Solo un 0.3% del agua dulce está en lagos, ríos y la humedad del suelo, mientras que el 29.7% corresponde al agua subterránea, considerada la mayor reserva de agua dulce disponible en el planeta (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Col.).

**Figura 3: Distribución del agua en el planeta**



Nota: <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/aguas-subterranas-y-acuiferos/>

#### 2.1.4 Hidrogeología

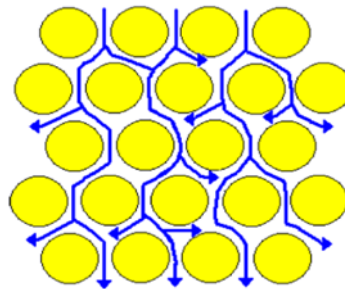
La porosidad y la permeabilidad son propiedades fundamentales en hidrogeología que determinan la capacidad de las formaciones geológicas para almacenar y transmitir agua subterránea. La porosidad se refiere al porcentaje de volumen de una roca o sedimento que está ocupado por espacios vacíos o poros, mientras que la permeabilidad indica la facilidad con la que un fluido puede moverse a través de esos poros interconectados (Fernández & González, 2016).

Es importante destacar que no todos los poros contribuyen al flujo de agua; solo aquellos que están interconectados permiten el movimiento del fluido. Por ello, se distingue

entre porosidad total y porosidad efectiva, siendo esta última la que realmente influye en la permeabilidad de la formación (Fernández & González, 2016).

Comprender estas propiedades es esencial para la gestión de los recursos hídricos subterráneos, ya que afectan directamente la capacidad de un acuífero para almacenar y transmitir agua, influyendo en su explotación y conservación (Fernández & González, 2016).

**Figura 4:** Representación de los poros en el suelo



Nota: [www.deh.enr.state.nc.us/osww\\_new/new1/images/wells/basic\\_groundwater\\_flow.pdf](http://www.deh.enr.state.nc.us/osww_new/new1/images/wells/basic_groundwater_flow.pdf)

## **2.1.5 Prospección de aguas subterráneas**

### **2.1.5.1 Prospección geofísica**

La prospección o exploración geofísica es el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la estructura y composición de las diversas capas de la Tierra. Esta disciplina se dedica a la aplicación de principios geofísicos para la investigación de recursos naturales subterráneos o para la comprensión de las condiciones físicas del subsuelo para la construcción de obras civiles (Universidad de Cantabria, 2010.).

Los métodos de prospección geofísica se clasifican en métodos magnéticos, métodos gravimétricos, métodos eléctricos y métodos sísmicos

### **2.1.5.2 Métodos magnéticos**

La literatura antigua china indica que se conocía una piedra que orientaba hacia el norte y el sur. Con el descubrimiento de los polos magnéticos norte y sur por parte de los peregrinos, el físico William Gilbert realizó varios experimentos con magnetos y cuerpos magnéticos, concibiendo a la Tierra como un imán gigante. Como método de exploración, probablemente comenzó en 1640, cuando la brújula fue utilizada como instrumento para detectar cuerpos de hierro sepultados (Universidad de Cantabria, 2010.).

### **2.1.5.3 Métodos gravimétricos**

En 1672, Jean Richer, al observar diferencias entre los péndulos de un reloj situado en París y otro en Cayenne, afirmó que “*el campo gravitacional terrestre era diferente en*

*ambos lugares.*” Las aplicaciones en la prospección petrolera comenzaron en 1914 (Universidad de Cantabria, 2010.).

#### **2.1.5.4 Métodos eléctricos**

Los primeros descubrimientos que indicaban que la Tierra actuaba como un conductor se deben a Watson en 1746, quien notó una corriente errática que pasaba a través de dos electrodos separados por varios kilómetros. Gray y Wheeler, en 1720, habían realizado previamente medidas de resistividad en rocas, tabulando sus resultados. El uso comercial de los métodos eléctricos se atribuye a Marcel y Conrad Schlumberger en 1913, quienes durante la Primera Guerra Mundial los aplicaron en la detección de minas y boyas marinas (Universidad de Cantabria, 2010.).

#### **2.1.5.5 Métodos sísmicos**

En 1761, John Michel afirmó que el movimiento del terreno producido por terremotos se transmite a través de vibraciones elásticas en la corteza terrestre. También sugirió que las observaciones sobre el tiempo de impacto en diferentes lugares permitían determinar el lugar de origen del terremoto. La técnica de refracción sísmica fue desarrollada entre 1905 y 1906 por geofísicos que buscaban localizar domos salinos (Universidad de Cantabria, 2010).

#### **2.1.5.6 Tendencias actuales**

En la actualidad, el desarrollo tecnológico ha facilitado la construcción de aparatos con mayor sensibilidad, permitiendo una exploración más detallada. Además, existen satélites que proporcionan información sobre distintas características de la Tierra (Universidad de Cantabria. (2010). *Tema 8. Métodos de prospección geofísica generales.* [https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2131/course/section/1942/tema\\_8.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2131/course/section/1942/tema_8.pdf)

## **2.2 Marco Legal e Institucional**

### **2.2.1 Leyes y normas relevantes**

Las normativas legales vigentes para el manejo y uso del agua en Bolivia son:

- ✓ Ley de aprovechamiento y dominio de Aguas (1906)
- ✓ Ley de prohibición de negar el aprovechamiento de agua destinada a explotaciones agropecuarias (1945)
- ✓ Reglamento de aguas para irrigación. Decreto Supremo 2010-67 (1967)
- ✓ Ley del Medio Ambiente (1993)
- ✓ Ley INRA (1996)
- ✓ Ley de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario (2000)
- ✓ Ley de Riego (2004)

✓ Ley Marco de Autonomías y Descentralización (2010)

La Ley de Aprovechamiento y Dominio de Aguas, promulgada en 1906, ha sido objeto de diversas propuestas para su modernización a nivel nacional, pero hasta ahora ninguna de ellas ha sido aprobada. La razón aparente de esta situación es la existencia de múltiples demandas provenientes de los distintos sectores involucrados, las cuales resultan difíciles de conciliar.

En 1994 se estableció la norma NB689, titulada “Instalaciones de Agua – Diseño para Sistemas de Agua Potable”, que regula el diseño y la construcción de sistemas de agua potable. Esta norma define los criterios técnicos para sistemas de agua potable, tanto públicos como privados, en áreas urbanas, periurbanas y rurales, con el fin de garantizar obras de calidad, seguridad, durabilidad y costo-efectividad, contribuyendo así a la mejora de la calidad de vida y salud de la población. Aunque aborda aspectos relacionados con la selección de fuentes de agua y la perforación de pozos, su enfoque principal radica en las redes de distribución. Sin embargo, carece de información detallada sobre estudios de sostenibilidad de las fuentes y la calidad de los pozos.

Otras normas significativas para el sector son:

Norma Boliviana NB 512, Agua Potable – Requisitos; Reglamento Nacional para el Control de la Calidad de Agua para Consumo Humano.

Norma Boliviana NB 688, Diseño de Sistemas de alcantarillado sanitario y pluvial y sus reglamentos.

Reglamentos de Presentación de Proyectos de Agua Potable y saneamiento.

Metodologías de Preparación y Evaluación de Proyectos.

Reglamento Nacional de Prestación de Servicios de Agua.

No existen normas formales y detalladas para el desarrollo y manejo de aguas subterráneas ni para la perforación de pozo, aunque el Comité de Agua en Santa Cruz propuso un documento preliminar de normas regionales para el desarrollo de este último, todavía no fueron consensuadas ni publicadas.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2004). *AQUASTAT: Bolivia*. [http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries\\_regions/bol/indexesp.stm](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/bol/indexesp.stm)

### **2.3 Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota)**

Es “la ciencia y la tecnología por la cual se pueden identificar las características de los objetos de interés, medir o analizar las características sin contacto directo” (JARS, 1993).

Por lo general, la teledetección es la medición de la energía que se emanó de la superficie de la Tierra. Si la fuente de la energía medida es el sol, entonces se llama la teledetección pasiva, y el resultado de esta medición puede ser una imagen digital (RICHARDS y JIA, 2006). Si la energía medida no es emitida por el Sol, pero desde la plataforma de sensor, entonces se define como la teledetección activa, tales como sensores de radar que funcionan en el rango de microondas (RICHARDS y JIA, 2006).

La teledetección es una técnica utilizada para adquirir datos de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales. Consiste en obtener información sobre objetos o áreas sin que los instrumentos empleados estén en contacto directo con ellos. Esta técnica se utiliza en diversas aplicaciones, como la fotografía aérea y satelital, el monitoreo ambiental, la gestión de recursos naturales, la agricultura, la cartografía, entre otros.

La teledetección se basa en la recolección de datos mediante sensores que capturan información electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. Estos datos son procesados y analizados utilizando programas de ordenador para obtener información útil sobre el objeto o área de interés.

La teledetección ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, gracias al desarrollo de técnicas de procesamiento de imágenes y al acceso rápido a información a través de servicios en línea como Google Earth. Estos avances han hecho que la teledetección sea más accesible y popular tanto en el ámbito científico como para el público en general.

En resumen, la teledetección es una técnica que permite adquirir información sobre la superficie terrestre utilizando sensores instalados en plataformas espaciales. Esta técnica se utiliza en diversas aplicaciones y se basa en la captura y análisis de la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie terrestre. (<https://www.ign.es/web/resources/docs/IGNCnig/OBS-Teledeteccion.pdf>)

### **2.3.1 Historia de la teledetección**

La historia de la teledetección se remonta a las primeras plataformas de observación aérea: los globos aerostáticos y a la invención de la fotografía en el siglo XIX. La teledetección moderna nace con la fotografía aérea en el siglo XX. El año que simboliza la entrada de la teledetección en la era moderna es 1957 con el lanzamiento del satélite Sputnik, primer satélite artificial puesto en órbita alrededor de la Tierra por la Unión Soviética (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

La observación sistemática de la Tierra desde el espacio se inició en 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-I, primer satélite meteorológico con una cámara de televisión

de baja resolución que permitía a los meteorólogos discriminar entre nubes, agua, hielo y nieve. La familia de satélites TIROS, rebautizados como NOAA a partir de 1970, sigue todavía en actividad (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

El vuelo tripulado Apolo 9 (1969) realizó la primera experiencia de fotografía orbital multiespectral para el estudio de los recursos terrestres. Los resultados obtenidos en el estudio de recursos naturales terrestres con los datos de los primeros satélites meteorológicos y las misiones espaciales tripuladas impulsaron el desarrollo, por parte de la NASA, del programa ERTS (*Earth Resources Technological Satellite*), conocido también como LANDSAT (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

El primer satélite específicamente dedicado a la teledetección fue el norteamericano LANDSAT 1, que fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972 y estuvo operativo hasta principios de 1978. El último de la serie, el LANDSAT 7, se lanzó al espacio el 15 de abril de 1999 (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

A partir de los datos suministrados por los LANDSAT, numerosos países han decidido disponer de medios propios de teledetección. Entre estos destacan los satélites SPOT (francés), RADARSAT (canadiense), MOS (Japón), IRS (India) y ERS (Agencia Espacial Europea) (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

La teledetección es, al mismo tiempo, una herramienta de inventario (por ejemplo, de la ocupación y uso del suelo), de análisis y predicción (meteorología), de ayuda a la prevención (en agricultura) y de espionaje militar. Todos estos campos son de gran importancia económica y política (Ministerio de Educación y Ciencia, 2006).

Actualmente, hay permanentemente en órbita decenas de satélites de observación de la Tierra que generan miles de imágenes cada día para aplicaciones de uso civil y militar. "Ministerio de Educación y Ciencia. (2006). *Historia de la teledetección*. CNICE. [http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo\\_td.htm](http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material121/unidad1/histo_td.htm)

### **2.3.2 Componentes de la teledetección**

La teledetección se compone de varios elementos que son fundamentales para su funcionamiento. A continuación, se describen los principales componentes de la teledetección:

*Los sensores:* Los sensores, estos dispositivos imprescindibles en varios aspectos de nuestra vida diaria y áreas tecnológicas, se utilizan para capturar algo que no es perceptible para el ojo humano: la radiación electromagnética. Esta radiación es emitida o reflejada por todo lo que nos rodea, más específicamente por la superficie de nuestro planeta, la Tierra. Es

relevante destacar que estos sensores son altamente sensibles y capaces de identificar los cambios más sutiles en la radiación.

Para llevar a cabo esta impresionante y esencial actividad, los sensores pueden operar bajo dos modalidades distintas: pueden ser pasivos o activos. En el primer caso, tenemos como ejemplo las cámaras fotográficas o los sensores de infrarrojos. Estos dispositivos tecnológicos son conocidos como pasivos porque identifican y capturan la radiación natural que es emitida o reflejada por los objetos que se están observando. No generan ningún tipo de energía, simplemente la capturan.

Las cámaras fotográficas son probablemente el ejemplo más evidente y familiar de este tipo de sensores. Cuando tomamos una foto, la cámara captura la luz que refleja el objeto. Por otro lado, los sensores infrarrojos se usan ampliamente en sistemas de seguridad y vigilancia. Estos aparatos detectan a través del calor corporal, una forma de radiación infrarroja, que es emitida por personas y otros seres vivos.

En cambio, existen sensores que son activos, como los radares. Estos aparatos en particular son llamados activos debido a que ellos mismos emiten energía y luego miden la radiación reflejada que viene del objeto. Este procedimiento es lo que les permite identificar la proximidad, la velocidad y características del objeto que se quiere observar.

La existencia de sensores activos y pasivos evidencia la diversidad y adaptabilidad de la tecnología para cubrir nuestras exigencias de percepción y medición del mundo que nos envuelve. A través de ellos, somos capaces de comprender y detectar fenómenos que de otra forma serían inaccesibles para nosotros.

Por eso, es esencial valorar y entender el rol que estos dispositivos juegan en nuestra vida diaria. Ya sea para protegernos, como con los sensores infrarrojos en los sistemas de seguridad, o para explorar el vasto universo, como es el caso de los radares usados en la exploración espacial, los sensores son herramientas invaluable que incrementan nuestras habilidades perceptivas y nos permiten interactuar de una forma más importante y profunda con el mundo y el universo que nos rodea.

*Las plataformas:* Las plataformas son los dispositivos usados para trasladar los detectores y ubicarlos en el punto adecuado para la recolección de información. Estas plataformas pueden ser satélites, aeronaves, drones o hasta estaciones terrestres. Cada clase de estructura posee sus propios beneficios y restricciones en cuestiones de alcance, resolución espacial y temporal, y gastos.

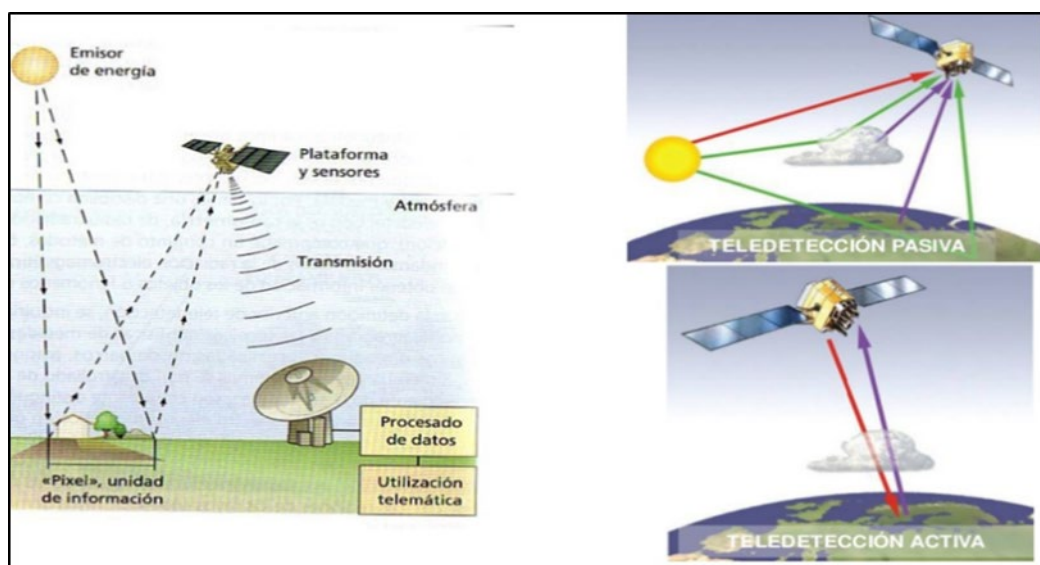
*Las transmisiones:* La comunicación es fundamental para enviar la información obtenida por los sensores desde las plataformas hasta los centros de procesado y estudio.

Las tecnologías de transmisión utilizadas pueden englobar conexiones satelitales, redes terrestres o incluso comunicaciones sin cables. Estas transmisiones deben ser consistentes y seguras para asegurar la integridad de la información.

*Procesado y análisis:* Tras la adquisición de la información, se necesita un procesado y estudio adecuados para extraer datos útiles. Esto implica la rectificación de la información por efectos atmosféricos y geométricos, la calibración de los detectores y la utilización de algoritmos para la extracción de datos específicos, como la detección de variaciones en la cobertura vegetal o la identificación de objetos.

*Usos:* La teledetección tiene un vasto conjunto de usos en diferentes áreas, tales como la gestión del riesgo de catástrofes, la monitorización del clima y el cambio climático, la agricultura, la gestión de recursos naturales, la planificación urbana, entre otros. Estos usos emplean los datos teledetectados para tomar decisiones instruidas e incrementar la comprensión de nuestro entorno.

**Figura 5:** Componentes de un sistema de teledetección



Nota: Extraído del tema 3 de teledetección del IES Vicent Andres Estelles.

<<https://es.slideshare.net/Bioestelles/tema-3-40690655>

## 2.4 Clasificación de Sensores

### 2.4.1 Sensores pasivos

La característica distintiva de los sensores pasivos es que estos no necesitan emitir ningún tipo de energía para funcionar; por el contrario, son capaces de capturar la energía que ya es emitida o reflejada por un objeto o un fenómeno a observar. Esto contrasta con

los sensores activos, que deben emitir una energía hacia el objeto o el fenómeno a ser observado y luego leer la energía reflejada.

#### Tipos de Sensores Pasivos

Existen varios tipos de sensores pasivos, algunos de ellos pertenecen a la categoría de los sensores ópticos y los sensores técnicos. Sin embargo, también hay sensores pasivos de microondas que se suelen llamar radiómetros libres.

#### Sensores Pasivos Ópticos

Los sensores pasivos ópticos son aquellos que capturan y analizan la luz reflejada por un objeto. Este tipo de sensor puede ser especialmente útil en la observación y seguimiento de fenómenos naturales, por ejemplo, en el monitoreo de la salud de los bosques basado en los cambios de la reflectancia de la luz por los árboles.

**Sensores Pasivos Técnicos:** Los sensores técnicos son aquellos que se diseñan para detectar ciertos aspectos específicos del ambiente, como la presencia de gases específicos, las variaciones de temperatura o la presión atmosférica.

Estos sensores también son pasivos, es decir, no emiten energía; solamente miden la que es emitida o reflejada naturalmente por la Tierra y su atmósfera. La fuente de energía radiante surge de fuentes naturales. (Podest, 2018)

**Figura 6:** Sensores pasivos



Nota: European Space Agency

### 2.4.2 Sensores activos

Los sensores activos, aquellos armados con la capacidad de proporcionar su propia luz o iluminación, representan una tecnología avanzada en la evolución del monitoreo y la detección. Estos instrumentos, que de manera efectiva se iluminan a sí mismos y emitir su propia fuente de luz, se pueden usar en una variedad de entornos y aplicaciones.

Un buen ejemplo de un tipo de sensor activo es el radar, el cual es analógico a los ultrasonidos. En el funcionamiento estándar de tal dispositivo, un instrumento emite una ráfaga concentrada de energía: esto es lo que convencionalmente se conoce como la "señal". Una vez se ha emitido esta señal, el mismo instrumento luego rastrea su trayectoria y mide la posición, así como la ubicación de la señal que es reflejada y regresada.

Este tipo de detección, donde un instrumento está tanto emitiendo como recibiendo la señal, se conoce comúnmente como teledetección activa. En este proceso, se rastrea la señal que se ha reflejado hacia atrás y se utilizan estos datos para determinar información crucial sobre la superficie o el objeto que ha reflejado la señal. Esta técnica tiene una cantidad impresionante de aplicaciones, desde la cartografía y la navegación hasta la vigilancia y más allá.

Este tipo de teledetección, cuando se realiza en el rango de microondas, recibe un nombre específico: se le conoce como teledetección de radar. Un subtipo práctico y popular de esta tecnología es el radar de apertura sintética, donde las señales de radar transmitidas se procesan digitalmente para producir imágenes de alta resolución. Esta tecnología ha demostrado ser particularmente útil en la cartografía, la vigilancia del terreno y la monitorización del clima.

A diferencia de los sensores pasivos, que se basan en fuentes de luz externas, estos sensores activos mantienen su independencia al proporcionar su propia fuente de energía radiante para la iluminación. Esto les otorga una gran ventaja, ya que pueden funcionar incluso en entornos donde la fuente de luz externa puede no estar disponible. Además, a diferencia de sus contrapartes pasivas, los sensores activos pueden controlar y ajustar la intensidad de la luz en tiempo real, lo que proporciona un control dinámico y una capacidad de adaptación en diversas condiciones, por ejemplo, radar, radar de apertura sintética (SAR), LiDAR (Podest, 2022)

**Figura 7: Sensores activos**



Nota: European Space Agency

## 2.5 Componentes de la Teledetección Activa

### 2.5.1 Satélites activos

Los satélites son objetos hechos por el hombre que orbitan la Tierra u otros cuerpos celestes diseñados para obtener datos e imágenes de la superficie de la Tierra, la atmósfera u otros cuerpos celestes utilizando sensores y cámaras.

Estos satélites de teledetección recopilan información en diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, lo que les permite capturar datos tanto en el espectro visible como en el invisible, como los rangos infrarrojos y de microondas. (Podest, 2018)

### 2.5.2 Microondas

La principal razón para utilizar microondas en la teledetección es que obtenemos cierta información que puede complementar los métodos utilizados para la teledetección de otras regiones espectrales.

Algunas ventajas de las microondas, por ejemplo: pueden penetrar las nubes e incluso la parte superior de la tierra seca o la arena al menos un metro. La teledetección por microondas puede adquirir imágenes pasivas de la radiación térmica superficial y también puede adquirir imágenes activas mediante la emisión de su propio pulso electromagnético.

Otra ventaja de la teledetección atmosférica sobre los métodos infrarrojos es que se pueden elegir longitudes de onda de microondas para que las nubes de hielo y otras partículas (por ejemplo, aerosoles) no afecten significativamente a la señal (Woodhouse, 2006).

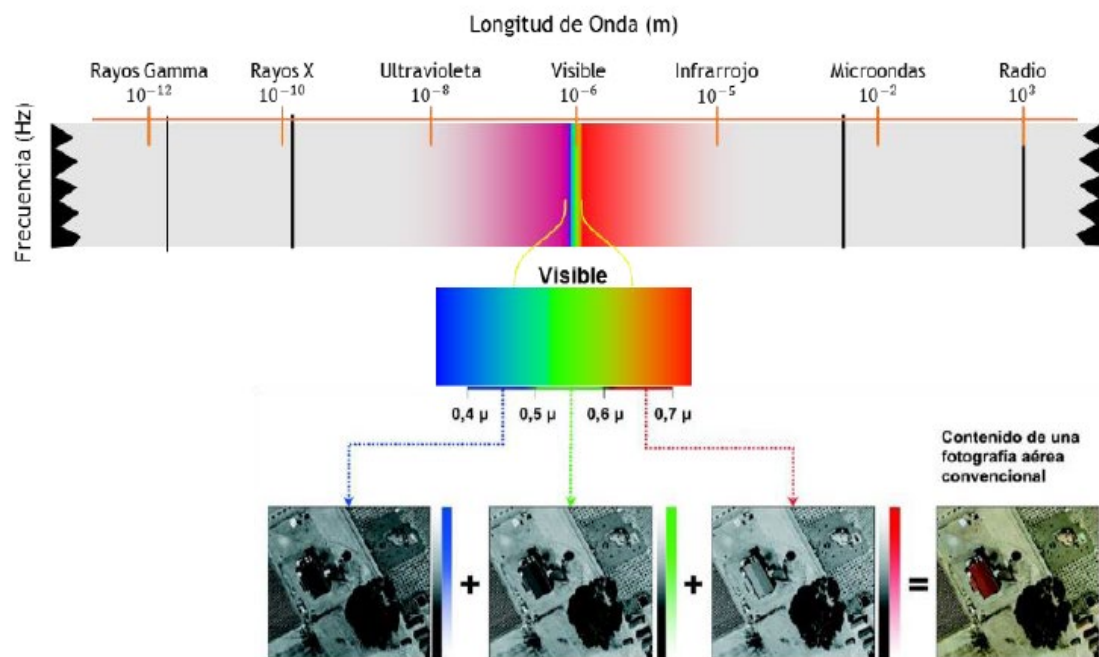
### 2.5.3 Sistemas de sensores

Los sensores de Teledetección son instrumentos especializados que transforman la radiación electromagnética en información perceptible y analizable.

#### Espectro electromagnético

“El espectro electromagnético es el sistema que clasifica, de acuerdo con la longitud de onda, toda la energía (de corto cósmica a largo radio) que se mueve, armónicamente, a la velocidad constante de la luz” (NASA, 2011).

**Figura 8: Espectro electromagnético**



Nota: NASAARSET

Regiones espectrales utilizadas para la observación remota de la Tierra.

**Espectro visible (0.4 - 0.7  $\mu$ m):** Este rango de frecuencias corresponde al espectro visible para el ojo humano y coincide con la máxima radiación solar. Se subdivide en tres bandas principales: rojo (0.6 - 0.7  $\mu$ m), verde (0.5 - 0.6  $\mu$ m) y azul (0.4 - 0.5  $\mu$ m) (NASA ARSET, 2008).

**Infrarrojo cercano (0.7 - 1.1  $\mu$ m):** También conocido como infrarrojo fotográfico o reflejado, abarca la energía solar que reflejan los cuerpos y tiene un comportamiento similar al espectro visible (NASA ARSET, 2008).

**Infrarrojo medio (1.1 - 8  $\mu$ m):** En este rango se entremezclan la radiación solar y la emisión térmica de los cuerpos. La atmósfera afecta sensiblemente esta banda, por lo que se

aprovecha para medir concentraciones de vapor de agua, ozono y aerosoles (NASA ARSET, 2008).

Infrarrojo térmico (8 - 14  $\mu\text{m}$ ): Esta banda registra las radiaciones emitidas por los propios cuerpos, lo que permite determinar su temperatura. Además, las imágenes en este rango pueden tomarse en cualquier momento del día (NASA ARSET, 2008).

Microondas (1 mm - 1 m): La banda de microondas ha generado un interés creciente en teledetección, ya que las perturbaciones atmosféricas son menores y esta región es transparente a las nubes. Generalmente se utilizan sensores activos para trabajar con esta banda. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET). (2008). *Remote sensing fundamentals*. NASA. Recuperado de <https://appliedsciences.nasa.gov/arset>

## 2.6 Conceptos Básicos de la Teledetección por Radar

El principio del radar descansa en las propiedades de emisión/recepción de ondas electromagnéticas, las cuales puede caracterizar distintos materiales reflejantes y son la clave para identificar a los objetos reflectores. Sin embargo, la toma de datos de los sensores de radar da lugar a inexactitudes de origen que deben tomarse en cuenta para corregirlas. Existen distintos tipos de imágenes de acuerdo con parámetros propios de la ingeniería de los sensores, tales como las frecuencias en que transmiten y el ángulo del rayo de radiación emitida respecto de una perpendicular sobre el terreno. Pueden consultarse referencias en español como (NRC, 2012) para la ampliación de los temas introducidos de manera básica en esta sección.

Es relativamente reciente que se ha liberado al público la utilización de radares para aplicaciones civiles de PR. Para facilitar la comprensión, algunos investigadores resaltan similitudes de la operación del radar con la eco-localización natural de los murciélagos, donde el retardo en la captación de un eco indica a esos animales la distancia, altura, dirección e incluso velocidad a los objetos (Woodhouse 2000). En efecto, el acrónimo original de la palabra radar significa “detección y distancia por ondas de radio”. Al enviar su propia radiación como onda de energía electromagnética que incide sobre blancos en tierra (parecido al flash de una cámara) el radar logra penetración de la atmósfera, captación de datos y generación de imágenes bajo prácticamente cualquier condición atmosférica, de día o de noche. La posibilidad de iluminar artificialmente un blanco permite seleccionar dicha iluminación para “ver” ciertas características de interés del objetivo (Leblon et al., 1999).

En otras palabras, el aspecto esencial de la PR con radares es un pulso o señal de energía electromagnética que se compone de dos partes: la eléctrica y la magnética. Según sus especificaciones de diseño y funcionamiento, los radares obtienen mediciones de la señal de diversas formas. Esto brinda al usuario diferentes alternativas para seleccionar imágenes

de varios sensores, permitiendo que las elija según las aplicaciones deseadas (Leblon et al., 1999).

## **2.7 Historia del SAR**

Los sistemas SAR consisten en radares en movimiento, generalmente en aviones o satélites. El radar emite pulsos (ondas electromagnéticas en el rango de microondas) en el área iluminada, estos pulsos son reflejados por los objetos en el área y luego recibidos por la antena del radar. Una de las características de estos sistemas es su capacidad para producir imágenes de alta resolución a partir de señales recibidas por antenas relativamente pequeñas. (Collado, 2016)

Radar de Apertura Sintética (SAR, del inglés Synthetic Aperture Radar) es un sistema de visión lateral que se utiliza en la trayectoria de vuelo de la plataforma del sensor para simular una apertura de antena para generar imágenes satelitales de alta resolución. Esta tecnología se utiliza principalmente en países ecuatoriales para dar seguimiento a fenómenos dinámicos. Su principal objetivo es monitorear zonas terrestres independientemente de la condición climática prevalente al momento de la toma de la imagen. (Sánchez, Pech-May, Sánchez y Magaña, 2021)

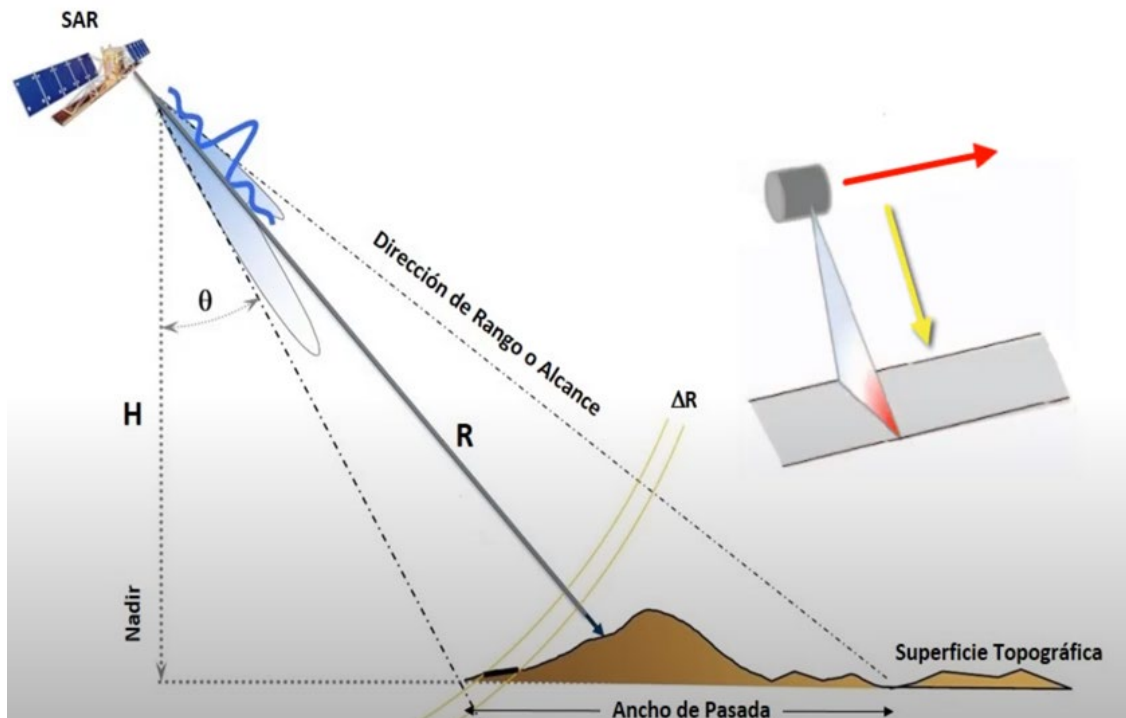
### **2.7.1 SAR (Radares de Apertura Sintética)**

El radar de apertura sintética (SAR) es un sistema de vista lateral que se utiliza en la trayectoria de vuelo de la plataforma del sensor para simular la apertura de la antena y producir imágenes satelitales de alta resolución. Esta tecnología se utiliza principalmente en países tropicales para monitorear fenómenos dinámicos. Su objetivo principal es monitorear el territorio independientemente de las condiciones climáticas que prevalezcan en el momento de la filmación. (Sánchez, Pech-May, Sánchez y Magaña, 2021).

El radar SAR de apertura sintética es un radar activo que emite energía en el rango de microondas (varios centímetros) durante un período corto y recibe ecos de la señal reflejada cuando se aplica. El objeto pasa a través de la apertura compuesta, es decir, debido a la alta velocidad de la nave espacial (alrededor de 7,5 km/s), la antena del instrumento SAR se convierte en una antena virtual más grande. El objetivo está en el haz de la antena durante unos instantes y el radar lo observa desde varios puntos a lo largo de la trayectoria del satélite, lo que equivale a ampliar la longitud efectiva de la antena. (Cesca, s. f.)

Por otro lado, radar de apertura sintética (SAR - Synthetic Aperture Radar) es un sistema de radar de iluminación lateral que produce una imagen de resolución final de la superficie bajo observación. (Belmonte y Caamaño, 2009)

**Figura 9: SAR (Radares de Apertura Sintética)**



Nota: [https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=1\\_NWDOxMfgM](https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=1_NWDOxMfgM)

### 2.7.2 Ventajas del SAR (Radares de Apertura Sintética)

Las imágenes satelitales de los sensores ópticos se han incorporado cada vez más en la colecta de información terrestre y marina; sin embargo, estas no son idóneas para la adquisición de datos de manera ininterrumpida, ya que dependen de la luz solar, lo que las hace vulnerables a los efectos del clima (INEGI, 2020).

Por otra parte, su utilización presenta limitaciones en zonas nubosas, con bruma, niebla y en regiones tropicales, haciendo imposible un seguimiento adecuado de fenómenos dinámicos. Por ello, el uso de la teledetección en estos casos solo es posible con imágenes de radar. La energía electromagnética (EM) con la que operan los sensores SAR permite obtener datos de observación de la Tierra independientemente de perturbaciones atmosféricas y de la luz solar.

La EM penetra la nubosidad y otras perturbaciones atmosféricas e incluso logra cierta penetración en el terreno. Gracias a esta capacidad, es posible obtener imágenes tanto diurnas como nocturnas, cuyo contenido de datos es de naturaleza distinta al de las imágenes ópticas. Estos datos dependen de parámetros y características como la polarización de la señal electromagnética enviada y recibida, el ángulo de incidencia del rayo, y la resolución espacial y temporal. La polarización es una de las características más relevantes para la extracción de información en imágenes SAR (INEGI, 2020). Instituto Nacional de Estadística

y Geografía (INEGI). (2020). Teledetección: Radar de apertura sintética (SAR). INEGI. Recuperado de <https://www.inegi.org.mx>

### 2.7.3 Ventajas y desventajas de la teledetección con radar en comparación a la óptica

Ventajas del radar:

- ✓ Es posible operar de día y de noche al ser un sensor activo (emite su propia radiación).
- ✓ Penetra nubes y niebla, al usar longitudes de onda más largas. Permite obtener imágenes en condiciones nubosas.
- ✓ Detecta humedad del suelo y biomasa de la vegetación. Útil para estudios hidrológicos.
- ✓ Provee información sobre texturas, rugosidad del terreno y tipo de cultivos.
- ✓ Cubre grandes extensiones de terreno de forma sistemática.

Desventajas del radar:

- ✓ Resolución espacial menor en comparación de los sensores ópticos.
- ✓ Complejidad en el procesamiento e interpretación de datos radar. Se requiere personal especializado.
- ✓ Las zonas lisas especulares generan ruido en las imágenes debido a la poca absorción de energía y la reflexión de la señal.
- ✓ Costo de las imágenes radar es más elevado.
- ✓ No permite identificar colores reales, solo intensidades.

### 2.7.4 Parámetros del radar a considerar

De acuerdo con la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), los sensores de radar generalmente se dividen en dos grupos según sus modos de operación. Los sensores activos son aquellos que proporcionan su propia señal y, por lo tanto, contienen un transmisor y un receptor, mientras que los sensores pasivos son simplemente receptores que miden la radiación que emana de la escena bajo observación (Rodríguez & Moreno, 2023).

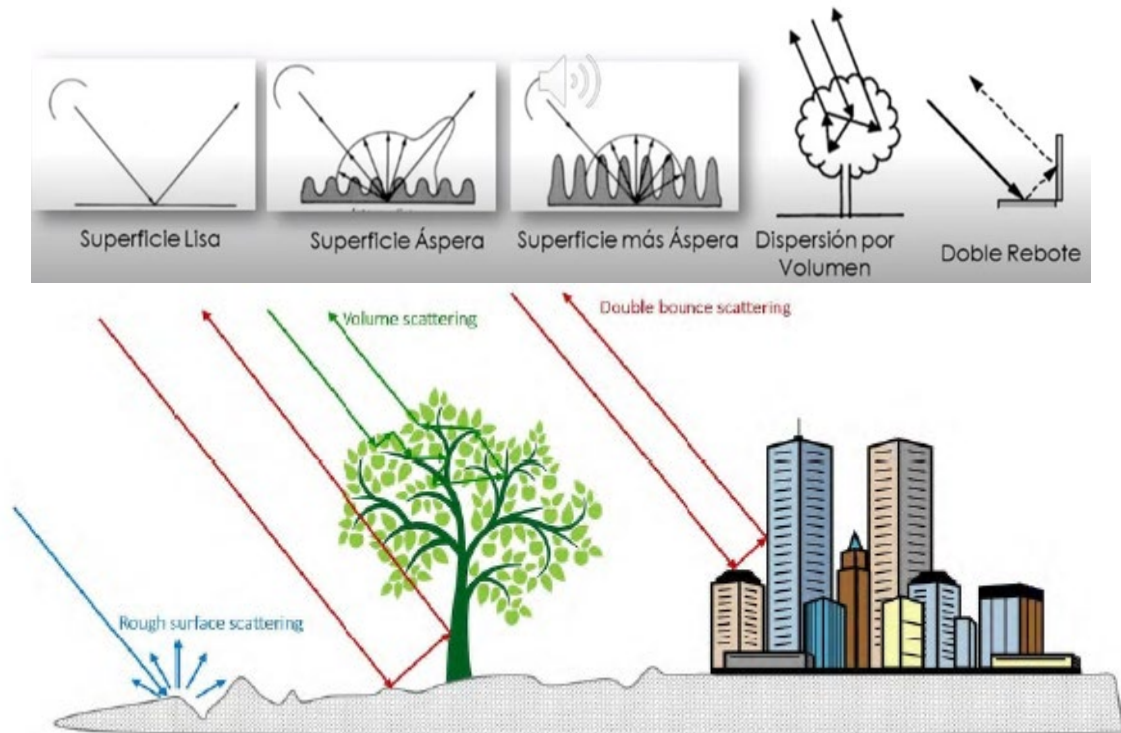
Sistemas activos: Incluyen sistemas de imágenes de radar, dispersómetros y altímetros.

Sistemas pasivos: Incluyen radiómetros de microondas (Rodríguez & Moreno, 2023).

### 2.7.4.1 *Dispersión superficie lisa*

También conocida como superficie de reflexión especular, la mayor parte de la energía incidente la cual procede de la izquierda es reflejada en dirección opuesta al radar hacia la derecha y por ello estas áreas aparecen oscuras aguas sin vegetación. (NASA Video, 2019)

**Figura 10:** *Dispersión de la señal de SAR*



Nota: NASAARSET

### 2.7.4.2 *Dispersión superficie rugosa*

Se produce cuando hay algún nivel de rugosidad en la superficie que hace que la señal se disperse en diferentes direcciones principalmente en la dirección opuesta al radar y aparecen oscuras estas áreas no son tan oscuras como la superficie lisa, un ejemplo sería una superficie de agua abierta con cierto nivel de aspereza causada por el viento, lluvia fuerte o vegetación muy baja flotante, a medida que la superficie se vuelva más rugosa o áspera una mayor parte de la señal retorna al satélite y ese pixel aparece más brillante en la imagen. (NASA Video, 2019)

### 2.7.4.3 *Dispersión por volumen*

Ocurre cuando la señal se dispersa varias veces y en múltiples direcciones dentro de un volumen o medio en el caso de la vegetación la señal puede revotar de las hojas, tallos, troncos, ramas y del suelo. (NASA Video, 2019)

#### **2.7.4.4 *Dispersión por doble rebote***

Resulta cuando las superficies forman ángulos rectos en dirección al radar la señal rebota dos veces reflejando la mayor parte de la energía de vuelta al sensor estas áreas aparecen muy brillantes en las imágenes del radar y se ven comúnmente cuando hay vegetación inundada debido a la interacción entre la superficie lisa del agua y la estructura vertical de la vegetación. como el doble rebote también es característico de las zonas urbanas. (Podest, 2018)

#### **2.7.5 Características de la superficie relacionados a estructura**

##### **2.7.5.1 *Tamaño relativo a la longitud de onda***

Determina la interacción de la onda con objetos en la superficie, está relacionada con la dispersión especular que es cuando la señal se dispersa en dirección opuesta al satélite cuando la superficie es lisa, la rugosidad o aspereza de la superficie depende de la longitud de la onda una superficie se considera rugosa si su estructura superficial tiene dimensiones comparables a la longitud de la onda entonces la superficie aparecerá áspera, mientras más oscuro el pixel más lisa es la superficie en relación a la longitud de onda a medida que incrementa la rugosidad de la superficie incrementa la intensidad de la retro dispersión, en el caso de agua abierta a medida que incrementa la rugosidad de la superficie del agua más brillante será ese pixel. (NASA Video, 2019)

##### **2.7.5.2 *Orientación***

La cual influye la interacción de la señal que esta horizontalmente o verticalmente polarizada el doble rebote el cual es característico de vegetación inundada, ocurre cuando hay dos superficies que crean ángulos rectos en dirección el radar como por ejemplo la superficie del agua y un tronco y el resultado es que la señal rebota dos veces reflejando la mayor parte de la energía de vuelta al sensor y esta área aparece brillante, si la orientación de los troncos no es perpendicular a la superficie del agua entonces el doble rebote no ocurriría. (NASA Video, 2019)

##### **2.7.5.3 *Densidad***

Los componentes de la vegetación y la biomasa en el caso de la vegetación inundada, influirá la dispersión por doble rebote mientras más alta la biomasa o la densidad de los componentes de la vegetación entonces menos será la penetración, a través del follaje esto también en función de la longitud de onda las brechas en el follaje incrementan la posibilidad de la señal penetre hasta llegar al agua. (NASA Video, 2019)

**Figura 11:** Características de la superficie relacionados a estructura



Nota: NASAARSET

## 2.7.6 La relación entre la longitud de onda y la señal de radar

### 2.7.6.1 Longitud de onda

En general cuando más larga la longitud de onda mayor la capacidad de la señal de radar en penetrar a través de la vegetación hasta llegar a la superficie o el suelo la tabla a la derecha contiene un listado de las bandas más comunes usadas en radar y su rango de longitud de onda, los sensores de radar que operan en banda X generalmente operan con una longitud de onda de 3 centímetros en banda C con una longitud de alrededor de 5 centímetros y en la banda L con una longitud de onda de alrededor de 23 centímetros pueden observar que este rango es bastante amplio, varios estudios han concluido que la banda L es la mejor para detectar inundaciones debajo de la vegetación y debería de ser la longitud de onda accesible desde satélites de preferencia para este propósito, sin embargo la capacidad de la banda L y de otras banda en penetrar algunas áreas forestadas puede ser reducida o inexistente dependiendo de la brechas en el follaje o especialmente si la vegetación es densa.

La capacidad de las longitudes de onda más cortas como la banda C o la banda X en penetrar la vegetación aunque la penetración de la banda se es limitada en comparación con la banda L, hay estudios que han demostrado un aumento en la retro dispersión de la señal en vegetación inundada especialmente durante condiciones cuando la vegetación ha perdido sus hojas, la banda es especialmente útil si la densidad de la vegetación es baja y funciona particularmente bien en regiones agrícolas, la banda X en general para identificar vegetación inundada con caso donde la vegetación es escasa o cuando la vegetación ha perdido sus hojas, otros estudios han demostrado la capacidad de la banda X en mapear vegetación inundada en humedales.(Podest, 2018).

**Tabla 2: Longitudes de onda de las diferentes bandas**

Banda	Frecuencia $f_0$	Long de onda $\lambda = \frac{c}{f_0}$	Aplicación típica
Ka	27–40 GHz	1.1–0.8 cm	Raramente se usa para SAR (vigilancia en aeropuertos)
K	18–27 GHz	1.7–1.1 cm	Raramente se usa para SAR (absorción de H <sub>2</sub> O)
Ku	12–18 GHz	2.4–1.7 cm	Raramente se usa para SAR (altimetría satelital)
X	8–12 GHz	3.8–2.4 cm	Resolución alta de SAR (monitoreo urbano; hielo y nieve; poca penetración en la cobertura vegetal; decadencia de coherencia rápida en áreas con vegetación)
C	4–8 GHz	7.5–3.8 cm	Caballo de batalla de SAR (mapeo global; detección de cambio; monitoreo de áreas con cobertura de vegetación de baja a moderada; penetración mejorada; mayor coherencia)
S	2–4 GHz	15–7.5 cm	Poco pero creciente uso en Obs. Terrestres basadas en SAR monitoreo de agricultura (NISAR tendrá Banda-S; expande aplicaciones de la banda-C para áreas con mayor densidad de vegetación)
L	1–2 GHz	30–15 cm	Resolución media de SAR (Monitoreo geofísico; mapeo de biomasa y vegetación; alta penetración; InSAR)
P	0.3–1 GHz	100–30 cm	Estimación de biomasa. Mapeo y evaluación de vegetación. SAR experimental.

Nota: Geophysical Institute, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks

### 2.7.6.2 Polarización

La cual se refiere al plano proporción del campo eléctrico de la señal que pueden estar en el plano horizontal en el plano vertical independientemente de la longitud de onda las señales de radar se pueden transmitir o recibir en diferentes modos. La polarización puede haber cuatro combinaciones de polarización es de transmisión y recepción que son

Las polarizaciones normalmente se controlan entre H y V:

HH: Transmitida Horizontalmente, Recibida Horizontalmente ·

HV: Transmitida Horizontalmente, Recibida Verticalmente

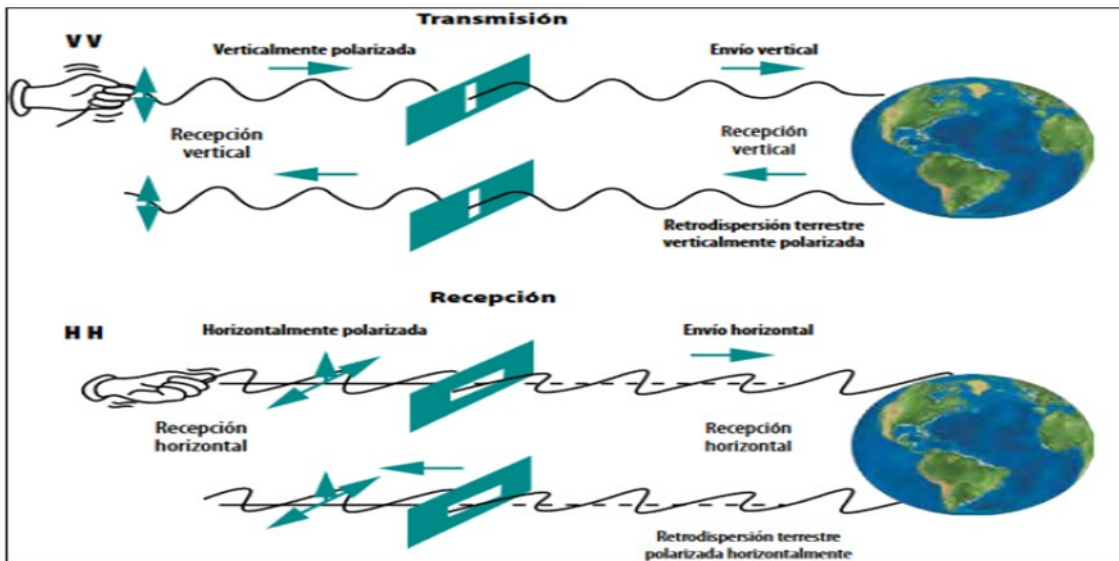
VH: Transmitida Verticalmente, Recibida Horizontalmente

VV: Transmitida Verticalmente, Recibida Verticalmente

La señal HH tiende a penetrar más profundamente a través de la vegetación ya que sufre menos atenuación que VV.

La señal HV es más sensible a la dispersión por volumen y es un buen indicador de la presencia de vegetación. (Podest, 2018)

**Figura 12: Imagen Polarización**



Nota: INEGI

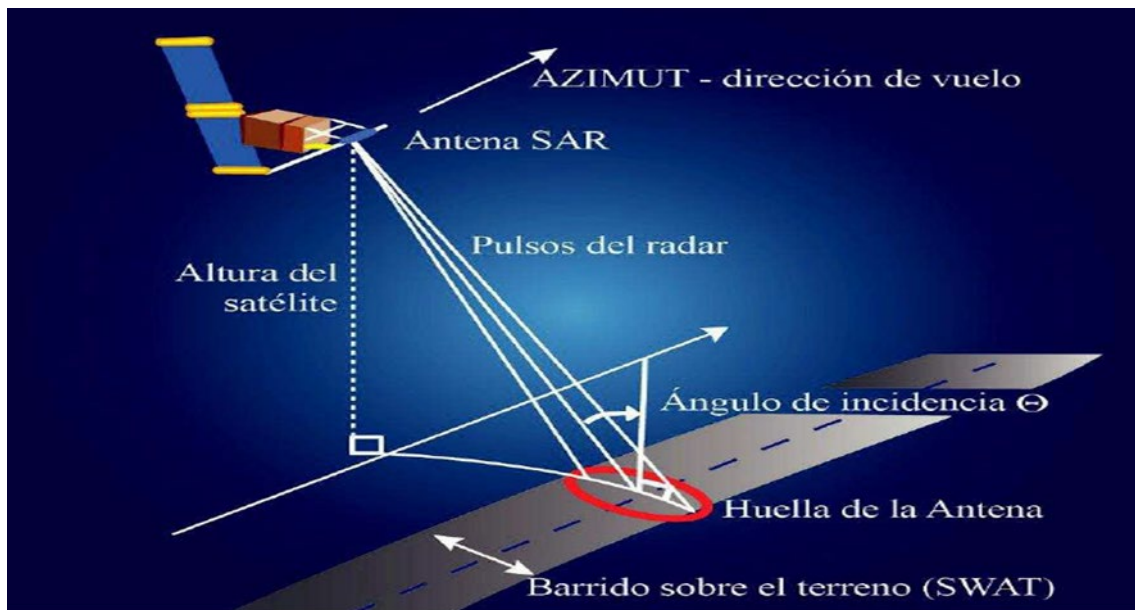
### 2.7.6.3 Factores involucrados en la captación de datos de radar

Los factores que contribuyen a determinar las propiedades de la señal captada, y que afectan los datos contenidos en una imagen, pueden ser inherentes al sensor o propiedades de los objetivos. Los factores inherentes al sensor incluyen la longitud de onda de la radiación incidente, la fuerza y polarización de la señal, los ángulos de incidencia y de depresión local, la huella o anchura del barrido, la distancia y orientación del objetivo en tierra hacia el radar, y la resolución.

Por otro lado, las propiedades inherentes de los objetivos incluyen la rugosidad del terreno, los factores dieléctricos indicadores de humedad, la rugosidad de los materiales, y el tamaño absoluto y relativo del objetivo respecto de la sección transversal del radar ( $\sigma$ ). Este último factor representa el coeficiente de retrodispersión o decaimiento de la señal propia de un objetivo.

Desde los inicios del uso de la tecnología de radar, sobre todo en aplicaciones militares, el coeficiente de retrodispersión ha sido la medida de cuán detectable es un objetivo mediante radar. Algunos de estos factores se explican a continuación (NASA ARSET, 2018).

**Figura 13: Ángulo de incidencia**



Nota: NASAARSET <https://appliedsciences.nasa.gov/arset>

El radar barre el terreno con pulsos de energía colectando datos con una visión lateral, no directamente vertical como ocurre con las cámaras aéreas o con satélites que apuntan su visión al nadir. Algunos sensores pueden orientar su visión a la derecha o a la izquierda de la dirección de vuelo. Se consideran los retardos entre la recepción de fracciones del pulso de la señal más alejadas de la antena y de las más próximas, y mediante procesos de cálculo se convierten en distancias.

De esta manera la distancia para cada localidad dentro del área de barrido se usa para la representación del blanco en una imagen; aquí interviene la geometría de adquisición de datos o geometría de visualización. (NASA ARSET, 2018).

Un factor relevante en la geometría de visualización es el ángulo de incidencia entre la línea inclinada de visión del radar y una vertical característica de la escena terrestre. En la selección de productos para aplicaciones este dato es importante porque es una medida de la orientación relativa del objetivo en tierra.

El ángulo de incidencia nominal cambia en la dirección del alcance dependiendo de la altura del radar, por lo que la geometría de visualización en una misma imagen es diferente de punto a punto. El ángulo de incidencia local toma en cuenta la inclinación local de la superficie iluminada e influye en la brillantez de la imagen. (NASA ARSET, 2018).

La resolución espacial se refiere a dos dimensiones, una en la dirección del alcance y la otra en la del azimut. La resolución en la dirección del alcance se determina por las características de la señal a lo largo de la trayectoria entre el sensor y la superficie iluminada.

En la dirección del alcance la resolución depende de la dimensión del pulso transmitido (un pulso corto proporciona mejor resolución) y del ancho de banda del sistema en el canal del alcance. En un radar convencional, la resolución en la dirección del azimut se determina por el ancho angular del rayo, pero como el SAR sintetiza una antena virtual más grande se tiene una resolución en la dirección del azimut que depende del largo de dicha antena sintética y es inversamente proporcional al tamaño de la antena real. Con esta técnica los SAR logran una resolución espacial fina en la dirección del vuelo. (Lee & Pottier, 2009).

La resolución radiométrica se refiere a la habilidad de un sistema de diferenciar dos rasgos de la imagen correspondientes a dos pequeños objetos cercanos que se encuentran en la escena iluminada, cuando la brillantez de los dos objetos es comparable y cae dentro del intervalo dinámico del radar que se trate. El moteado es inherente a las imágenes SAR y tiene que ver con la intensidad de la brillantez de los píxeles. Aunque puede proporcionar información, generalmente se le considera como ruido porque degrada la calidad de la imagen y afecta la interpretación. Se han desarrollado distintos métodos para eliminarlo basados en modelos matemáticos del fenómeno, como el procesamiento de observaciones múltiples,<sup>13</sup> que promedian el moteado tomando varias observaciones de un objetivo en una sola barrida del radar (Lee & Pottier, 2009).

Las estadísticas de primer y segundo orden de la brillantez (tonos de gris) de una imagen caracterizan el tono y la textura respectivamente y son perceptibles visualmente en las imágenes. El tono se refiere a la brillantez relativa de objetos mientras que el contraste es la diferencia entre el tono de dos regiones vecinas. La textura de una región o escena es la variación espacial de la reflectividad promedio; proporciona información sobre la distribución de tonos de gris en los píxeles y se la usa para describir si el contenido de la imagen se visualiza como fino o grueso, homogéneo o no homogéneo. (Lee & Pottier, 2009).

Se ha aplicado con éxito la textura para clasificar vegetación (Yamagata, 1993). Los autores Aggarwal y Agrawal (2012) resumen el uso de estas dos estadísticas en la clasificación de imágenes, mismas que se ensayaron desde hace tiempo (Haralick et al., 1973).

#### **2.7.6.4 Humedad del suelo y su relación con el agua subterránea**

Retrodispersión Alta (Brillante en la imagen SAR, especialmente en VV)

Indica suelos húmedos o saturados, lo que podría sugerir niveles freáticos altos o recarga de acuíferos después de lluvias intensas.

Común en zonas de riego, áreas agrícolas y humedales.

Suelos con alta conductividad eléctrica (arcillosos) pueden reflejar más energía del radar.

Retrodispersión Baja (Oscuro en la imagen SAR)

Suelos secos reflejan menos señal debido a la menor cantidad de agua presente.

Puede indicar descenso del nivel freático, especialmente en estaciones secas o en zonas de sobreexplotación de acuíferos.

Áreas arenosas o con vegetación escasa también pueden mostrar menor retrodispersión.

## **2.8 Satélite SENTINEL**

La Agencia Espacial Europea – ESA, está desarrollando una nueva familia de misiones llamadas Sentinel específicamente para las necesidades operativas del programa Copernicus.

Cada misión de Sentinel se basa en una constelación de dos satélites para cumplir con los requisitos de revisión y cobertura, proporcionando conjuntos de datos robustos para los servicios de Copernicus.

Estas misiones cuentan con una gama de tecnologías, como el radar y los instrumentos de imágenes multiespectrales para el monitoreo de la tierra, el océano y la atmósfera. Fechas previstas para lanzamiento y periodo en operación de los satélites de las misiones Sentinel. (Fonseca, 2020)

### **2.8.1 Sentinel -1A (GRD)**

La misión SENTINEL-1, que proporciona imágenes de radar diurnas y nocturnas para todo clima para servicios terrestres y marítimos. Consta de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B, que fueron lanzados el 3 de abril de 2014 y el 25 de abril de 2016, respectivamente. Es una constelación de dos satélites polares que maniobran día y noche para generar imágenes SAR de banda C, que operan en cuatro modos de imágenes únicos con diferentes resoluciones (hasta 5 m) y cobertura (hasta 400 km), lo que les permite capturar imágenes en todas las condiciones climáticas. (Fonseca, 2020)

### **2.8.2 Sentinel 1-C-Band SAR**

El satélite Sentinel-1 formó parte de la primera misión espacial Copérnico, lanzada por Agencia Espacial Europea ESA en el 2014. Es un satélite Radar de Apertura Sintética (SAR) que permite obtener imágenes independientemente de las condiciones climáticas. (Fonseca, 2020)

Es una misión de generación de imágenes de radar de día y de noche en órbita polar, el principal objetivo de monitoreo de tierra y océano. La misión es proporcionar la continuidad de datos SAR de banda C luego del retiro de ERS-2 y el final de la misión Envisat.

Para lograr esto, los satélites llevan un sensor C-Band SAR, que ofrece imágenes de resolución media y alta en todas las condiciones climáticas. El C-Band SAR es capaz de obtener imágenes nocturnas y detectar pequeños movimientos en el suelo, lo que lo hace útil para el monitoreo de la tierra y el mar. (Fonseca, 2020)

La misión Sentinel-1 proporciona datos de un instrumento de radar de apertura sintética (SAR) de banda C de doble polarización a 5,405 GHz (banda C). Esta colección incluye las escenas de rango de terreno detectado (GRD) S1, procesadas con Sentinel-1 Toolbox para generar un producto calibrado y ortorectificado. La colección se actualiza diariamente. Los nuevos activos se incorporan dentro de los dos días posteriores a su disponibilidad. (Fonseca, 2020)

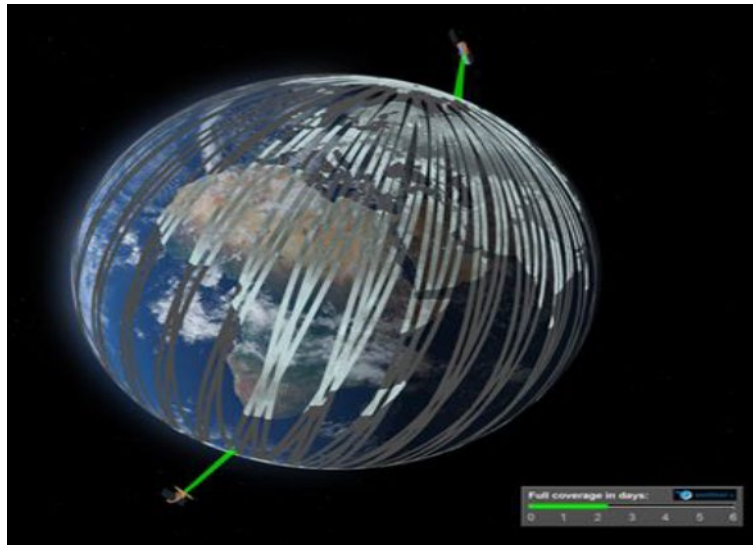
Esta colección contiene todas las escenas de GRD. Cada escena tiene tres resoluciones (10, 25 o 40 metros), cuatro combinaciones de bandas (correspondientes a la polarización de la escena) y tres modos de instrumento. El uso de la colección en un contexto de mosaico probablemente requerirá filtrar hasta un conjunto homogéneo de bandas y parámetros. Consulte este artículo para obtener detalles sobre el uso y el preprocesamiento de la colección (European Space Agency [ESA], 2018).

Cada escena contiene una o dos de las cuatro bandas de polarización posibles, dependiendo de la configuración de polarización del instrumento. Las combinaciones posibles son:

- **VV**: Copolarización única, transmisión vertical/recepción vertical.
- **HH**: Copolarización única, transmisión horizontal/recepción horizontal.
- **VV + VH**: Polarización cruzada de doble banda, transmisión vertical/recepción horizontal.
- **HH + HV**: Polarización cruzada de doble banda, transmisión horizontal/recepción vertical (ESA, 2018).

Cada escena también incluye una banda de 'ángulo' adicional que contiene el ángulo de incidencia aproximado desde el elipsoide en grados en cada punto. Esta banda se genera interpolando la propiedad 'incidenceAngle' del campo cuadrado 'geolocationGridPoint' proporcionado con cada activo. (ESA, 2018).

**Figura 14:** Trayectoria del satélite Sentinel 1



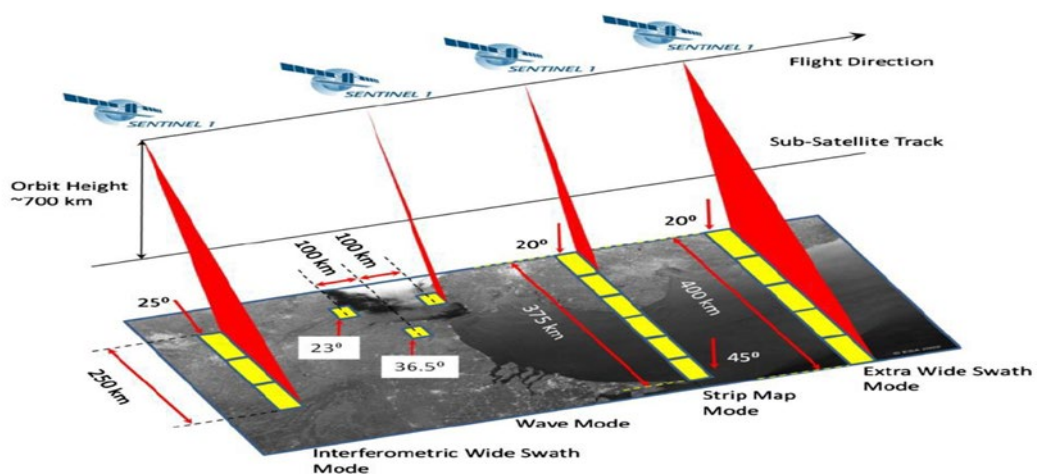
Nota: <https://developers.google.com/earth-engine/guides/sentinel1>

### 2.8.3 Modos de operación del sensor

Existen cuatro modos de operación del sensor SAR del Sentinel-1

- ✓ Stripmap (SM)
- ✓ Interferometric Wide Swath (IW)
- ✓ Extra-Wide swath (EW)
- ✓ Wave (WV)

**Figura 15:** Modos de adquisición del sensor SAR del Sentinel-1



Nota: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

#### 2.8.4 Stripmap (SM)

El modo de adquisición Stripmap adquiere datos con una extensión de 80 km a una resolución espacial de 5 metros. Consta de seis adquisiciones solapadas, cada una a diferentes ángulos de incidencia, que cubren una extensión de 375 km en el eje range. Las imágenes SM mantienen la calidad de imagen a lo largo del along-track y poseen un ángulo de incidencia prácticamente constante. Se trata del modo de operación de mayor resolución del sensor.

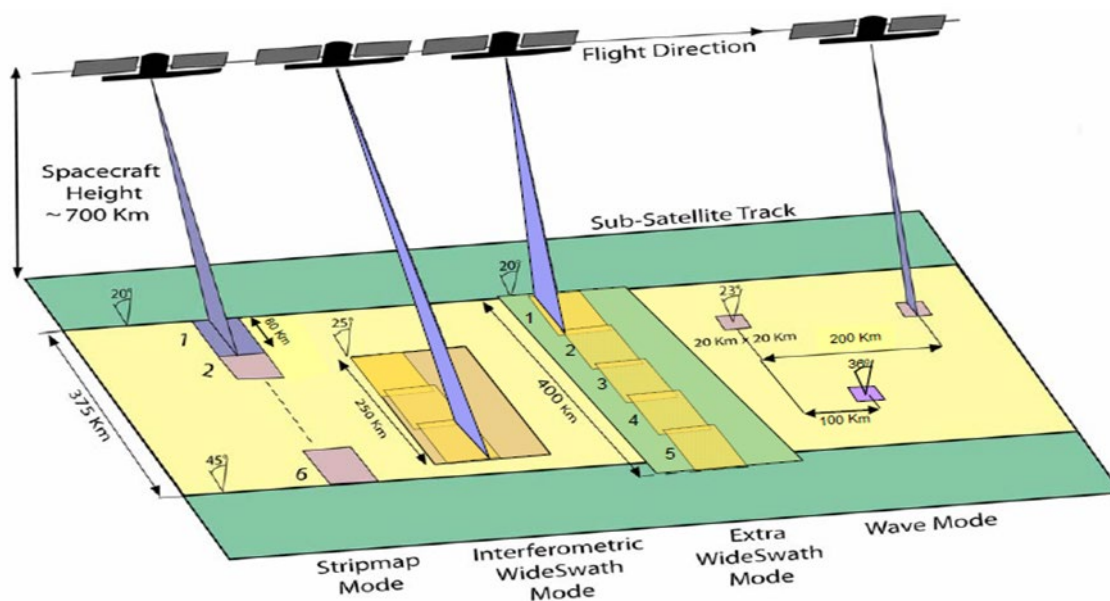
#### 2.8.5 Interferometric Wide Swath (IW)

El modo de adquisición Interferometric Wide Swath (IW) es el modo de operación principal y el utilizado por defecto sobre tierra, ya que cumple con la mayor parte de los requisitos para los servicios anteriormente mencionados. Adquiere datos cubriendo extensiones de 250 km a una resolución espacial de 5 por 20 metros (range por azimuth). Realiza la captura de tres sub-extensiones (sub-swaths) usando la técnica Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR). *Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Visión de radar. ESA.*

Con esta técnica, además de direccionar el haz en el eje range como en la técnica ScanSAR, el haz es electrónicamente dirigido de atrás hacia adelante en la dirección de azimuth para cada ráfaga (burst) evitando ondulaciones (scaloping) y dando como resultado una imagen de calidad homogénea a lo largo de toda la extensión. La técnica TOPSAR está pensada para reemplazar el modo ScanSAR convencional, alcanzando la misma cobertura y resolución que ScanSAR, pero con una casi uniforme relación señal a ruido (Signal to Noise Ratio, SNR). *Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Visión de radar. ESA.*

La superficie captada por ráfagas adyacentes está solapada lo suficiente como para disponer de una cobertura continua de la superficie. Las imágenes de todas las ráfagas en todas las sub-extensiones, son remuestreadas a una rejilla de tamaño de pixel común en range y azimuth. *Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Visión de radar. ESA.*

**Figura 16: Modos de adquisición del sensor SAR**



Nota: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinels/technical-guides/sentinel-1-sar/sar-instrument/acquisition-modes>

### 2.8.6 Extra Wide Swath (EW)

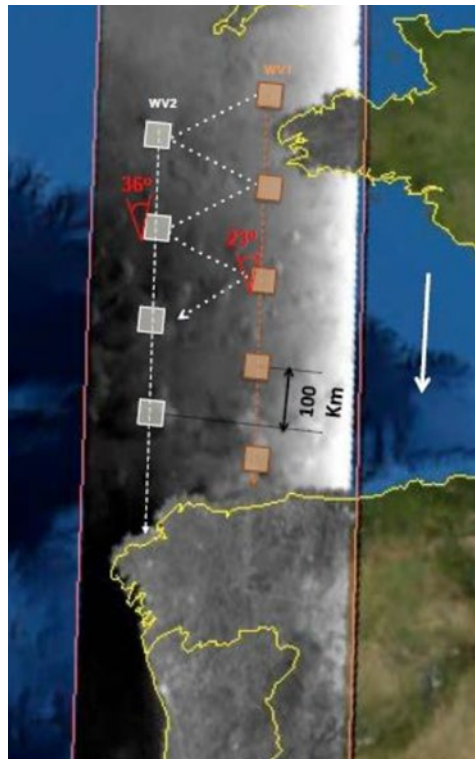
Similar al modo de adquisición IW. También emplea la técnica TOPSAR para adquirir datos a través de un área mucho mayor usando cinco sub-extensiones. De este modo, EW adquiere datos sobre una superficie de 400 km a una resolución espacial de 20 por 40 metros (range por azimuth). En este proyecto no se emplean datos de este modo de adquisición. *Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Visión de radar. ESA.*

### 2.8.7 Wave (WV)

El modo Wave consiste en varias viñetas, con polarización exclusiva VV o HH, en la que cada viñeta es procesada como una imagen separada. Los productos WV pueden contener cualquier número de viñetas. Cada viñeta es almacenada dentro del producto como una imagen independiente. Las viñetas cubren una extensión de 20 por 20 km, a una resolución espacial de 5 metros, cada 100 km a lo largo de la órbita, tomando datos en dos ángulos de incidencia diferentes de forma alternada. Las viñetas en el mismo ángulo de incidencia están separadas por 200 km a lo largo del eje de azimuth. El ángulo de incidencia se conmuta entre el near range y el far range (23° y 36,5°). En la figura podemos observar detalladamente el procedimiento de adquisición WV. Este modo en la polarización VV es el que se utiliza por defecto sobre los océanos. Los datos tienen el mismo bitrate que el modo SM, sin embargo, debido al menor tamaño de las viñetas, a una única polarización, y a la captura en intervalos de 100 kilómetros, el volumen de datos es mucho menor. En este

proyecto no se emplean datos de este modo de adquisición. Agencia Espacial Europea. (2014, 1 de marzo). Visión de radar. ESA.

**Figura 17:** *Proceso de adquisición de datos en el modo WV*



Nota: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

## 2.9 Google Earth Engine (GEE)

Es una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. (European Space Agency, 2015).

Actualmente existe una enorme cantidad de información satelital obtenida a escala global, recopilada por diferentes sensores que pertenecen a diferentes proyectos o agencias. Sus datos son de diferente naturaleza como, por ejemplo, observaciones atmosféricas, elevación, así como respuestas de la cubierta de la Tierra en varias porciones del espectro electromagnético, registradas con varias resoluciones espaciales y temporales (Yang, John, Zhao, Lu y Knapp, 2016) produce, sustain, and serve satellite climate data records (CDRs). Recolectados durante varios años, o incluso décadas, conforman un vasto repositorio. Hoy, los datos recolectados por diferentes sensores, como Landsat (U.S Geological Survey, 2018), MODIS (MODIS Characterization Support Team, 2017) o Sentinel (European Space Agency, 2015), se distribuyen de forma gratuita.

Es así que los estudios basados en percepción remota se han visto limitados no por la falta de información, sino, al contrario, por la ausencia de capacidad para analizar todos

los datos disponibles (Ma, Wang, Liu y Ranjan, 2015; Yang, Huang, Li, Liu y Hu, 2017). Esto ha dado como resultado investigaciones a escalas locales o regionales o de baja resolución espacial o temporal (Gamba, Du, Juergens, & Maktav, 2011; Ma, Wang, Liu y Ranjan, 2015).

En ocasiones, los análisis para el monitoreo de los cambios de cubierta del suelo pueden demorar mucho, de modo que los resultados no son útiles para el apoyo a acciones de fiscalización y de respuesta rápida (Gorelick et al., 2017; Shimabukuro et al., 2011).

**Google Earth Engine** (GEE, <https://earthengine.google.com>) nació a finales del 2010 como una forma para eliminar esa limitante computacional y permitir a los usuarios realizar análisis complejos, involucrando grandes cantidades de datos y expandiendo la frontera de la ciencia en percepción remota.

Esta plataforma de análisis permite procesar información geoespacial en la nube sin necesidad de ocupar la memoria de la computadora del usuario. Al mismo tiempo, GEE está ligado directamente a varios programas satelitales que permiten integrar en las bases de datos las imágenes que acaban de ser tomadas. GEE es, por lo tanto, una solución innovadora para el manejo de los datos masivos ("Big Data"), que permite afrontar problemas globales, dando resultados velozmente. De esta manera, permite proponer y actuar en soluciones para dichos problemas de forma ágil. (Gorelick et al., 2017).

### 2.9.1 La plataforma

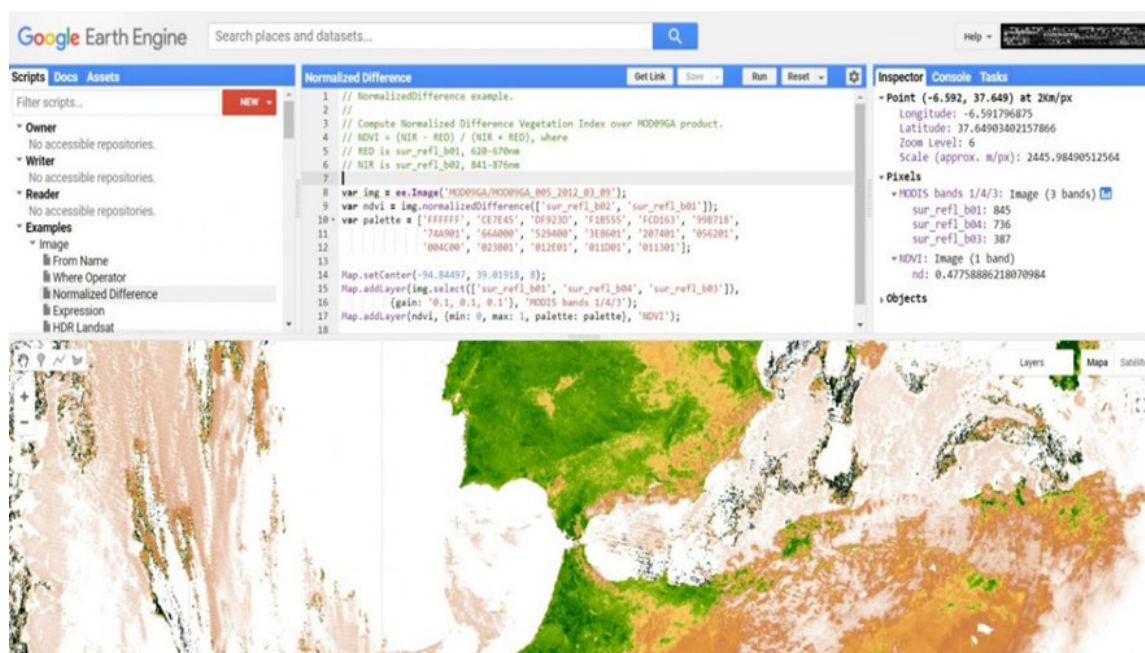
GEE está compuesto por cuatro elementos principales. El primero es la infraestructura de Google, la cual pone a disposición del usuario sus servidores, permitiendo así hacer análisis en paralelo con cerca de 10 000 CPUs. Esto agiliza la velocidad de procesamiento, en comparación con una computadora individual. Por ejemplo, el desarrollo del mapa global sin nubes a 15 m de resolución de Google Earth y Google Maps, usando estos servidores, tardó un par de días, mientras que, si se hubiera usado una computadora personal la demora habría sido de 14 años. (Moore, 2017).

El segundo elemento es el acervo de datos (datasets). Google tiene almacenado todas las imágenes de varios sensores (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros). Estas bases de datos se actualizan a medida que se toman nuevas imágenes (cerca de 6000 nuevas escenas diarias), creando así un enorme catálogo de datos geoespaciales. Estas bases se pueden consultar a través de diferentes criterios (calidad, localización, fechas) sin necesidad de descargar ni solicitar acceso a las imágenes (Gorelick et al., 2017). Igualmente, GEE permite usar información vectorial, pero a diferencia de las imágenes, los vectores no se encuentran organizados en un catálogo y su búsqueda puede resultar tediosa. (Google Developers, 2018).

El tercer elemento es la API (Application Program Interface), la cual consiste en una serie de comandos y funciones preestablecidas, escritos en lenguaje JAVA, que permite una programación sencilla al desarrollar algoritmos para las investigaciones. Sin embargo, dichas funciones no pueden modificarse ni tampoco se puede acceder a su código, lo cual impide al usuario realizar modificaciones para lograr análisis alternativos a los preestablecidos. De esta manera, se limita la flexibilidad de programación del usuario, siendo algo restrictivo ya que solo se permite usar las funciones del API. Cabe mencionar que existe también un API para el lenguaje Python, pero debe ser descargado. Esto limita el procesamiento ya que consume memoria de la computadora del usuario. Además, puede incurrir en cobros de uso y carece de documentos de apoyo y ayudas.

Finalmente, el cuarto elemento es el Code Editor, el cual es un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se juntan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo ("scripts"), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube.

**Figura 18: Entorno de trabajo code editor**



Nota: <https://doi.org/10.14350/rig.59929>

GEE no consume la memoria de la computadora del usuario, pero es necesario tener una buena conexión a internet para poder cargar el Code Editor, las visualizaciones y cualquier información que sea solicitada de los servidores. (Google Developers, 2018).

Adicionalmente, para descargar los resultados de la nube al computador del usuario se requerirá espacio disponible suficiente en su Google Drive (la versión gratuita de Google Drive permite hasta 15 gigabytes). En el caso que se pretenda usar GEE con fines lucrativos,

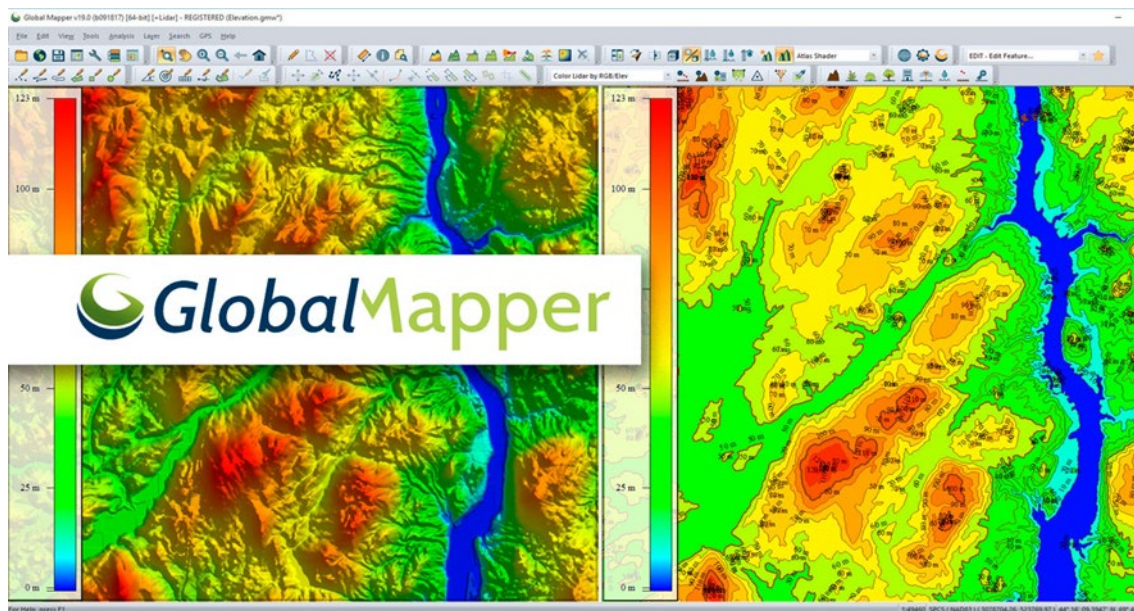
o que no estén enfocados en la educación y la investigación, se deberá pagar una licencia. (Google Developers, 2018).

En conclusión, por sus novedosas características de procesamiento en la nube, capacidad computacional en paralelo, su amplio catálogo de datos y su interfaz amigable con el usuario, GEE se muestra como una herramienta muy poderosa para afrontar los problemas de Big Data y ampliar los horizontes de la ciencia de datos y la percepción remota. Al mismo tiempo permite que cualquier usuario con conocimientos básicos de programación y acceso a internet pueda realizar investigaciones utilizando grandes cantidades de datos, lo que permite fomentar una comunidad científica y una investigación científica más equitativa y democrática en el mundo. (Kumar y Mutanga, 2018).

## 2.10 Global Mapper

Global Mapper es un software de procesamiento de datos SIG (Sistema de Información Geográfica) que incluye todo tipo de información cartográfica y de mapas. Es una aplicación SIG robusta y de bajo costo que combina una gama completa de herramientas de procesamiento de datos espaciales con acceso a una gran variedad de formatos de datos. Desarrollado para los profesionales de SIG y asiduos al mapeo, este versátil software también es adecuado como herramienta SIG de gestión de datos independiente o como complemento a una infraestructura SIG ya establecida. (Blue Marble Geographics, 2017).

*Figura 19: Entorno de trabajo de Global Mapper*



Nota: <https://www.online.capssoft.com.bo/cursos-disponibles/cursos-de-autocad/geomatica-con-global-mapper/>

### 2.10.1 Breve historia de Global Mapper

Los profesionales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) estuvieron observando más allá de los primeros intentos de animación y prestaron especial atención a los avances recientes en informática, en junio de 1997. Las computadoras, que fueron actualizadas y que presentaban capacidades gráficas avanzadas instaladas en cada uno de los escritorios, sirvieron como inspiración para la agencia con el propósito de emprender un proyecto orientado al desarrollo de una aplicación, sin costo alguno que permitiera visualizar su ampliada gama de datos. El líder en el desarrollo de este proyecto, que con el tiempo derivaría en un producto denominado dlgv32, fue un ingeniero de nombre Mike Childs, cuyo nombre llegaría a ser emblemático con asociación a Global Mapper durante las dos décadas subsecuentes.

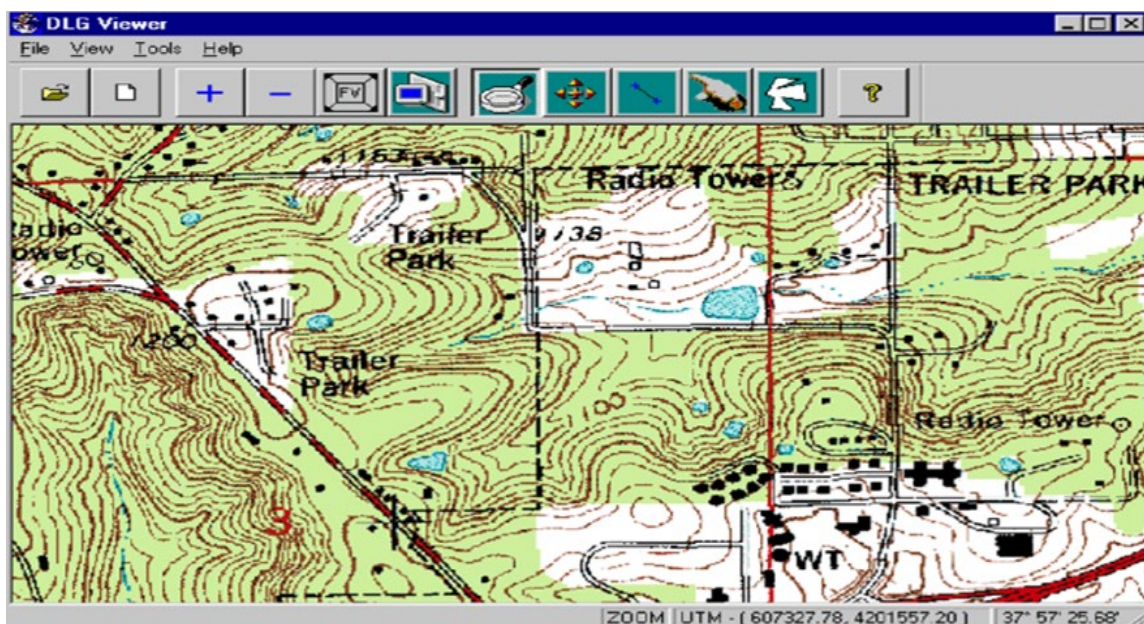
A pesar de que dlgv32 no es particularmente un nombre que se pronuncie con facilidad, posee una lógica característica de la década de los años noventa en cuanto a la designación de nomenclaturas.

Las versiones subsecuentes de dlgv32 incorporaron soporte para los últimos conjuntos de datos de terreno proporcionados por el USGS, incluyendo la opción de emplear un sombreador para indicar variaciones en la elevación. Dichas versiones también introdujeron un proceso de reproyección pionero y distintivo en ese momento, que consistía en aplicar los parámetros de proyección vigentes a todas las capas de datos durante su carga, una característica que los usuarios de la versión actual de Global Mapper siguen valorando. (Blue Marble Geographics, 2017)

Con estas mejoras y un soporte de formato ampliado, resultó evidente para el personal del USGS que dlgv32 estaba evolucionando más allá del propósito inicial de la entidad. Por ende, optaron por liberar el código fuente para su desarrollo comercial.

En septiembre de 2001, se presentó dlgv32 Pro a un precio accesible. Más trascendental aún, este evento le proporcionó a Global Mapper la oportunidad para atender de manera autónoma las demandas y requisitos del creciente grupo de usuarios, así como para desarrollar software basado en las contribuciones de los clientes, libre de supervisión burocrática. Técnicamente, este primer lanzamiento comercial corresponde a la versión 4.0, la cual inició una secuencia de numeración que permanece hasta nuestros días.

Figura 20: Interfaz del programa DGL



Nota: <https://www.bluemarblegeo.com/a-brief-history-of-global-mapper-part-1/>

Tras tan solo tres años de intenso desarrollo, Global Mapper había comenzado a captar una considerable atención en la comunidad de Sistemas de Información Geográfica (SIG), no solo dentro de los Estados Unidos, sino a nivel mundial. Este reconocimiento se logró a pesar de la ausencia de esfuerzos formales de marketing y de iniciativas proactivas en el desarrollo empresarial. La mayoría de los usuarios iniciales atribuyeron las recomendaciones de profesionales del área de las geociencias como la razón primordial de su descubrimiento del software.

Los usuarios pioneros fueron igualmente cruciales en influir la evolución progresiva de Global Mapper. A menudo, en respuesta a las peticiones de usuarios, Global Mapper implementaba una actualización del software y proporcionaba una versión única al solicitante, generalmente en cuestión de horas desde el primer contacto. Dicho arreglo resultaba mutuamente ventajoso: Mike podía así desarrollar funcionalidades que se centraban en las necesidades específicas de una industria concreta y contaba con la colaboración del solicitante para examinar la nueva función antes de su inclusión en la versión oficial de lanzamiento. Por su parte, el solicitante obtenía una versión de Global Mapper adaptada a sus requisitos particulares. Aunque Global Mapper ha evolucionado considerablemente desde aquel entonces y ahora sigue un procedimiento más estructurado de desarrollo y publicación, la filosofía de un desarrollo reactivo se sigue manteniendo hasta el presente.

### 2.10.2 Funcionalidades relevantes

Global Mapper es capaz de mostrar, convertir y el analizar prácticamente cualquier tipo de datos geoespaciales ya sea en 2D o 3D, de una nube remota o local, de datos ráster

o vectoriales, archivo plano o base de datos espaciales. El software convierte, edita, publica, imprime, crea mosaicos, particiones, y permite a los usuarios realizar análisis espaciales avanzados tales como índice de vegetación normalizado (NDVI), estudios de cuencas hidrográficas y análisis de terreno, cálculos de volumen y mucho más.

### **2.10.3 Variedad de archivos**

Es un software totalmente flexible. Permite trabajar con más de 200 formatos de archivos (ráster, de vectores, de elevación...) y de manera simultánea en un entorno de trabajo.

### **2.10.4 Geo-referenciación y orto-rectificación de imágenes**

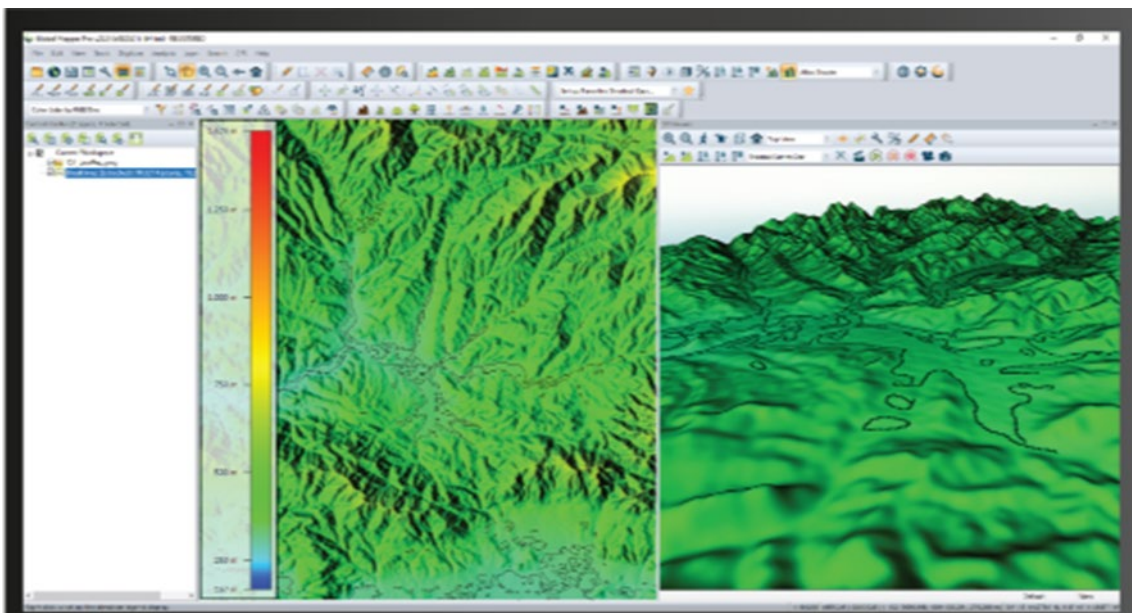
Más rápida y precisa usando puntos de control existentes o asignándole coordenadas a los píxeles seleccionados.

### **2.10.5 Nuevas características significativas**

- ✓ Coincidencia de histogramas para hacer coincidir el color de una capa de imagen con el de otra capa de imagen cargada.
- ✓ El visor 3D ahora admite funciones vectoriales de renderizado con transparencia combinada y agujeros en áreas.
- ✓ Se ha añadido la capacidad de representar puntos 3D dentro del corredor de Path Profile.
- ✓ Combinación de imágenes de una sola banda en una capa ráster multibanda.
- ✓ Incluye flechas y líneas en Diseños de mapa con un nuevo tipo de elemento de flecha.
- ✓ Nuevos modos de ajuste de contraste, 'Histogram Equalization' y 'Lineal (estiramiento personalizado)' para mejorar la normalización de la imagen ráster

Se añadió compatibilidad para cargar nuevos formatos de archivo, incluidos los archivos SAR TIFF que utilizan valores complejos de fase/amplitud y archivos de modelo ASCII 12D.

**Figura 21:** Interfaz del programa Global Mapper



Nota: <https://www.blumarblegeo.com/a-brief-history-of-global-mapper-part-1/>

## **CAPÍTULO III. MARCO CONTEXTUAL**

### **3.1 Macrolocalización**

La macro localización del presente proyecto tiene como finalidad, describir la ubicación del proyecto, determinando los indicadores socioeconómicos y características físicas más relevantes. En tal sentido, el proyecto está ubicado en Sudamérica, en Bolivia, en el departamento de Chuquisaca.

Ubicación administrativa

País: Estado Plurinacional de Bolivia

Departamento: Chuquisaca

Provincia: Oropeza

Municipio: Sucre

Ubicación Geográfica

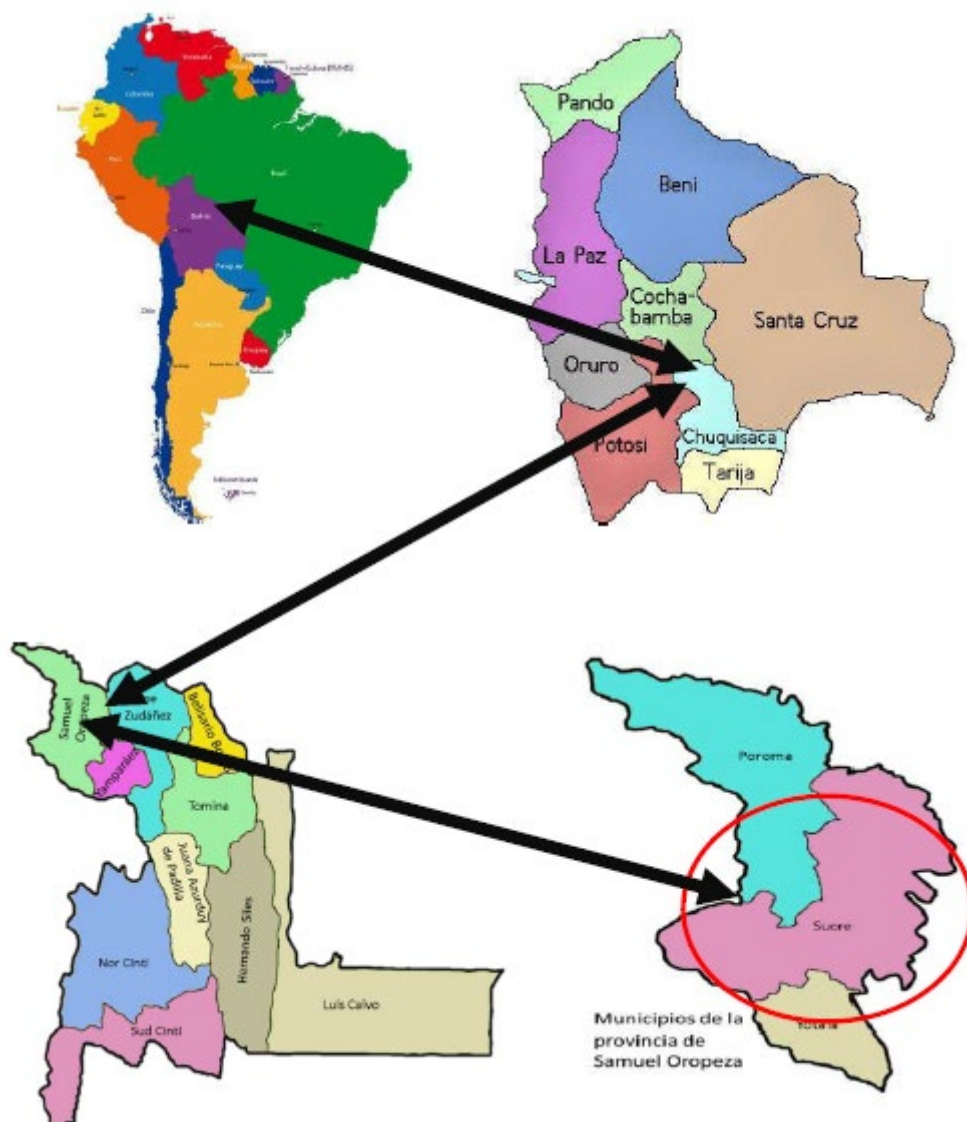
Latitud: 19°35'9.78" Sur

Longitud: 65°45'9.936" Oeste

Zona geográfica: 20 sur

Sistema de referencia WGS -84

**Figura 22: Localización geográfica**



Nota: Elaboración propia, mapa página web - Bing images

### 3.2 Microlocalización

La micro localización es la descripción de un sitio específico dentro del área geográfica donde se establecerá el área de estudio del proyecto para realizar el análisis de las características propias del entorno.

Sucre es la capital constitucional de Bolivia y la capital del departamento de Chuquisaca. Se encuentra al sur del país. La ciudad fue fundada sobre los asentamientos indígenas de los indios charcas el 29 de septiembre de 1538, por el general español Pedro Anzures, con el nombre de Villa de La Plata de la Nueva Toledo, lo que la convierte en la ciudad más antigua de Bolivia. En 1776, se cambió el nombre a Ciudad de Chuquisaca. Al noroeste, limita con el municipio Poroma, al noreste con el departamento de Cochabamba, al

este con la provincia Zudáñez, al sur con el municipio Yotala y al oeste limita con el departamento de Potosí. Su clima es cálido y seco, con una precipitación de 700 mm. Ubicada en los valles interandinos, la topografía del Municipio es montañosa y sus ríos son tributarios de la cuenca del Plata. Los suelos presentan una erosión grave y una desertificación alta. El 86% de los habitantes de este Municipio está concentrado en la ciudad de Sucre. El 14% restante constituye una población rural dispersa de origen quechua. En efecto la población es bilingüe castellano-quechua y un alto porcentaje de la población rural es monolingüe quechua (EDUCA, 2015).

### **3.3 Características Generales**

#### **3.3.1 Geografía**

Ubicada geográficamente a una altitud de 2799.5 metros sobre el nivel del mar, Sucre ocupa el lugar de una cabecera de valle, caracterizada por su clima cálido y seco. Se encuentra emplazada en la provincia de Oropeza, perteneciente al departamento de Chuquisaca, situada al pie de las montañas Sica Sica y Churuquilla, las cuales forman parte de la cordillera oriental de los Andes.

#### **3.3.2 Descripción del Terreno**

El paisaje del territorio Chuquisaqueño se puede clasificar en distintas zonas geográficas como las montañas, los valles intramontanos, las serranías del sector subandino y las planicies del chaco.

La provincia de Oropeza, perteneciente al departamento de Chuquisaca en la República de Bolivia, cuenta con una extensión de 3.943 kilómetros cuadrados. Está limitada al norte, este y oeste por el departamento de Potosí, al este por la provincia de Zudáñez, al nordeste por el departamento de Cochabamba y al sureste por la provincia de Yamparáez. Dentro de la provincia de Oropeza, se encuentran los municipios de Sucre, que es la capital, Yotala y Poroma.

#### **3.3.3 Demografía**

Según las proyecciones realizadas en 2017, Sucre es la quinta ciudad más poblada de las capitales de Bolivia, albergando a 284.536 residentes, de los cuales el 51,5% son mujeres y el 48,5% hombres, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística. Esta ciudad, que ha sido testigo de numerosas batallas por la independencia del Alto Perú, cumplió 479 años desde su fundación.

Según el censo de 1831, realizado durante el gobierno de Andrés de Santa Cruz, Chuquisaca contaba con 112.590 habitantes. Se proyecta que para 2020, esta cifra

aumentará a 637.013 habitantes en el departamento, mientras que en el municipio de Sucre la población ascenderá a aproximadamente 295.476 habitantes.

En Sucre, la ciudad más poblada de Chuquisaca, se habla principalmente el castellano y el quechua. De las 235.483 personas registradas mayores a cuatro años, excluyendo a aquellas que no hablan o no especificaron idioma, el 67,5% aprendió a hablar en castellano y el 31,5% en quechua, de acuerdo a los datos del censo 2012.

En relación a las actividades económicas que desempeña la población mayor a 10 años, el 29,3% trabaja en comercio, transporte y almacenes; el 13,7% en construcción; el 10,7% en la industria manufacturera; y el 7,9% en actividades agrícolas, ganaderas, de caza, pesca y silvicultura.

En términos de servicios básicos, en el municipio de Sucre el 78,9% de la población tiene acceso a saneamiento básico, el 93,6% a electricidad y el 91,4% a agua potable (INE, 2017).

#### **3.3.4 Idioma**

El idioma oficial es el español, también conocido como castellano, hablado en una de las variantes más neutrales de América Latina, sin dificultades de comprensión para los hablantes del idioma. El único idioma nativo presente en la ciudad es el quechua, utilizado únicamente por un pequeño porcentaje de la población.

#### **3.3.5 Religión**

La religión predominante en la ciudad es el catolicismo, que ejercía como religión oficial hasta el cambio de constitución en 2009, en el cual se estableció la libertad de culto.

#### **3.3.6 Clima**

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI en la ciudad de Sucre tiene presencia estable, sus oficinas están ubicadas en la Facultad de Tecnología, bajo un convenio interinstitucional con la carrera de Ing. Civil desde 1995. Dispone de dos estaciones, la primera y más antigua, está en el aeropuerto "Juana Azurduy de Padilla" provee datos en forma ininterrumpida desde 1975. La segunda se ubica en el Campus Universitario de la "Ex Refinería" Provee datos vía satélite en tiempo real. Esta última se encuentra en el área de estudio y es una estación meteorológica de primer orden, es decir que genera datos de evaporación, precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, presión barométrica, radiación solar, insolación, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura del suelo.

Según el SENAMHI, la condición climática de Sucre es árida en los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre. Semiárida en octubre y noviembre y sub-húmeda los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. En general la condición climática de Sucre es semiárida.

La humedad es deficiente (índice de humedad varía de 0.4 a 0.8). (SENAMHI, 2011).

### **3.3.7 Temperatura**

La media anual de la temperatura es de 15.8°C, con la temperatura promedio más alta anual de 22.2°C y la temperatura promedio más baja anual de 9.4°C. (SENAMHI, 2011)

### **3.3.8 Precipitación Pluvial**

Los meses con la mayor precipitación anual son diciembre, enero, febrero y marzo, acumulando 69.89% de las lluvias totales. Los meses con menos lluvia son mayo, junio, julio y agosto, con un 2.3%. La precipitación media anual registrada en la estación de SENAMHI en Sucre es de 626.1 [mm], durante el periodo de 1994 a 2011. 2.6.3 Evapotranspiración: Se dispone de datos de evapotranspiración potencial desde la estación en el aeropuerto, que está aproximadamente a 5 Kilómetros y 64 metros más alta que la estación en la oficina de SENAMHI Sucre, proporcionando una media anual de 104 [mm], respaldada por 34 años de registros completos. La evapotranspiración total media anual en las oficinas de SENAMHI en Sucre fue de 114 [mm] entre 2000 y 2009. 2.7. Servicios básicos.

## **3.4 Sistema de abastecimiento de agua potable**

Actualmente, se evidencia un déficit en torno a la oferta frente a la demanda, que se intensifica año tras año. No obstante, en 2001, solo el 86.01% de la población tenía acceso a agua por red. (INE, 2001). Hasta la fecha, este porcentaje ha subido al 93.82% (Chumacero, 2009), 6.01% obtienen agua de fuentes públicas, 2.57% a través de carros repartidores, 0.33% desde pozos o norias con bomba, 1.29% desde pozos o norias sin bomba, 1.29% ríos, manantiales, acequias, 0.12% lagos, lagunas, curiches, y 2.37% mediante otros medios (INE, tabla No. 3.03.02.05). Se debe considerar que pese a tener conexión a la red de agua, en ciertas áreas la dotación no es continua y solo cuentan con agua 2 a 3 veces por semana. (La falta de agua persistirá en las partes altas de Sucre. Correo de Sur, 19/ago/2010. [www.correodelsur.com](http://www.correodelsur.com)).

Sin embargo, la empresa suministradora de agua ha mitigado parcialmente este problema con la construcción de tanques de almacenamiento en las zonas elevadas de la ciudad. (Se exigen medidas ante la escasez de agua. Correo de Sur, 23/jul./2011. Disponible en: [www.correodelsur.com](http://www.correodelsur.com)).

### 3.4.1 Marco Hidrogeológico Regional

Geología: Sucre se ubica sobre material sedimentario ordovícico, al oeste con conglomerado de grava, arena, limo, limo arcilloso. Al este, se pueden observar fallas normales que forman discordancias con rocas del periodo jurásico y cretácico inferior sedimentario. (SERGEOMIN, Y.P.F.B. 2001) y (IGM, 2007).

### 3.4.2 Geomorfología

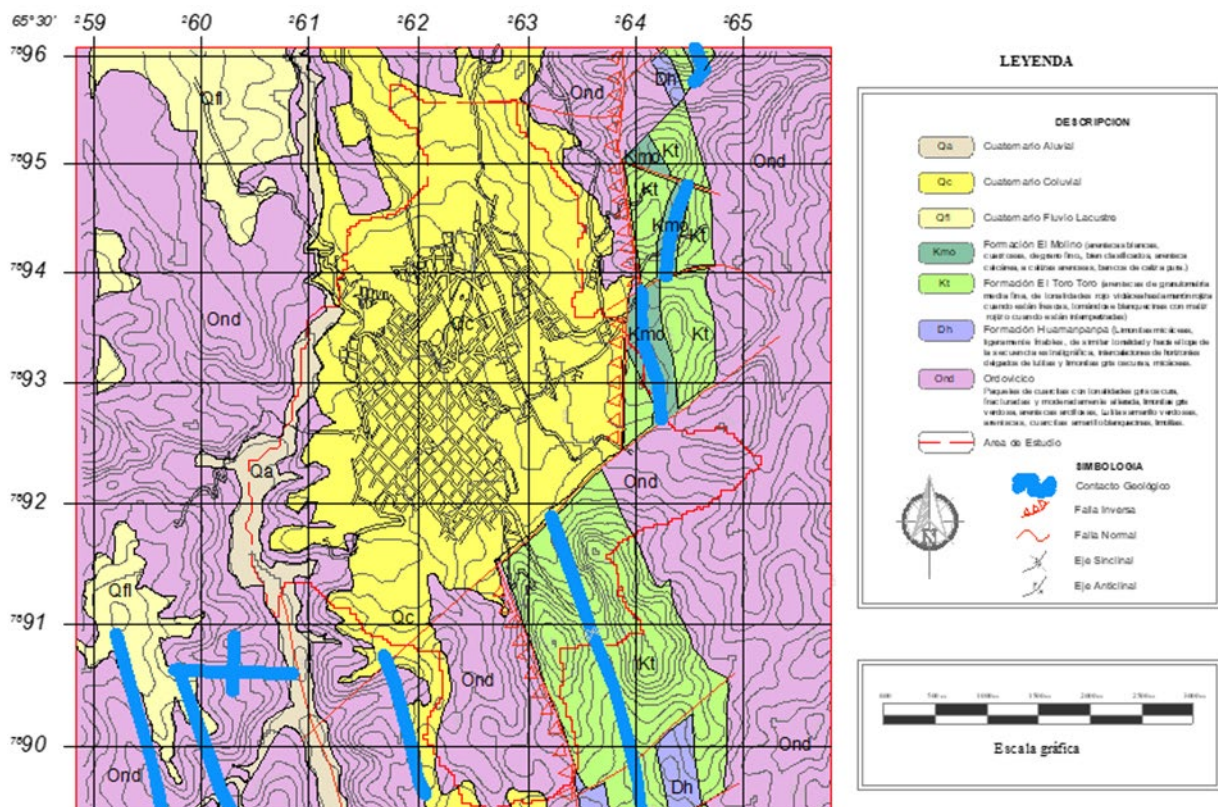
La Faja Sub-andina comprende un complejo sistema de cerros largos y estrechos, separadas por extensos valles sinclinales. Sucre es parte de la Faja Sub-andina (SERGEOMIN, Y.P.F.B., 2000). Los procesos que moldean el paisaje del municipio de Sucre son el diastrofismo orogénico y la erosión hídrica. (PMOT, 2009). “El sector Oeste y Central de Sucre se compone de una serie de anticlinales y sinclinales con una dirección de SE a NO; mientras que en el Este existe un sinclinal y una falla inversa regional cortada por fallas normales orientadas de NE a SO. Las serranías son elevadas y sub-paralelas”. (PMOT, 2009). Sucre se asienta en parte sobre material cuaternario fluvio-lacustre, otra parte compuesta de material cuaternario aluvial o coluvial, y el substrato rocoso es de rocas Ordovícicas, Devónicas y Cretácicas. (PMOT, 2009). “En varios sitios de la zona de estudio se observan restos de antiguas terrazas aluviales conformadas por conglomerados bastante compactos y estables, con rodados y tamaños heterogéneos, bien pulidos y redondeados, que probablemente fueron depositados en el transcurso de la formación del Río Quirpinchaca”. (PMOT, 2009).

“Por la existencia de una falla longitudinal importante en el área, el paisaje se halla fuertemente controlado, tanto por el plegamiento como por las indicadas fallas, estructurando un paisaje que alterna entre valles y serranías longitudinales, alineadas con el rumbo general de la estructura NO-SE, mostrando las mismas características en toda el área”. (PMOT, 2009).

Los perfiles longitudinales de los ríos, no están en equilibrio, existe erosión vertical intensa, como consecuencia de la elevada gradiente de los mismos, formando valles en V. El drenaje, también es reflejo del mismo control estructural, tratándose de un diseño de drenaje detrítico, paralelo a sub-paralelo, donde el río principal es subsecuente de dirección N-S y los ríos transversales subsecuentes y resecuentes son de menor longitud y gran cantidad. (PMOT, 2009).

“En el lecho del río Quirpinchaca se presenta depósitos aluviales de un espesor reducido que van desde 0.5 hasta más de 1 metro, a los lados del río se presentan terrazas aluviales de arcillas limosas supra-yacentes sobre las rocas del Ordovícico lutitas y areniscas de grano medio fino”. (PMOT, 2009).

**Figura 23: Mapa geológico del área de Estudio, 2009.**

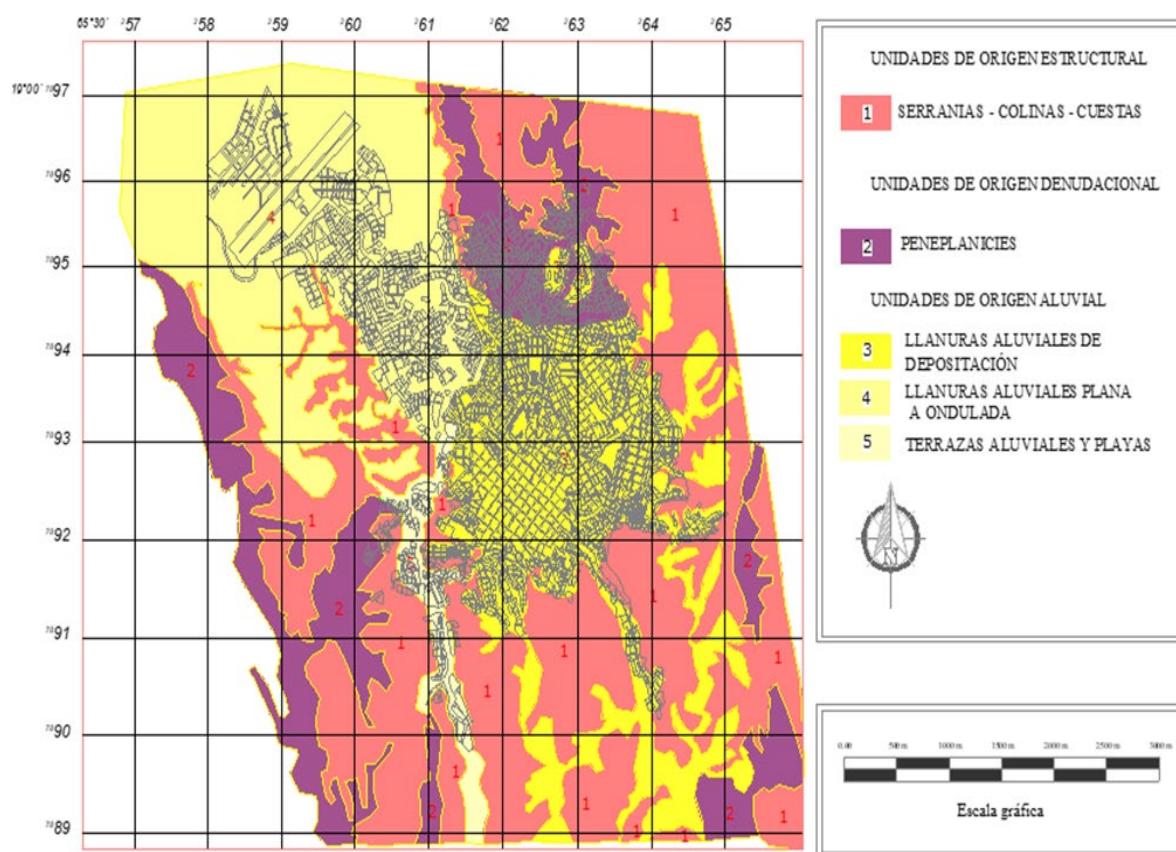


Nota: (PMOT, 2009)

En el radio urbano de la ciudad de Sucre se distinguen las siguientes unidades geomorfológicas

1. Serranías colinas y cuevas
2. Peneplanicies
3. Llanuras aluviales de deposición
4. Llanuras aluviales plana a ondulada
5. Terrazas aluviales y playas.

**Figura 24:** Mapa geomorfológico del área de estudio



Nota: (PMOT, 2009)

### 3.4.3 Estratigrafía

El área presenta afloramientos de rocas plegadas de edad paleozoica y mesozoica, sedimentos del Cenozoico (PMOT, 2009). Las rocas paleozoicas corresponden a los Sistemas Ordovícico y Devónico. Las rocas mesozoicas pertenecen al Sistema Cretácico y las Cenozoicas al Cuaternario.

“Se observan en la zona sedimentos cuaternarios aluviales, coluviales y fluvio lacustre. Los depósitos aluviales de espesor reducido se hallan a lo largo del río Quirpinchaca, en su mayoría están constituidos por gravas, arenas, limos y en mayor porcentaje bloques y pedrones de diferente composición litológica”. (PMOT, 2009).

“Los depósitos coluviales están en casi toda el área de estudio, se originan en las partes altas de cada paisaje y se acumulan por acción de la gravedad. Está constituido por material detrítico heterogéneo de bloques, guijarros, granos y partículas angulares, con poco transporte, constituidos por el mismo material que la roca madre”. (PMOT, 2009).

Los depósitos fluvio-lacustres que están al NO son sedimentos transportados desde las laderas de los cerros, sedimentándose en pequeñas lagunas con un ambiente tranquilo,

intercalado por material medio a grueso, acarreado en época de lluvia máxima. Presentan gravas, limos y arcillas poco consolidados. (PMOT, 2009).

Las formaciones El Molino y Toro Toro, que constituyen los cerros que se encuentran al Este del área de estudio y los cerros Sica Sica y Churuquilla, constituidos por la formación Toro Toro. (PMOT, 2009).

La formación el Molino presenta en su mayoría calizas, contienen también areniscas. Su ambiente de deposición fue de tipo continental – lagunario, vinculado con un mar de poca profundidad. (PMOT, 2009).

Formación Toro Toro, está formada por areniscas de granulometría media a fina, de tonalidades rojo violácea que en los cerros Sica Sica y Churuquilla presentan fuertes pendientes, su espesor en el área es considerable llegando a más de 200 m. Litológicamente el basamento son sedimentos paleozoicos, el ambiente de deposición ha sido un ambiente marino – continental, nerítico – litoral. (PMOT, 2009).

Las formaciones Capinota, Anzaldo y San Benito pertenecen al periodo Ordovícico. Capinota y Anzaldo en general están conformadas por lutitas amarillentas y limonitas.

La Formación San Benito, conformada por cuarcitas amarillas blanquecinas, forman partes escarpadas del área (PMOT, 2009). Esta formación se puede observar en una pequeña zona en la final de la calle La Paz y Barrio Aranjuez. En el anexo C se pueden observar varias zonas donde se aprecia la geología de Sucre.

#### **3.4.4 Geología Estructural o Tectónica**

La tectogénesis Andina en sus fases Incaica y quechua, fue la que más influyo en la deposición de sedimentos, mayormente cuaternarios. En el área de estudio se desarrolla una falla inversa regional que se halla cortada por una serie de fallas normales casi paralelas transversales a las estructuras, la más notoria es la que se desarrolla a los pies de los cerros Sica Sica y Churuquilla que ha cortado los estratos del Cretácico y desplazado un bloque al este. Se puede observar un claro sub-parallelismo de las estructuras con fallamiento longitudinal. (PMOT, 2009).

#### **3.4.5 Hidrología superficial**

Fue difícil determinar el escurrimiento superficial de la ciudad, porque la topografía ha sido alterada como producto del asentamiento humano y las obras urbanas realizadas, se buscó información de la ciudad en sus inicios, recopilando así planos antiguos levantados en la época de la colonia que muestran el escurrimiento superficial (Rúa et al, 1992). Comparando los planos elaborados en diferentes épocas se pudo reconocer estas quebradas

o escurrimientos superficiales, en la actualidad son embovedados que forman parte del sistema de alcantarillado de la ciudad (ELAPAS, 2006).

#### **3.4.6 Estudios anteriores sobre aguas subterráneas**

No se sabe de estudios sobre agua subterránea anteriores, sin embargo, se hace mención a estudios en los que hay un acápite sobre el potencial del agua subterránea en el Estudio Ampliación Sistema Agua Potable de Sucre elaborado para ELAPAS en 1981. Donde además muestran datos de mediciones de caudal en cuencas cercanas a Sucre.

Según este estudio, se desestima su uso por estar en una cota inferior a la cota de la planta de tratamiento, se asume que, por encontrarse en el subsuelo del área urbana, está expuesta a contaminación y por último, el caudal es insuficiente. (ELAPAS, 1981).

El último estudio significativo que se llevó a cabo sobre la medición y registro de los pozos de aguas subterráneas en la región de Sucre tuvo lugar en el año 2009. Este análisis es de gran importancia, ya que proporciona información valiosa sobre la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos subterráneos en la zona. Según los datos recopilados por ELAPAS en 2010, se identificaron un total de 32 pozos excavados, 14 perforados, así como 2 manantiales naturales. (ELAPAS, 2010).

El estudio realizado en 2009 sobre el registro de pozos de aguas subterráneas en Sucre nos proporciona una visión clara, pero no suficiente sobre la situación hídrica de la región. A medida que la demanda de agua continúa creciendo debido a factores como el aumento de la población y el cambio climático, es imperativo que se realicen estudios más actualizados y exhaustivos. Esto permitirá no solo gestionar adecuadamente los recursos hídricos disponibles, sino también implementar estrategias de conservación y desarrollo sostenible que aseguren la disponibilidad de agua para las generaciones futuras. La información recopilada en este estudio debe servir como base para futuras investigaciones y políticas públicas enfocadas en la gestión eficaz de los recursos hídricos en Sucre y sus alrededores.

#### **3.4.7 Recarga del sistema acuífero urbano de la ciudad de Sucre**

Si analizamos el nacimiento de la ciudad, sabremos que desde sus inicios se utilizaron las quebradas que cruzaban esta, como un medio para eliminar aguas residuales. Podemos decir entonces que son casi 500 años que la ciudad utiliza este sistema.

Se debe tener en cuenta que en todo ese tiempo el uso de suelo fue cambiando, a medida que la ciudad fue creciendo y modernizándose. Se puede resaltar que la ciudad en los inicios de su época republicana, calles de tierra y el medio de transporte son animales equinos. Con el desarrollo de la ciudad, vinieron cambios importantes, como son: la

construcción de las redes de agua potable, el sistema de drenaje que es mixto, colectores de aguas servidas y pluviales, el pavimento de las calles y construcción de las casas, todos estos aspectos cambian la recarga del acuífero, porque impermeabilizan en alguna medida el suelo, por tanto la recarga directa disminuye, sin embargo hay recarga por pérdidas en la red de agua potable aproximadamente 21.56 % “volumen de salida de la planta menos el volumen de agua facturado”(ELAPAS, 2009) y aguas servidas, el efecto de la impermeabilización del suelo puede disminuir la evapotranspiración real. Por tanto, hay un incremento neto de agua (Vásquez, 2003).

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

Plasmar todos los resultados de la investigación con gráficos, mapas, imágenes; es decir se demuestra lo que se planteó en los objetivos y en la Hipótesis)

Realizar las discusiones de los resultados obtenido comprando con investigaciones similares y realizando un aporte de lo que ha obtenido de su investigación)

### **4.1 Material y equipos utilizados**

#### **Material Cartográfico**

- Límites Municipales de Bolivia

#### **Equipos**

- Computator

#### **Software**

- Google Earth Engine
- Global Mapper v-24
- Word
- Excel

#### **Material de Escritorio**

- Papel Bon
- Impresora

### **4.2 Metodología**

Objetivo: Detectar la ubicación de áreas propensas a las aguas subterráneas en la ciudad de Sucre utilizando las imágenes de SAR (Radar de Apertura Sintética de la misión Sentinel 1) del año 2023.

Recopilación de datos: Estos pasos deberán incluir:

Preparación de Información Vectorial y Ráster: Este procedimiento implica la depuración de datos 'shapefile' correspondientes al Municipio de Sucre. Al mismo tiempo se debe verificar la existencia de información ráster del satélite Sentinel 1.

- a) Corrección de errores: Si fuera necesario se realizará correcciones radiométricas y geométricas en las imágenes para asegurar de que estén bien calibradas, con sistema de referencia y sistema de proyección principalmente.

- b) Conversión de formatos: Se convierte los datos en un formato adecuado para su análisis posterior con Google Earth Engine. Esto puede implicar convertir los datos de radar a información relevante como índices de humedad del suelo.

Desarrollo del script: Este escenario se centra en la elaboración y aplicación del script en el Google Earth Engine, una herramienta digital de alta tecnología que permite analizar, manejar imágenes satelitales y de radar para cumplir con objetivos específicos. Este script, de gran relevancia en el presente proyecto, es esencialmente un conjunto de instrucciones codificadas que permiten realizar análisis y procesamiento de imágenes. En este caso concreto, estará enfocado a la detección de agua subterránea en el municipio de Sucre.

El script está configurado para ser capaz de analizar las imágenes de radar. Esas imágenes de radar son una ventaja tecnológica que ofrecen datos espaciales del fenómeno electromagnético de la luz, con una visión más detallada y completa del terreno y de las formaciones subterráneas, entre ellas el agua, que una simple fotografía aérea no puede proporcionar.

El script de Google Earth Engine contiene secuencias de instrucciones programadas para resaltar y detectar características particulares que están íntimamente relacionadas con la presencia de aguas subterráneas. Caen dentro de este espectro elementos como la respuesta del suelo a la humedad, lo que puede actuar como una inequívoca señal de que hay agua almacenada debajo. Una característica como esta puede destacarse haciendo uso de algoritmos específicos y después interpretarse para entender mejor el paisaje subterráneo.

Análisis de datos: Una vez desarrollado el script, se ejecutará en Google Earth Engine para realizar el análisis de datos. Esto implica aplicar el script a todas las imágenes disponibles y utilizar técnicas de procesamiento de imágenes para identificar y mapear las áreas de interés donde se encuentran las aguas subterráneas, resaltadas con tonos de colores.

Validación de resultados: Para la validación de resultados usaremos dos métodos, el primero consiste en la comparación de datos de ubicación de acuíferos subterráneos, obtenidos con un estudio realizado por la Empresa Local de Agua potable y alcantarillado Sucre Elapas el año 2004. El segundo consiste en la realización de mediciones en campo para confirmar la precisión de las detecciones.

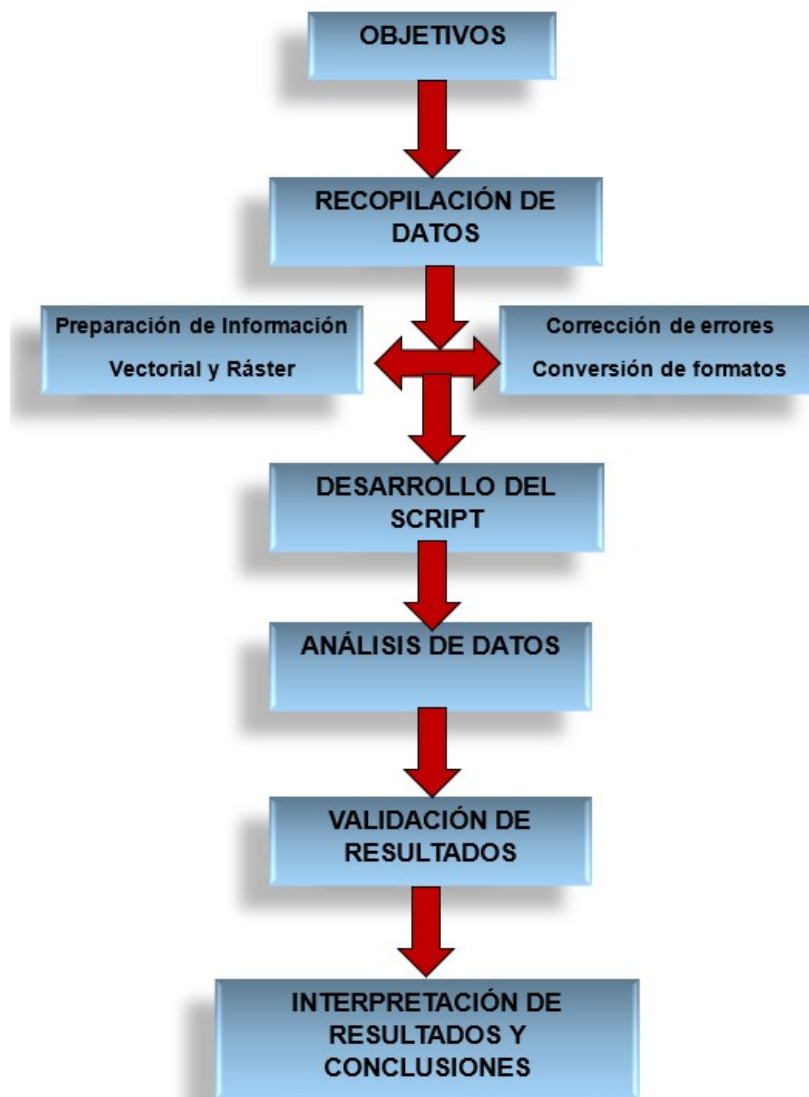
Interpretación de resultados y conclusiones: Son elementos fundamentales en cualquier estudio o proyecto. Esta etapa esencial implica entender lo que los datos recolectados articulan acerca de las cuestiones de investigación propuestas. El análisis de los resultados posibilita la identificación de modelos, patrones y relaciones que inicialmente no podrían ser perceptibles.

En este contexto en particular, esta fase permite evaluar la metodología empleada durante el proceso de investigación. Es en este punto cuando se evalúa la efectividad y la eficiencia de las técnicas y estrategias utilizadas para recoger y analizar información. Si los resultados conseguidos son confiables y ofrecen una imagen clara de lo que se intentaba indagar, entonces se puede deducir que la metodología implementada es sólida y robusta.

En última instancia, alcanzar conclusiones firmes basadas en la interpretación de los resultados es lo que diferencia una investigación exitosa de una que no ha logrado sus metas. Las conclusiones deben reflejar las respuestas a las preguntas de investigación planteadas y deben establecerse con cautela, evitando conclusiones demasiado audaces sin respaldo de los datos.

### 4.3 Diseño metodológico

*Figura 25: Diseño metodológico del proyecto*



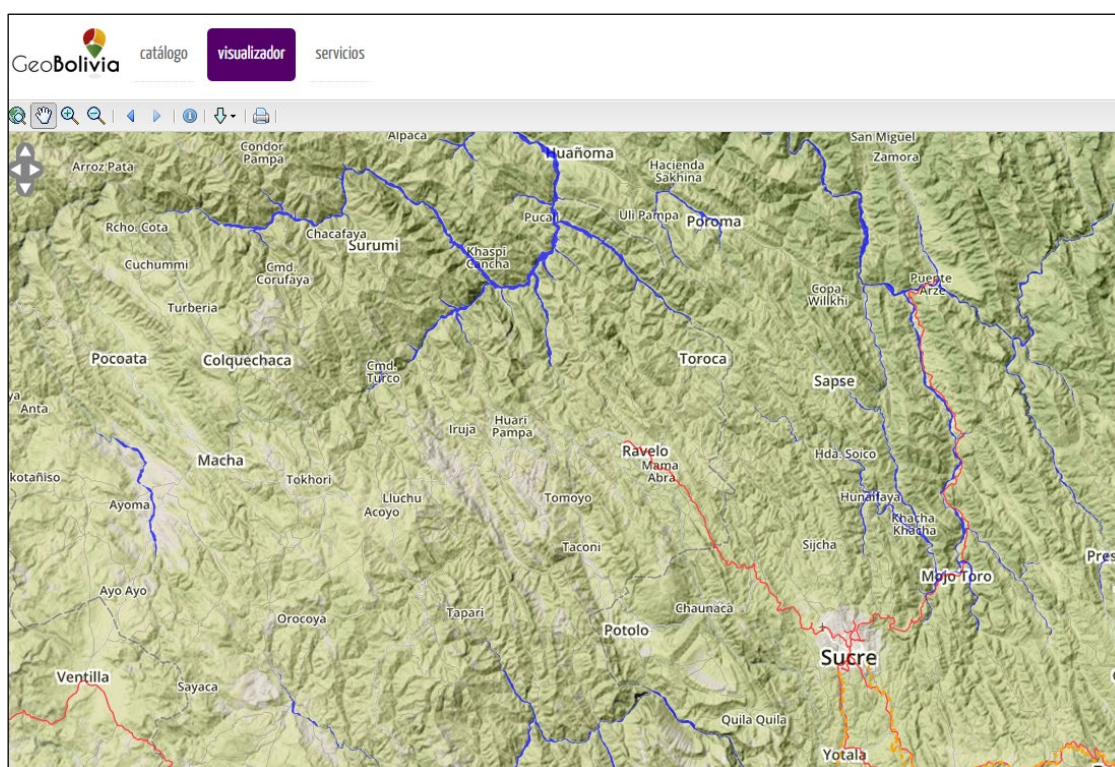
Nota: Elaboración propia

#### 4.4 Recopilación de datos

La versión oficial del Geo portal de Geo Bolivia, se constituye en el "nodo iniciador" de la Infraestructura de Datos Espaciales del Estado Plurinacional de Bolivia (IDE-EPB). Cuyo objetivo es proporcionar una visión integral del territorio, favorecer la coordinación interinstitucional y sobre todo facilitar el acceso a la información de nuestro país.

Para la recopilación de información espacial de formato vectorial se obtuvo los archivos shapefile de todos los municipios de Bolivia, en particular de la ciudad de Sucre, como primera actividad.

**Figura 26: Recopilación de información**



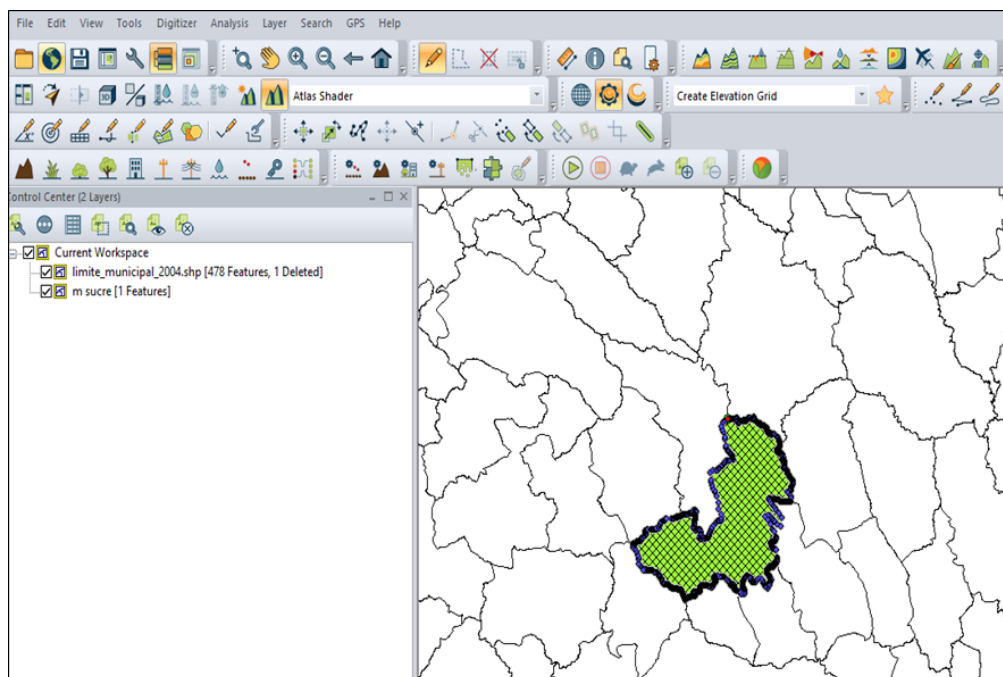
Nota: Elaboración propia

Después de establecer el área de interés o AOI, en este caso del municipio de Sucre, la geometría vectorial de los límites es filtrada del archivo original con ayuda de Global Mapper V24.

Después de seleccionar la zona geográfica que nos interesa, debemos delimitar el polígono para hacer la corrección geométrica. Esto implica definir el sistema de proyección UTM, el sistema de referencia WGS 84 y las coordenadas cartesianas. La región especificada es la zona 20 sur. Con estos ajustes, podremos trabajar el polígono en distintos programas, como Google Earth Engine, para analizar datos espaciales dentro de los límites establecidos.

La importancia de este proceso radica en que se garantiza un análisis único del objeto de estudio, estableciendo de esta manera seguridad técnica al momento de generar información espacial del área de interés.

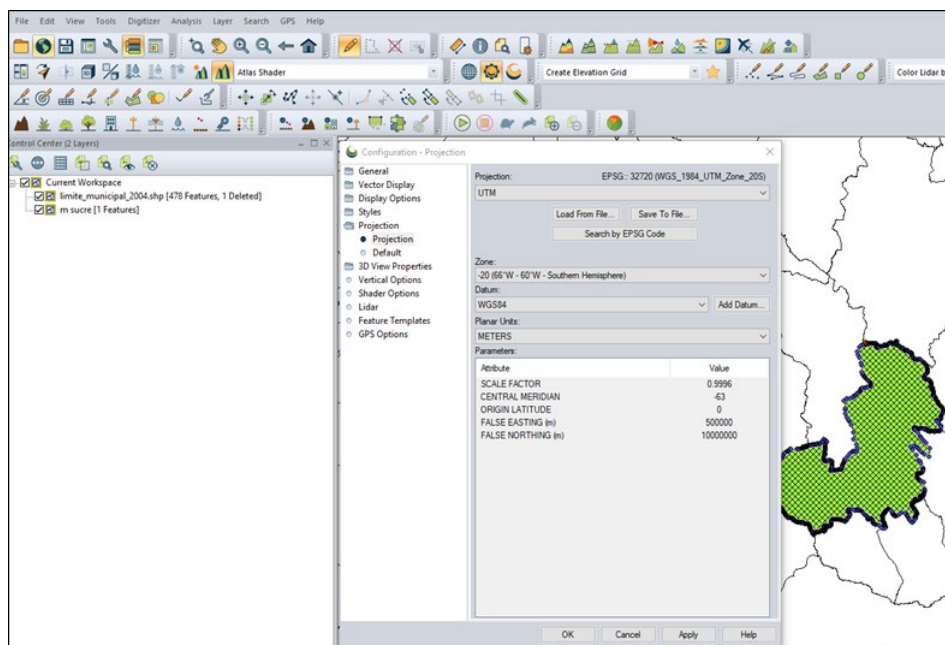
**Figura 27: Geometría del municipio de Sucre - Bolivia**



Nota: Elaboración propia

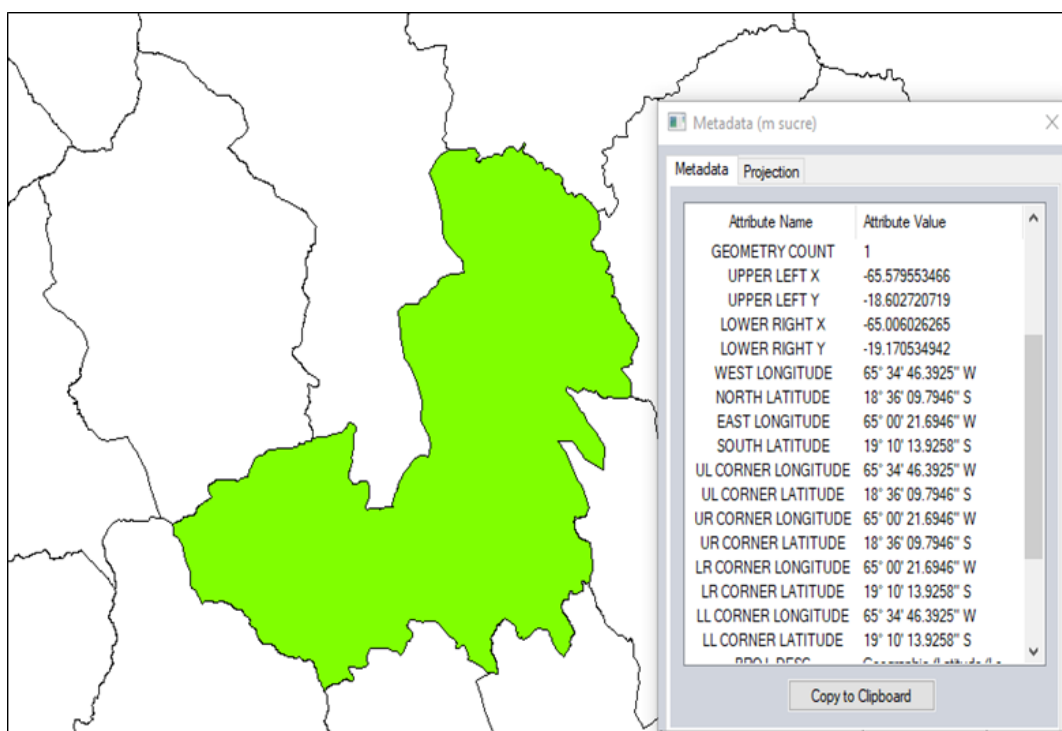
De esa manera queda establecido los límites geográficos del área de interés.

**Figura 28: Generación de metadata del municipio de Sucre - Bolivia**



Nota: Elaboración propia

**Figura 29:** Generación de metadatos del municipio de Sucre – Bolivia



Nota: Elaboración propia

La información espacial contenida en metadatos es la siguiente:

FILENAME= Sucre

AREA GEOMETRY COUNT=1

AREA VERTEX COUNT=3136

UPPER LEFT X=-65.579553466

UPPER LEFT Y=-18.602720719

LOWER RIGHT X=-65.006026265

LOWER RIGHT Y=-19.170534942

WEST LONGITUDE=65° 34' 46.3925" W

NORTH LATITUDE=18° 36' 09.7946" S

EAST LONGITUDE=65° 00' 21.6946" W

SOUTH LATITUDE=19° 10' 13.9258" S

UL CORNER LONGITUDE=65° 34' 46.3925" W

UL CORNER LATITUDE=18° 36' 09.7946" S

UR CORNER LONGITUDE=65° 00' 21.6946" W

UR CORNER LATITUDE=18° 36' 09.7946" S

LR CORNER LONGITUDE=65° 00' 21.6946" W

LR CORNER LATITUDE=19° 10' 13.9258" S

LL CORNER LONGITUDE=65° 34' 46.3925" W

LL CORNER LATITUDE=19° 10' 13.9258" S

PROJ\_DESC=Geographic (Latitude/Longitude) / WGS84 / arc degrees

PROJ\_DATUM=WGS84

PROJ\_UNITS=arc degrees

EPSG\_CODE=EPSG:4326

En el proceso para garantizar el manejo adecuado de los datos geográficos, el siguiente paso consiste en determinar los formatos de archivos que serán utilizados en el área específica de interés. Para aplicar mejor este aspecto, es importante considerar dos de los formatos más comunes y ampliamente reconocidos en la administración de información geoespacial: el formato KML (Keyhole Markup Language) y el formato SHP (Shapefile).

El formato KML, originalmente desarrollado para Google Earth, es un formato basado en XML que se utiliza para la visualización de datos técnicos y geográficos en aplicaciones de mapeo. Es muy accesible y permite a los usuarios compartir y mostrar información geográfica en una plataforma visualmente atractiva y de fácil comprensión.

Por otro lado, el formato SHP, el cual es una creación de la compañía ESRI (Environmental Systems Research Institute), se compone de al menos tres archivos básicos que trabajan conjuntamente para representar características geográficas como puntos, líneas, y polígonos. Que debemos utilizar en el contexto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) debido a su capacidad para contener un alto nivel de detalles y atributos geográficos.

#### **4.5 Desarrollo del script**

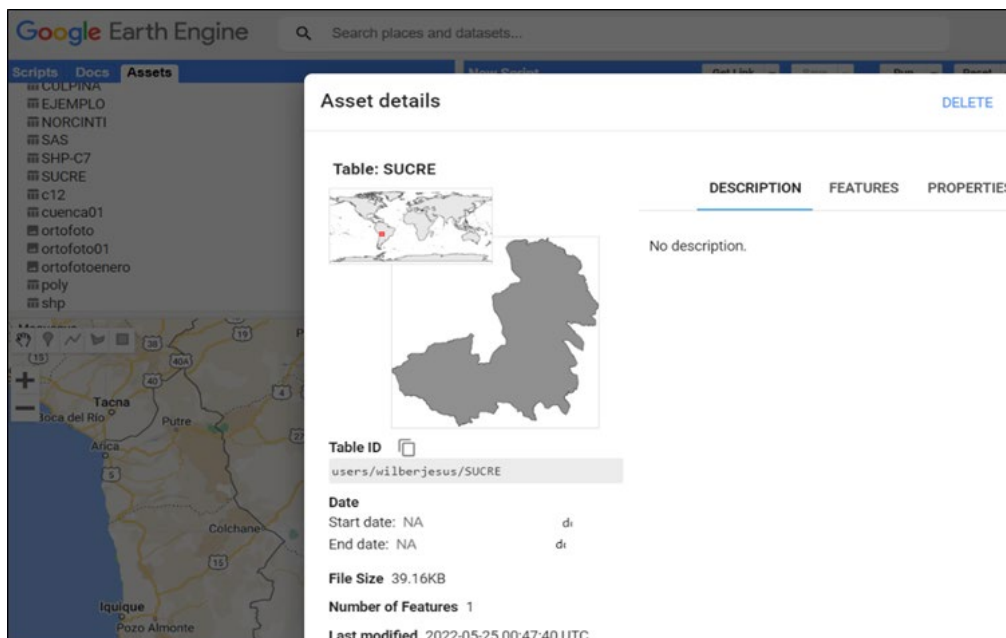
Para llevar a cabo el desarrollo de un programa efectivo en JavaScript, especialmente cuando se trabaja con datos geoespaciales, es muy importante la habilidad de gestionar y operar diversos tipos de archivos y formatos. Uno de estos formatos relevantes es el archivo shapefile.

El archivo shapefile, que suele tener la extensión .shp, es un formato de archivo digital popular para almacenar la forma geométrica y la información de atributos geográficos de características espaciales.

#### 4.5.1 Determinación de área de interés

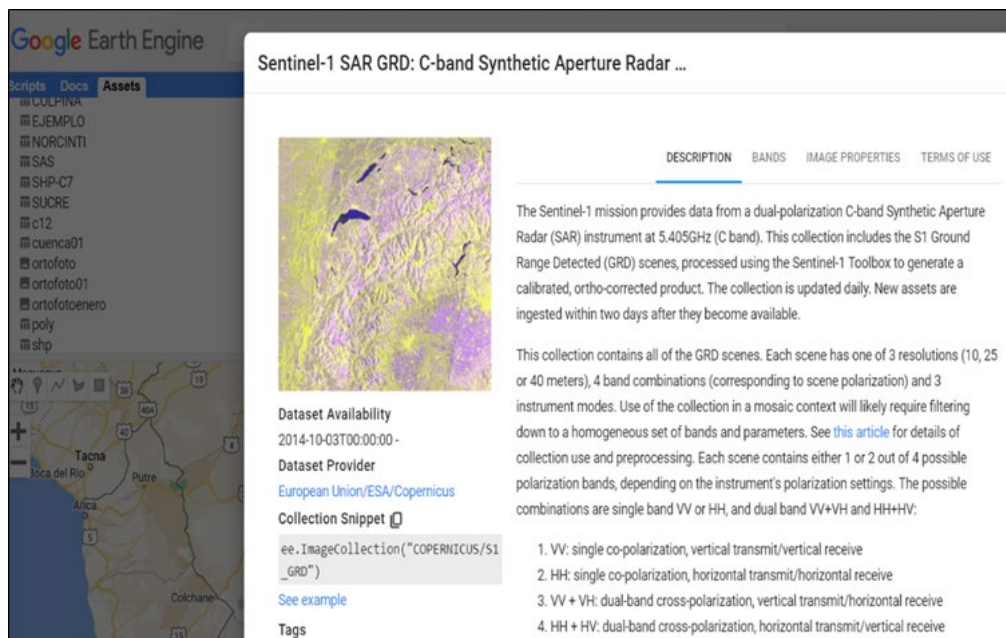
Es importante mencionar que se debe tener identificado y definido por sus límites el área de interés, este deberá estar en formato comprimido de archivo shape.

**Figura 30:** Determinación del AOI en Google Earth Engine



Nota: Elaboración propia

**Figura 31:** Obtención de información de datos Sentinel-1



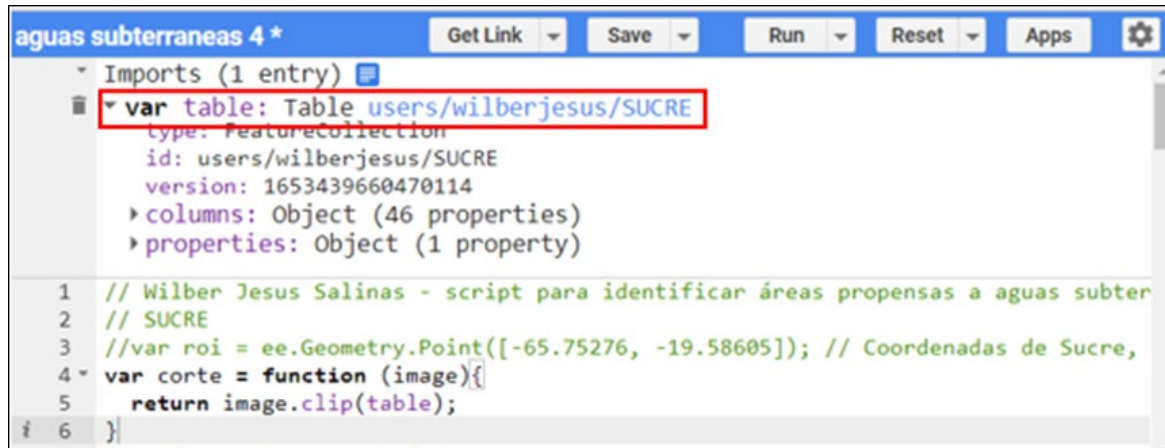
Nota: Elaboración propia

En esta etapa del trabajo se busca información sobre la colección de imágenes del satélite Sentinel -1 SAR. en el catálogo.

Después de revisar las características de la misión en el catálogo, se debe revisar las propiedades de las bandas a usar, para el análisis de la polarización

#### 4.6 Importar el área de interés script

**Figura 32:** Insertar el área de interés



```

aguas subterrneas 4 *
Imports (1 entry)
  var table: Table users/wilberjesus/SUCRE
    type: FeatureCollection
    id: users/wilberjesus/SUCRE
    version: 1653439660470114
    columns: Object (46 properties)
    properties: Object (1 property)
1 // Wilber Jesus Salinas - script para identificar áreas propensas a aguas subter
2 // SUCRE
3 //var roi = ee.Geometry.Point([-65.75276, -19.58605]); // Coordenadas de Sucre,
4 var corte = function (image){
5   return image.clip(table);
6 }
  
```

Nota: Elaboración propia

En este caso la geometría del área de interés fue reconocido como tabla, pero esto no cambia en nada el procedimiento a seguir ya que este formato fue reconocido de esa manera porque el archivo shp contenía información alfanumérica en tablas.

El siguiente paso es definir el rango de tiempo o fechas, en este caso se determinó realizar el análisis desde el 1 de enero del 2022 hasta el 31 de diciembre de 2023

**Figura 33:** Determinación de la serie temporal



```

aguas subterrneas 4 *
1 // Wilber Jesus Salinas - script para identificar áreas propensas a aguas subter
2 // SUCRE
3 //var roi = ee.Geometry.Point([-65.75276, -19.58605]); // Coordenadas de Sucre,
4 var corte = function (image){
5   return image.clip(table);
6 }
7 // Definir el rango de fechas
8 var startDate = '2022-01-01';
9 var endDate = '2023-12-31';
10
11 // Filtrar imágenes Sentinel-1
  
```

Nota: Elaboración propia

Se debe seleccionar la colección de imágenes Sentinel-1 para acceder a los datos de radar.

**Figura 34:** Determinación de la colección de imágenes Copernicus.

```

aguas subterranas 4 *
Get Link Save Run Reset Apps
9 var endDate = '2023-12-31';
10
11 // Filtrar imágenes Sentinel-1
12 var sentinel1Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
13   .filterBounds(table)
14   .filterDate(startDate, endDate)
15   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
16   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
17   .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')). map (corte);
18

```

Nota: Elaboración propia

Antes de realizar las operaciones de interferometría se debe calibrar las imágenes

**Figura 35:** Calibración de las imágenes Sentinel 1 de la serie temporal

```

11 // Filtrar imágenes Sentinel-1
12 var sentinel1Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
13   .filterBounds(table)
14   .filterDate(startDate, endDate)
15   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
16   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
17   .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')). map (corte);
18 // Calibrado las imagenes
19 var calibrated1 = image.select('VV').multiply(ee.Image.constant(10).pow(ee.Image.constant(0.1)));
20 var calibrated2 = image.select('VH').multiply(ee.Image.constant(10).pow(ee.Image.constant(0.1)));
21
22 // Función para calcular el índice de cambio (diferencia VH - VV)
23 var calculateChangeIndex = function(image) {
24   var vv = image.select('VV');

```

Nota: Elaboración propia

Modo de Adquisición o Interferometría (IW), la Polarización (VV)(VH);

**Figura 36:** Determinación de tipo de polarización.

```

aguas subterranas 4 *
Get Link Save Run Reset Apps
9 var endDate = '2023-12-31';
10
11 // Filtrar imágenes Sentinel-1
12 var sentinel1Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
13   .filterBounds(table)
14   .filterDate(startDate, endDate)
15   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
16   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
17   .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')). map (corte);
18

```

Nota: Elaboración propia

Cálculo de cambio de índice de bandas (diferencia VH - VV)

En su forma más sencilla, la polarización se puede entender como la orientación de las ondas electromagnéticas en el espacio. VH y VV, por lo tanto, son códigos que representan esta orientación: VH significa polarización vertical-horizontal y VV significa polarización vertical-vertical, cuyo resultado estará en una escala de valores comprendidos entre -10 hasta 10.

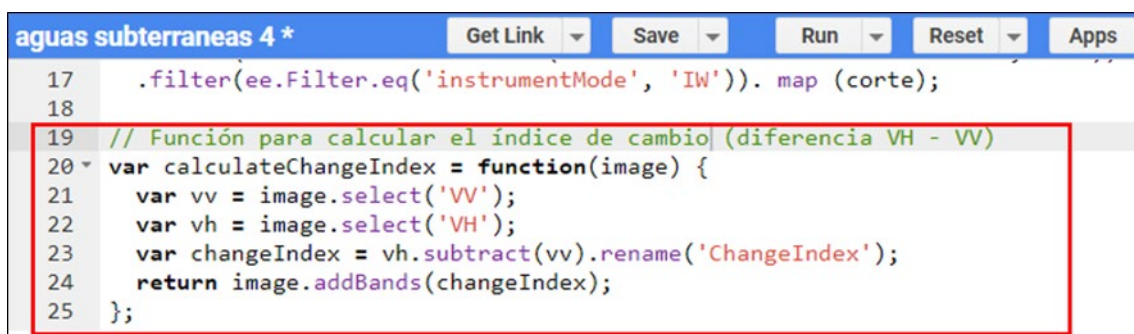
Por lo tanto, calcular el índice de cambio entre estos dos índices sería encontrar la diferencia entre estos dos valores de polarización. Aunque puede parecer relativamente sencillo, los procedimientos para calcular esta diferencia podrían variar dependiendo de la intencionalidad de su uso. Podrían surgir varias interrogantes o dudas, como la precisión de los cálculos, la comparabilidad entre diferentes sistemas de radar o los cambios en el tiempo y el espacio.

Todas estas consideraciones son relevantes y deben ponderarse a la hora de realizar el cálculo de cambio de índice de bandas. En este sentido, resulta importante recalcar que, si bien el propósito de realizar el cálculo es crítico, ya que de ello dependerá el proyecto en sí.

### Dispersión diferencial del radar en suelos húmedos y secos

Las propiedades electromagnéticas del suelo varían en función de su contenido de agua. Suelos saturados presentan una mayor constante dieléctrica y, por lo tanto, reflejan más energía de radar que suelos secos. Este contraste permite identificar áreas con mayor probabilidad de recarga de acuíferos, especialmente en temporadas de lluvia.

**Figura 37:** Cálculo de cambio de índice de bandas (diferencia VH - VV)



```

17 .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')). map (corte);
18
19 // Función para calcular el índice de cambio (diferencia VH - VV)
20 var calculateChangeIndex = function(image) {
21   var vv = image.select('VV');
22   var vh = image.select('VH');
23   var changeIndex = vh.subtract(vv).rename('ChangeIndex');
24   return image.addBands(changeIndex);
25 };

```

Nota: Elaboración propia

En la siguiente fila se debe aplicar la función de índice de cambio a la colección Sentinel-1

**Figura 38:** Función de índice de cambio de la colección de Sentinel.

```

25 };
26
27 // Aplicar la función de índice de cambio a la colección Sentinel-1
28 var sentinel1ChangeCollection = sentinel1Collection.map(calculateChangeIndex);
29
30 // Calcular la mediana de la serie temporal
31 var medianImage = sentinel1ChangeCollection.median();
32
33 // Visualizar el índice de cambio en el mapa
34 var visParams = {min: -10, max: 10, palette: 'green, white, red'};
35 Map.addLayer(medianImage.select('ChangeIndex'), visParams, 'Change Index');

```

Nota: Elaboración propia

Luego se realiza el filtro de la mediana de la serie temporal, esto significa que se obtendrá la mediana desde el 1 de enero del 2022 al 31 de diciembre del 2023

### Filtro de Mediana

- Reemplaza cada píxel con la mediana de los valores en su ventana.
- **Ventajas:** Reduce el speckle sin afectar bordes tanto como el filtro de media.
- **Desventajas:** Puede no ser suficiente en imágenes con alto nivel de ruido.
- **Uso recomendado:** Para reducir speckle en áreas homogéneas sin afectar mucho los bordes.

**Figura 39:** Cálculo de la mediana de la serie temporal.

```

25 };
26
27 // Aplicar la función de índice de cambio a la colección Sentinel-1
28 var sentinel1ChangeCollection = sentinel1Collection.map(calculateChangeIndex);
29
30 // Calcular la mediana de la serie temporal
31 var medianImage = sentinel1ChangeCollection.median();
32
33 // Visualizar el índice de cambio en el mapa
34 var visParams = {min: -10, max: 10, palette: 'green, white, red'};
35 Map.addLayer(medianImage.select('ChangeIndex'), visParams, 'Change Index');

```

Nota: Elaboración propia

En esta fila se escoge los comandos para poder visualizar el índice de cambio en el mapa.

**Figura 40:** Cálculo de la mediana de la serie temporal.

```

aguas subterranas 4 *   Get Link Save Run Reset Apps
33 // Visualizar el índice de cambio en el mapa
34 var visParams = {min: -10, max: 10, palette: 'green, white, red'};
35 Map.addLayer(medianImage.select('ChangeIndex'), visParams, 'Change Index');
36
37 // Generar una máscara basada en un umbral para identificar áreas propensas
38 var threshold = 1; // Ajusta este valor según tus necesidades
39 var waterMask = medianImage.select('ChangeIndex').gt(threshold);
40

```

Nota: Elaboración propia

En la siguiente imagen se puede apreciar el resultado de los valores de retrodispersión en una escala de -10 a 10, donde los valores negativos están definidos por el color verde, los valores próximos a cero de color blanco y de color rojo aquellos que tienen valores positivos con alto potencial para aguas subterráneas.

**Figura 40:** Generación de máscara para detectar aguas subterráneas.

```

aguas subterranas 4 *   Get Link Save Run Reset Apps
33 // Visualizar el índice de cambio en el mapa
34 var visParams = {min: -10, max: 10, palette: 'green, white, red'};
35 Map.addLayer(medianImage.select('ChangeIndex'), visParams, 'Change Index');
36
37 // Generar una máscara basada en un umbral para identificar áreas propensas a ag
38 var threshold = 1; // Ajusta este valor según tus necesidades
39 var waterMask = medianImage.select('ChangeIndex').gt(threshold);
40
41

```

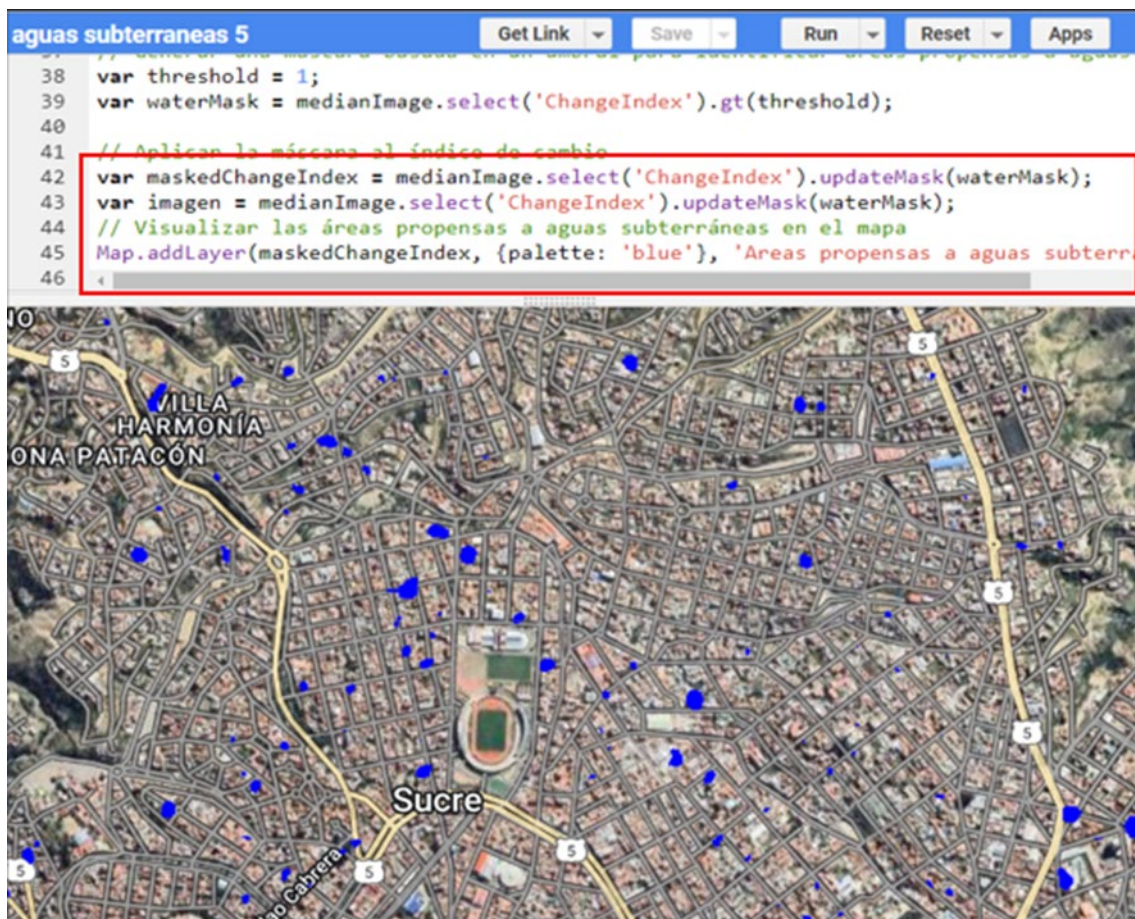


Nota: Elaboración propia

Generar una máscara basada en un umbral para identificar áreas propensas a aguas subterráneas.

Aplicar la máscara al índice de cambio y visualizar las áreas propensas a aguas subterráneas en el mapa, estas se presentarán con color azul, marcando de esta manera la ubicación geográfica de las zonas propensas a aguas subterráneas.

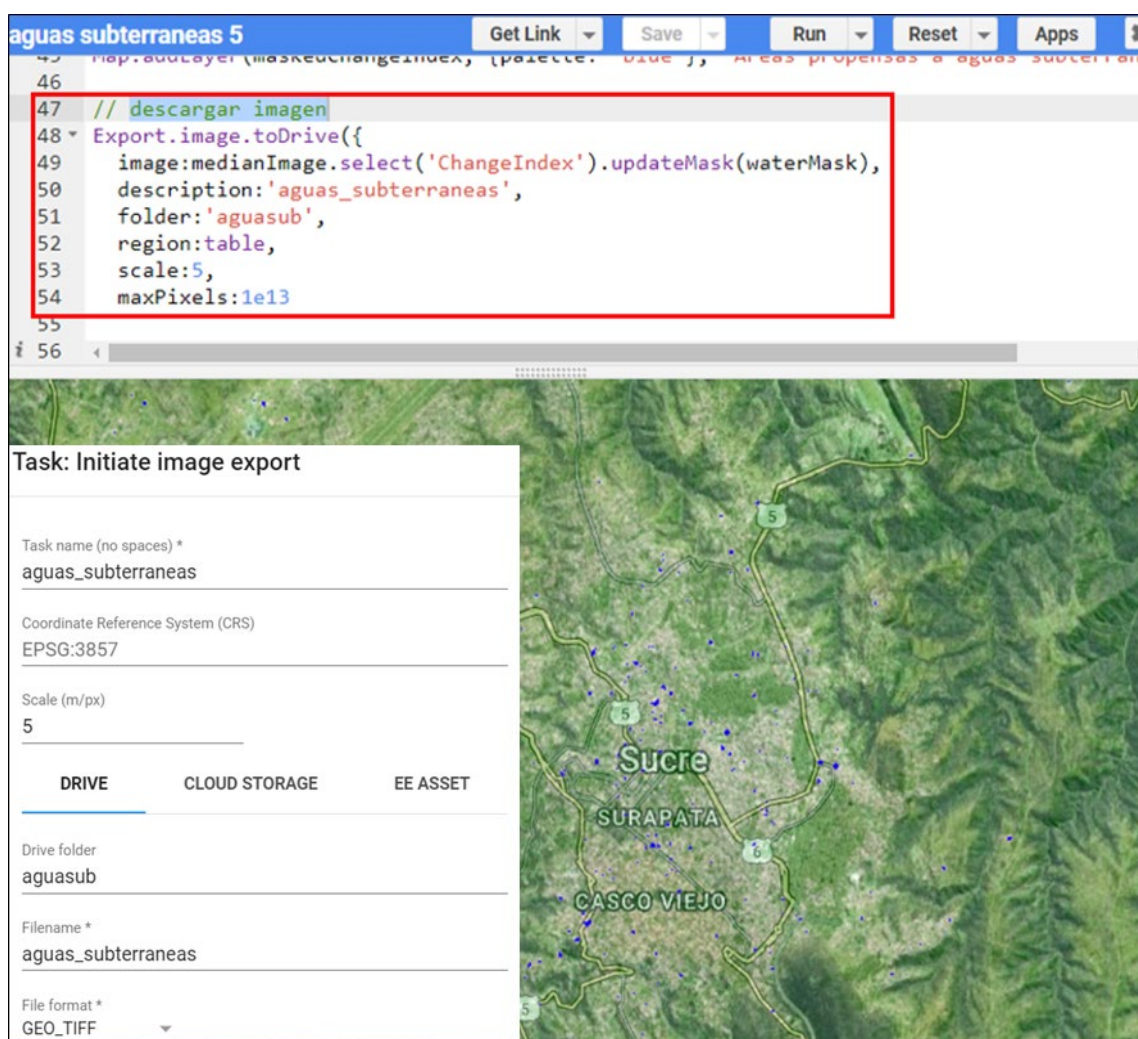
**Figura 41:** Visualización de áreas propensas a aguas subterráneas.



Nota: Elaboración propia

En la fila 48 a la 54 se exporta la imagen generada, al drive de Google en formato GEOTIFF, para luego ser usada por los sistemas de información geográfica, esta rutina de Google Earth Engine termina su trabajo en esta fila.

**Figura 42:** Exportación de mapa de imágenes Sentinel con información polarizada



Nota: Elaboración propia

## 4.7 Análisis y discusión de resultados

Para realizar el análisis de datos se debe procesar la información obtenida en un sistema de información geográfica, en este caso se aplicó Global Mapper v24.

### 4.7.1 Validación de los Resultados

Los resultados obtenidos tras la implementación del script en el área de estudio revelan que el 100% de las zonas identificadas como posibles fuentes de aguas subterráneas, coinciden con pozos registrados por la empresa de agua potable y alcantarillado Sucre (ELAPAS) en 2009, así como con estudios geofísicos recientes. Esta consistencia indica una alta correlación entre los datos generados por Sentinel-1 y las fuentes de datos locales y geofísicas.

**Figura 43:** Sobreposición de la información de pozos registrados

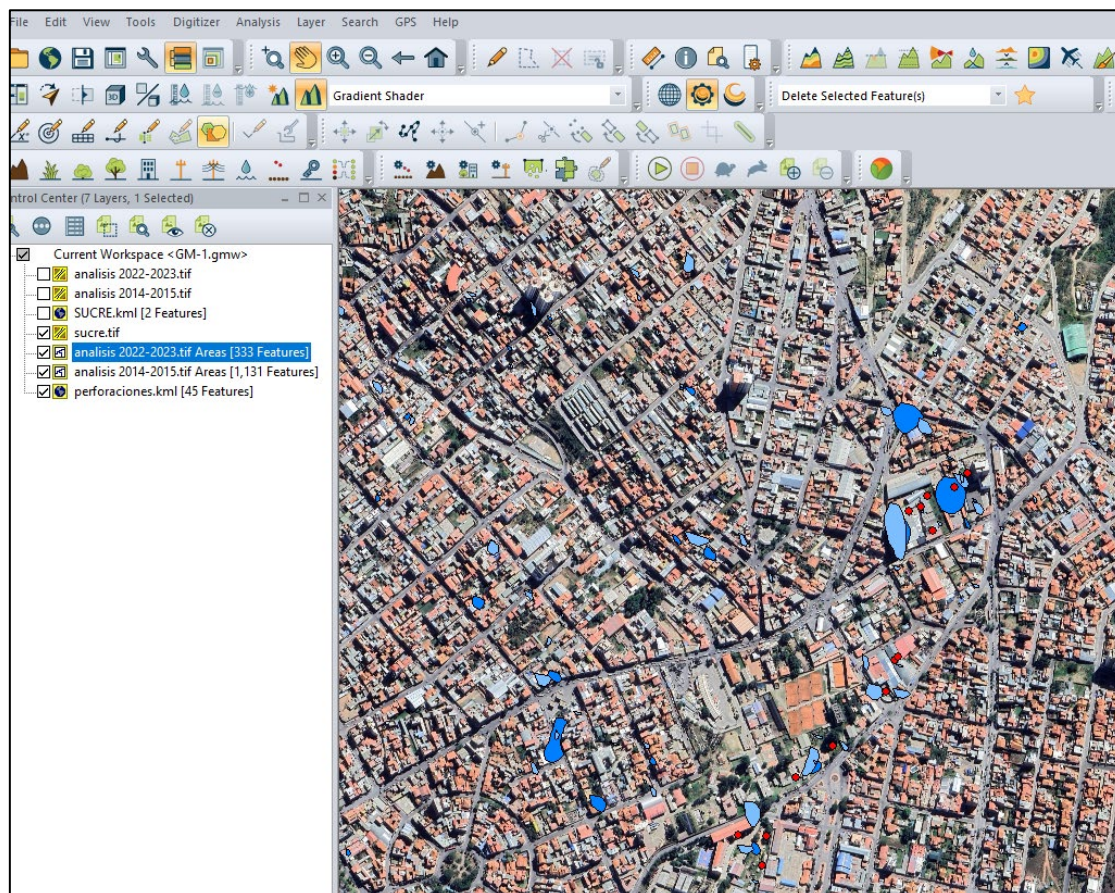


Nota: Elaboración propia

#### 4.8 Coincidencia con Registros de ELAPAS

La coincidencia entre las zonas identificadas como potenciales reservorios de aguas subterráneas y los pozos registrados por ELAPAS es una evidencia de la eficacia del método empleado. No se trata solo de una validación puntual, sino de una prueba clara de que la metodología utilizada puede ser reproducida en diferentes contextos. Esta validación indirecta subraya la capacidad de las imágenes de Sentinel-1, específicamente usando radar de apertura sintética (SAR), para detectar características subterráneas relacionadas con recursos hídricos. ELAPAS, como entidad responsable del agua potable, posee datos verificados y confiables, lo que agrega un valor significativo a la validación de los resultados obtenidos.

**Figura 44:** Sobreposición de la información de pozos registrados con los analizados del año 2015 y 2023

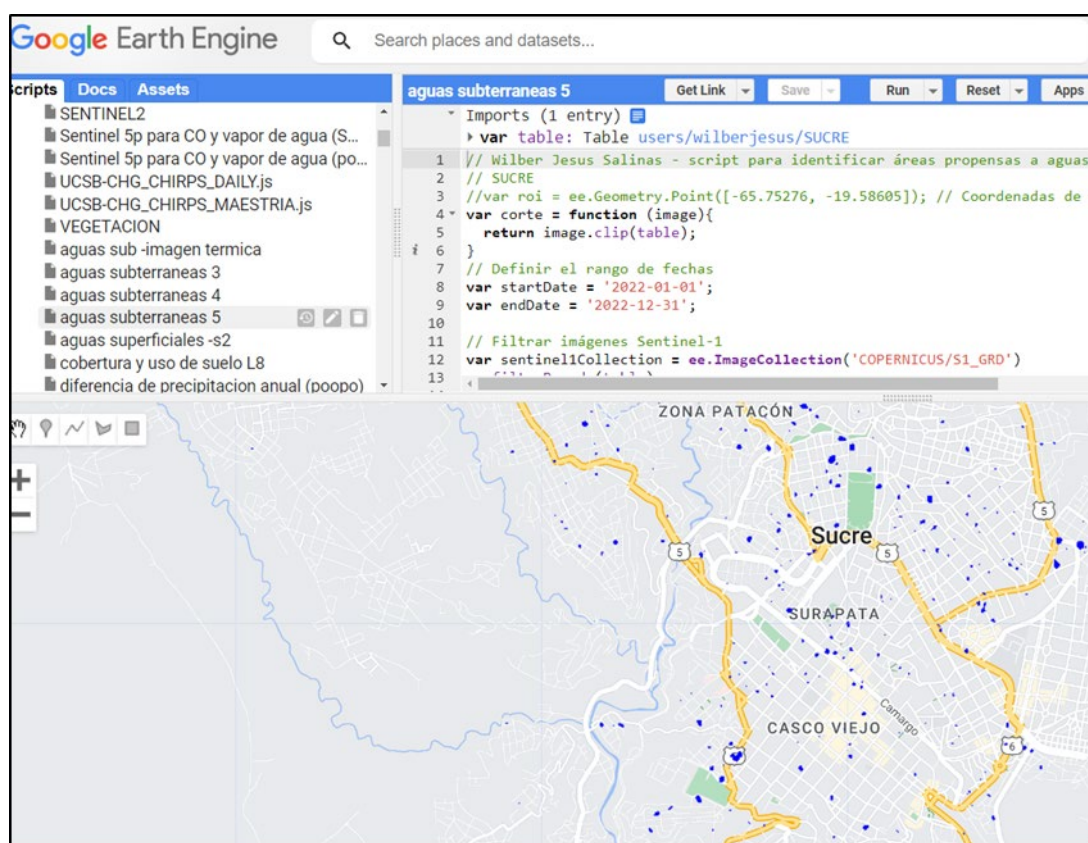


Nota: Elaboración propia

#### 4.8.1 Aplicabilidad de Google Earth Engine

La plataforma Google Earth Engine ha demostrado ser una herramienta poderosa y eficiente para el análisis de grandes volúmenes de datos satelitales. No solo facilita el procesamiento de información, sino que también permite realizar análisis complejos de forma automatizada. Este análisis permitió identificar patrones significativos en la distribución de posibles fuentes de agua subterránea en el municipio de Sucre. La capacidad de procesar grandes volúmenes de datos en un corto período de tiempo facilita la planificación y gestión de recursos hídricos mediante una metodología accesible y escalable. Esto implica que otros municipios o regiones podrían beneficiarse de esta tecnología de manera similar, optimizando recursos y logrando una mejor gestión hídrica.

**Figura 45: Ubicación de aguas subterráneas con GEE**

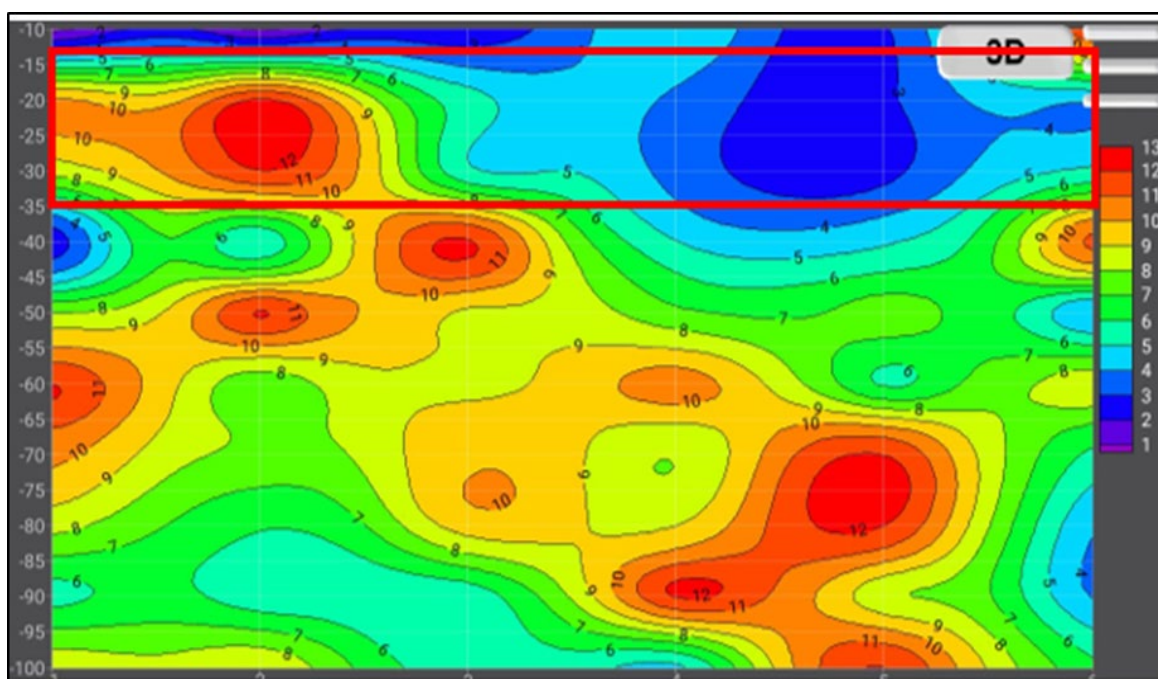


Nota: Elaboración propia

#### 4.8.2 Comparación con Estudios Geofísicos

La comparación con estudios geofísicos recientes refuerza la validez de los resultados obtenidos mediante Google Earth Engine. La concordancia entre métodos tradicionales y el uso de la tecnología Radar de apertura sintética SAR resalta la utilidad de combinar técnicas avanzadas de teledetección con enfoques geofísicos convencionales. Estos enfoques combinados permiten una caracterización más completa y precisa del subsuelo. Por ejemplo, mientras los estudios geofísicos pueden proporcionar datos detallados y profundos, las imágenes satelitales ofrecen una perspectiva más amplia y pueden cubrir extensas áreas rápidamente, lo que complementa la información y permite decisiones más informadas.

**Figura 46:** Caracterización acuíferos subterráneos con sondeo eléctrico

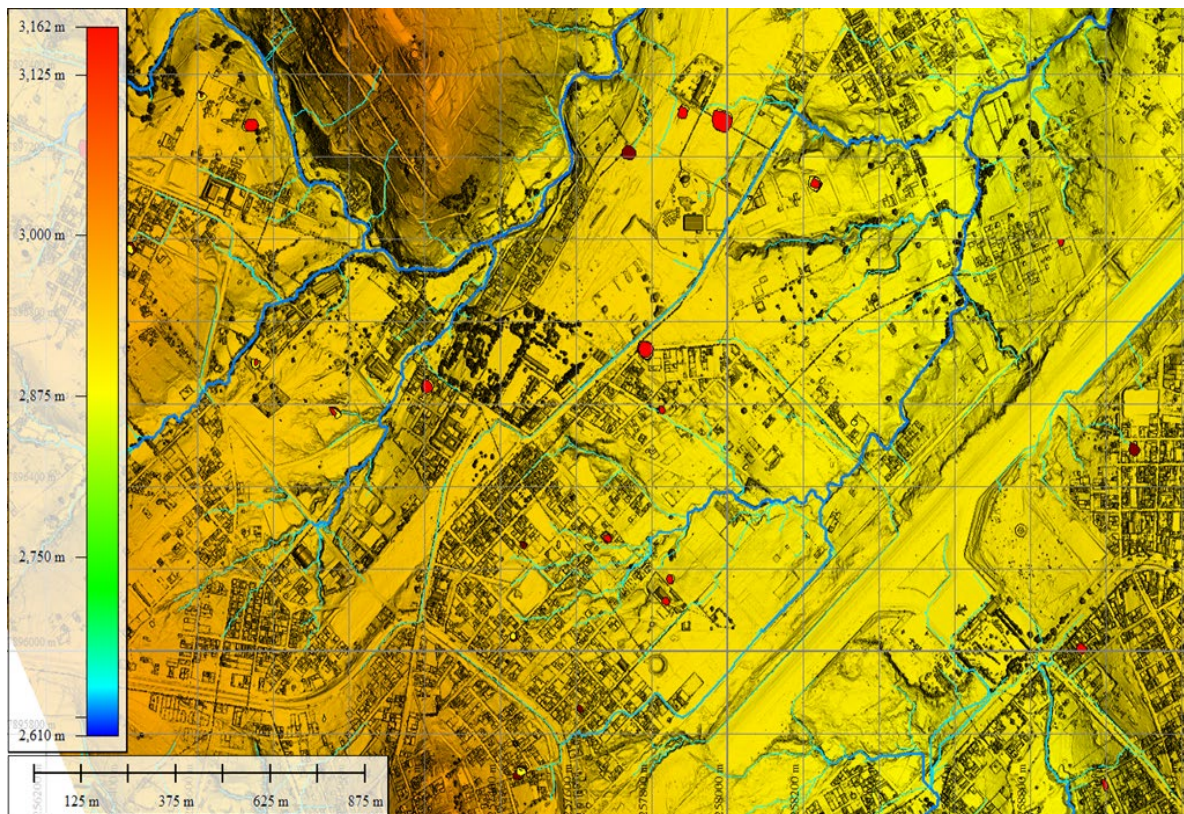


Nota: Adaptado de (Peñaranda et al., 2025)

Es importante tener en cuenta que, aunque los resultados son prometedores, existen algunas limitaciones en cuanto a la resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales. Estos factores pueden afectar la precisión en la identificación de zonas potenciales de aguas subterráneas. Además, posibles interferencias debido a condiciones geomorfológicas y construcciones urbanas pueden influir en la interpretación de los datos. Por ejemplo, áreas urbanizadas pueden reflejar señales falsas o atenuar las señales que indican la presencia de agua subterránea. Estas consideraciones deben ser tratadas en futuros estudios para mejorar la precisión y aplicabilidad de las técnicas utilizadas. Además, se recomienda realizar estudios complementarios que aborden estas limitaciones para consolidar y reforzar los hallazgos iniciales.

En resumen, la validación de los resultados muestra una alta correlación con datos confiables de ELAPAS y estudios geofísicos recientes, lo que refuerza la confianza en el uso de tecnología avanzada para la gestión de recursos hídricos. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones actuales y trabajar para superarlas con el fin de maximizar la eficacia de estos métodos en el futuro.

**Figura 47:** Distribución de lugares potenciales a aguas subterráneas en Sucre



Nota: Elaboración propia

Si bien la coincidencia espacial mostrada es importante, fue necesario verificar y ratificar los 25 posibles lugares de presencia de aguas subterráneas mediante los métodos de prospección geofísica que permitieron caracterizar formaciones geológicas que a su vez determinaron la presencia y profundidad de las aguas subterráneas, lo que lleva a la Tabla 3 que resume la evidencia de presencia de agua subterránea en la zona de estudio, pero muestra también que la profundidad a la que se encuentra varía considerablemente. Esta variación, que no es mostrada mediante el análisis satelital de imágenes SAR, resulta de gran importancia ya que podrá ser tomada en cuenta en el caso de realizar construcción de pozos para el aprovechamiento de este recurso.

Si bien la coincidencia espacial mostrada es importante, fue necesario verificar y ratificar los 25 posibles lugares de presencia de aguas subterráneas mediante los métodos de prospección geofísica que permitieron caracterizar formaciones geológicas que a su vez determinaron la presencia y profundidad de las aguas subterráneas, lo que lleva a la Tabla 3 que resume la evidencia de presencia de agua subterránea en la zona de estudio, pero muestra también que la profundidad a la que se encuentra varía considerablemente. Esta variación, que no es mostrada mediante el análisis satelital de imágenes SAR, resulta de gran

importancia ya que podrá ser tomada en cuenta en el caso de realizar construcción de pozos para el aprovechamiento de este recurso.

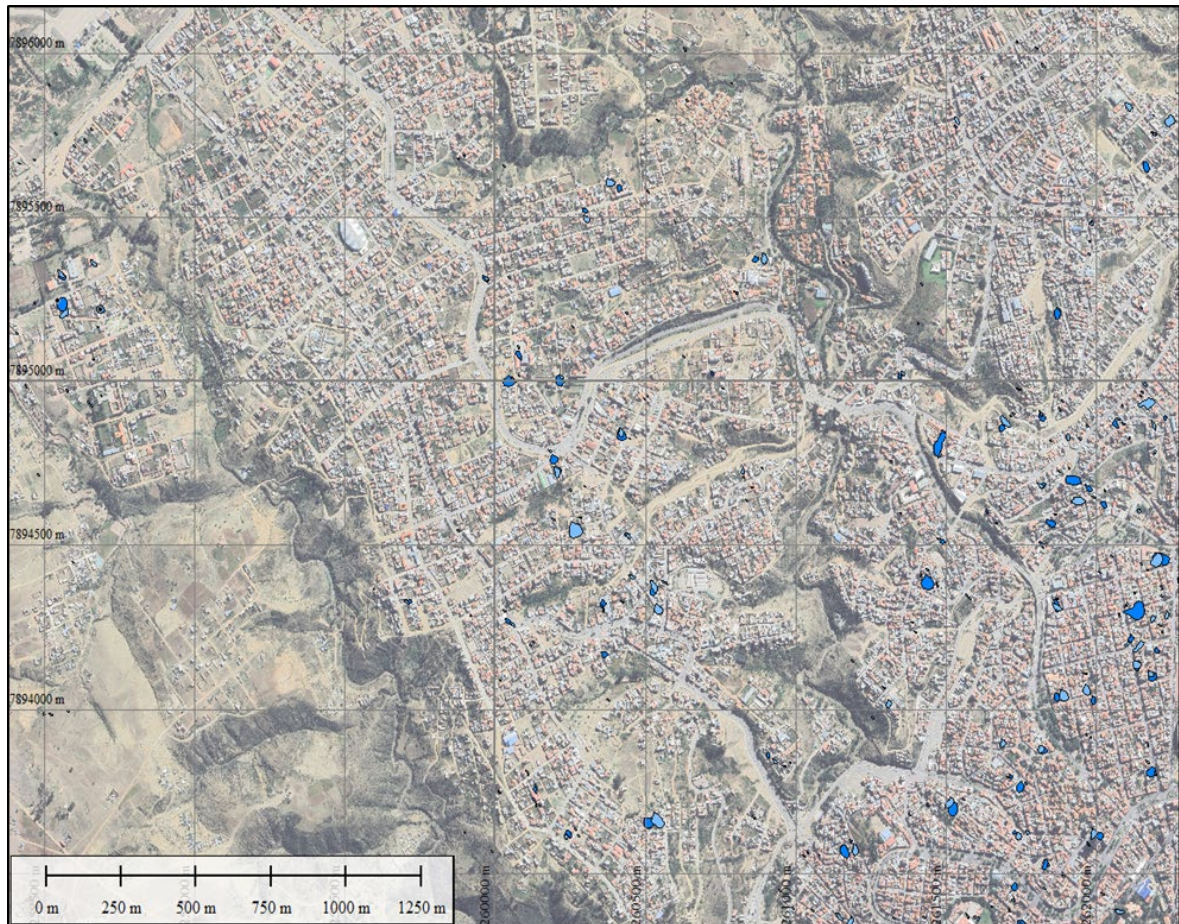
**Tabla 3.** Registro del estudio Geofísico realizado en Lajastambo

PUNTOS	PROFUNDIDAD	TIPO DE SUELO	NIVEL FREATICO	TIPO DE PERFORACION	FACTIBILIDAD
1	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	10	dura	buena
2	100 metros	Bolones, Areniscas, Margas y Sedimento	30	media	media
3	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	35	suave	media
4	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	dura	baja
5	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	dura	baja
6	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	media	baja
7	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	10	suave	buena
8	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	60	dura	baja
9	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	30	suave	buena
10	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	20	media	buena
11	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	suave	media
12	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	dura	baja
13	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	70	suave	media
14	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	media	media
15	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	90	dura	baja
16	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	30	suave	buena
17	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	65	suave	media
18	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	75	suave	media
19	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	105	suave	baja
20	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	40	suave	buena
21	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	60	suave	media
22	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	50	dura	media
23	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	40	dura	media
24	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	45	suave	buena
25	100 metros	Areniscas, Margas y Sedimento	35	dura	buena

Nota: Adaptado de (Peñaranda et al., 2025)

La tabla muestra el análisis de la información sobre el tipo de suelo, el nivel freático, el tipo de perforación y permitió la identificación de ocho puntos con alta factibilidad de ser aprovechados, los que se muestran espacialmente en la Figura 49, esta zona de la ciudad fue seleccionada debido a la alta demanda de agua potable que tiene, además por la accesibilidad de la misma.

**Figura 48:** Identificación espacial de los lugares con alto potencial para aguas subterráneas



Nota: Elaboración propia

## CONCLUSIONES

La Sistematización de la información bibliográfica relacionada al tema permitió obtener una base sólida de conocimientos sobre el uso de imágenes de Radar de Apertura Sintética SAR para la detección de aguas subterráneas. Se revisaron diversos estudios y publicaciones que describen metodologías y casos de aplicación similares en diferentes regiones del mundo.

- La literatura consultada resaltó la eficacia de las imágenes Sentinel-1 en la detección de cambios en la superficie terrestre y su utilidad en el monitoreo de recursos hídricos.
- La contextualización del área de interés de estudio fue fundamentada en una evaluación de los antecedentes históricos que tiene la ciudad de Sucre con el uso de aguas subterráneas.
- La ubicación geográfica y las condiciones específicas de Sucre, incluyendo la disponibilidad de datos hidrogeológicos previos, facilitaron un análisis detallado y preciso.
- El script desarrollado permitió procesar y analizar las imágenes de Radar de Apertura Sintética SAR eficientemente, identificando zonas potenciales de presencia de aguas subterráneas con alta precisión.
- La metodología incluyó técnicas de preprocesamiento, como la polarización de las señales electromagnéticas y posterior evaluación de la respuesta dieléctrica del suelo, demostrando de esta manera, ser una herramienta efectiva para el monitoreo y gestión de recursos hídricos subterráneos.

La validación de los resultados mediante la comparación con datos de campo y estudios hidrogeológicos existentes corroboró la capacidad del sistema para detectar y mapear zonas potenciales de aguas subterráneas con alta fiabilidad.

## RECOMENDACIONES

Es importante tener en cuenta que, aunque los resultados son prometedores, existen algunas limitaciones en cuanto a la resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales. Estos factores pueden afectar la precisión en la identificación de zonas potenciales de aguas subterráneas. Además, posibles interferencias debido a condiciones geomorfológicas y construcciones urbanas pueden influir en la interpretación de los datos. Por ejemplo, áreas urbanizadas pueden reflejar señales falsas o atenuar las señales que indican la presencia de agua subterránea. Estas consideraciones deben ser tratadas en futuros estudios para mejorar la precisión y aplicabilidad de las técnicas utilizadas. Además, se recomienda realizar estudios complementarios que aborden estas limitaciones para consolidar y reforzar los hallazgos iniciales.

- En resumen, la validación de los resultados muestra una alta correlación con datos confiables de ELAPAS y estudios geofísicos recientes, lo que refuerza la confianza en el uso de tecnología avanzada para la gestión de recursos hídricos. Sin embargo, es importante considerar las limitaciones actuales y trabajar para superarlas con el fin de maximizar la eficacia de estos métodos en el futuro.
- Este estudio no solo valida el uso de imágenes Sentinel-1 y Google Earth Engine en la detección de aguas subterráneas, sino que también establece una base metodológica que puede ser replicada y adaptada a otras regiones con características similares.

Se recomienda continuar con la implementación de esta metodología en otras áreas y en estudios a largo plazo para monitorear la dinámica de las aguas subterráneas, contribuyendo así a una gestión sostenible de los recursos hídricos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALEXANDER ARIZA, 2013. Descripción y corrección de productos LandSat 8 LDCM (<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>).
- ANDRÉS LEÓN, 2015. Descripción, descarga y manipulación de productos Sentinel-2 (<https://es.slideshare.net/AlejandroLeon31/guia-sentinel2-espaol>).
- calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. Remote
- CHANDER, G. & MARKHAM, B. 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 41, 2674 - 2677
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L., y HELDER, D. L. (2009). Summary of current radiometric
- CHUVIECO E, 1996. Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio.
- CHUVIECO SALINERO, E. 2008. Teledetección Ambiental. 2 ed. Barcelona, ES, Ariel. 592 p.
- Congedo Luca (2016). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>.
- EASTMAN, R. 2003. IDRISI Kilimanjaro-Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs. 312 p.
- JARS, 1993. Remote Sensing Note. Japan Association on Remote Sensing. Available at [http://www.jars1974.net/pdf/rsnote\\_e.html](http://www.jars1974.net/pdf/rsnote_e.html)
- JIMENEZ-MUNOZ, J. C. & SOBRINO, J. A. 2010. A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 7, 176-179.
- MOHR, P. J.; NEWELL, D. B. & TAYLOR, B. N. 2015. CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014 National Institute of Standards and Technology, Committee on Data for Science and Technology.
- NASA (Ed.) 2011. Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt, 186
- Peñaranda, I., Jesús, W., Díaz, J. P., Maygua, D., & Baca, Y. (2025). Identificación de Acuíferos Subterráneos Utilizando Imágenes Satelitales SAR y Técnicas de Prospección Geoeléctrica.

## ANEXOS

### ANEXO N° 1

#### ESTUDIO GEOFÍSICO

##### MATERIAL DE TRABAJO

Materiales utilizados en la fase de campo

- Electrodo
- Martillo de hammer
- Línea de levantamiento



LINEA DE  
LEVANTAMIENTO



MARTILLO PARA  
ELECTRODO



ELECTRODO



SONDEO ELECTRICO  
VERTICAL

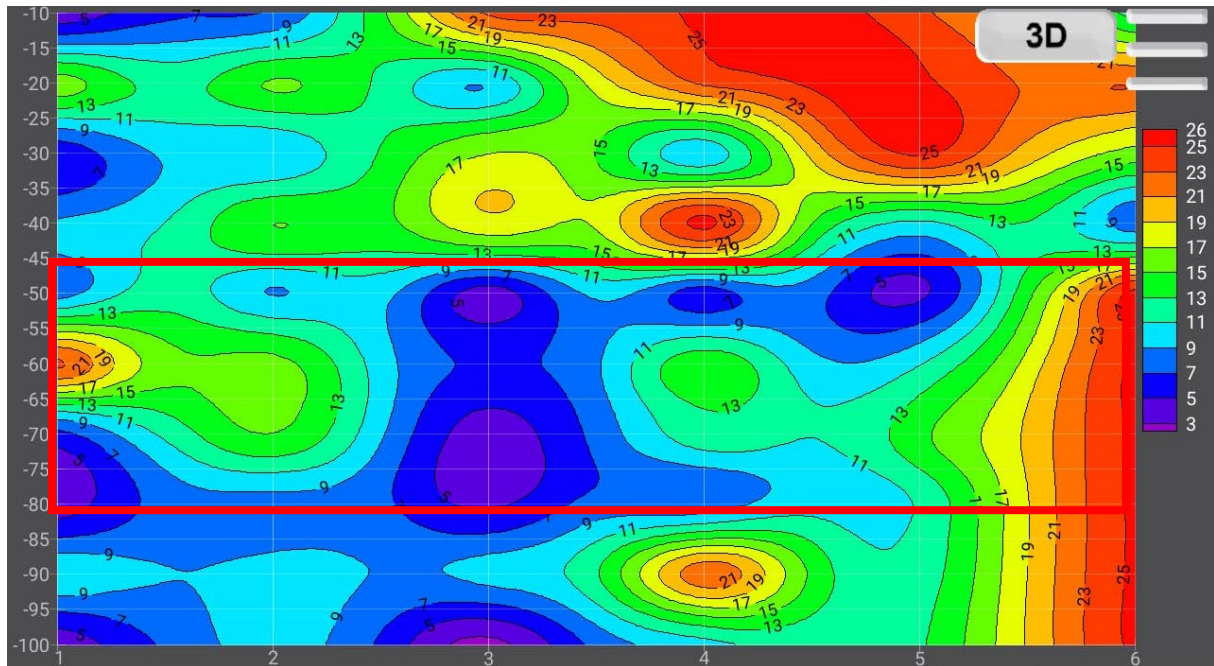
##### PERSONAL

Equipo de investigadores proyecto Puente USFX según Peñaranda et al. (2025)

## DATOS OBTENIDOS RESULTADOS

Obtenidos con el proyecto “Caracterización de acuíferos subterráneos utilizando técnicas de sondeo eléctrico vertical e imágenes térmicas satelitales para la zona de Lajas Tambo” Financiado a través del concurso de proyectos de investigación DICyT 2023 – USFX

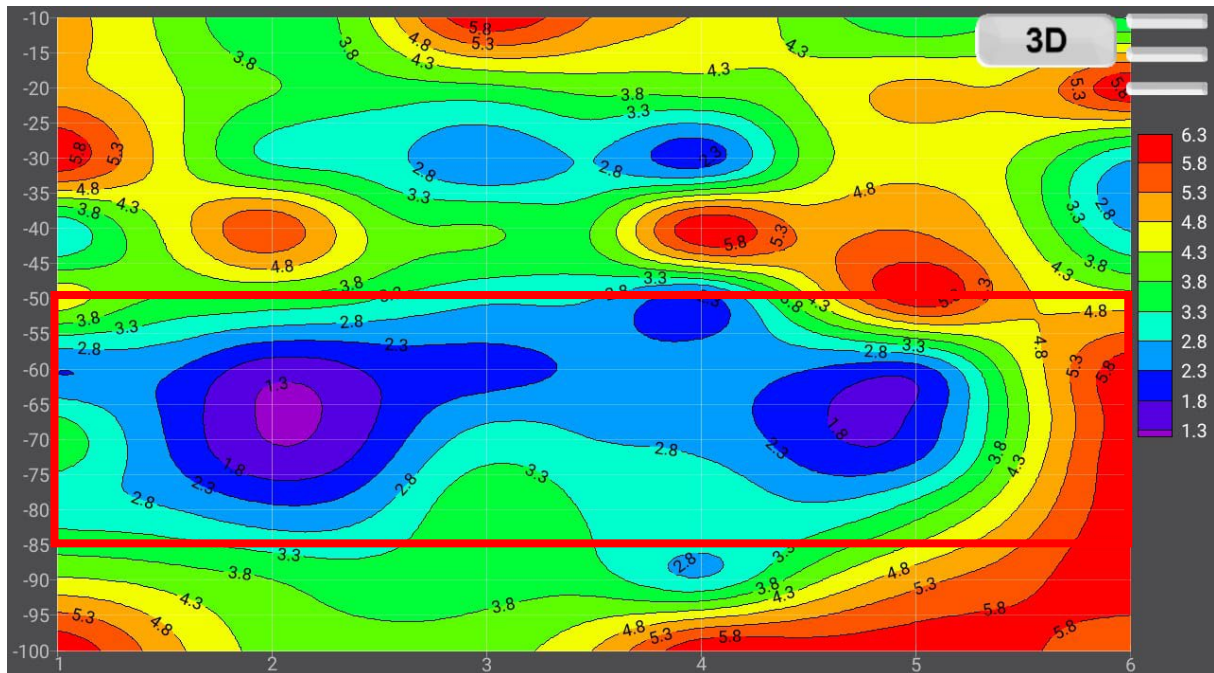
### CONCLUSIONES DE SEV JUANA AZURDUY KM4.5



En base a la información proporcionada, se pueden resumir los hallazgos de la siguiente manera:

- Se realizó un sondeo que alcanzó una profundidad de 100 metros.
- A lo largo del perfil, se observaron dos bloques principales: a. El primer bloque corresponde a bolones y arenisca. b. El segundo bloque corresponde a margas y sedimentos.
- Además, se detectó un nivel freático (nivel de agua subterránea) a una profundidad de 45 metros.

## CONCLUSIONES DEL SEV JUANA AZURDUY SAUNA



En base a la información proporcionada, se pueden resumir los hallazgos de la siguiente manera:

- Se realizó un sondeo que alcanzó una profundidad de 100 metros.
- A lo largo del perfil, se observaron dos bloques principales:
  - a. El primer bloque corresponde a bolones y arenisca.
  - b. El segundo bloque corresponde a margas y sedimentos.
- Además, se detectó un nivel freático (nivel de agua subterránea) a una profundidad de 50 metros.

## FOTOGRAFÍAS

**SEV HOSPITAL DEL NIÑO**



**RESULTADOS INSITU**



**SEV SUCRE ZONA CENTRAL**



**Algoritmo para Google Earth Engine**

```

aguas subterráneas 6 (copy) Get Link
- Imports (1 entry)
  ▶ var table: Table users/wilberjesus/SUCRE
1 // Wilber Jesus Salinas - script para identificar áreas propensas a aguas subterráneas
2 // SUCRE
3 //var roi = ee.Geometry.Point([-65.75276, -19.58605]); // Coordenadas de Sucre, Bolivia
4 var corte = function (image){
5   return image.clip(table);
6 }
7 // Definir el rango de fechas
8 var startDate = '2023-01-01';
9 var endDate = '2023-12-31';
10
11 // Filtrar imágenes Sentinel-1
12 var sentinel1Collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S1_GRD')
13   .filterBounds(table)
14   .filterDate(startDate, endDate)
15   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VV'))
16   .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH'))
17   .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')). map (corte);
18 // Calibrado las imagenes
19 var calibrated1 = image.select('VV').multiply(ee.Image.constant(10).pow(ee.Image.constant(0.1)));
20 var calibrated2 = image.select('VH').multiply(ee.Image.constant(10).pow(ee.Image.constant(0.1)));
21
22 // Función para calcular el índice de cambio (diferencia VH - VV)
23 var calculateChangeIndex = function(image) {
24   var vv = image.select('VV');
25   var vh = image.select('VH');
26   var changeIndex = vh.subtract(vv).rename('ChangeIndex');
27   return image.addBands(changeIndex);
28 };
29
30 // Aplicar la función de índice de cambio a la colección Sentinel-1
31 var sentinel1ChangeCollection = sentinel1Collection.map(calculateChangeIndex);
32
33 // Calcular la mediana de la serie temporal
34 var medianImage = sentinel1ChangeCollection.median();
35
36 // Visualizar el índice de cambio en el mapa
37 var visParams = {min: -10, max: 10, palette: 'green, white, red'};
38 Map.addLayer(medianImage.select('ChangeIndex'), visParams, 'Change Index');
39
40 // Generar una máscara basada en un umbral para identificar áreas propensas a aguas subterráneas
41 var threshold = 1;
42 var waterMask = medianImage.select('ChangeIndex').gt(threshold);
43
44 // Aplicar la máscara al índice de cambio
45 var maskedChangeIndex = medianImage.select('ChangeIndex').updateMask(waterMask);
46 var imagen = medianImage.select('ChangeIndex').updateMask(waterMask);
47 // Visualizar las áreas propensas a aguas subterráneas en el mapa
48 Map.addLayer(maskedChangeIndex, {palette: 'blue'}, 'Areas propensas a aguas subterráneas');
49
50 // descargar imagen
51 Export.image.toDrive({
52   image: medianImage.select('ChangeIndex').updateMask(waterMask),
53   description: 'aguas_subterranneas',
54   folder: 'aguasub',
55   region: table,
56   scale: 5,
57   maxPixels: 1e13
58 })
59
60 Map.setCenter(-65.259, -19.0454, 14):

```