

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y
Cartografía



**Sensores ópticos y radar para la obtención
de información geológica en el suroeste del
Ecuador - Provincia de El Oro**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Aracely Lima Abásolo

Magíster en Sistemas de Información Geográfica

Madrid, 2023



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
Escuela Técnica Superior de Ingenieros en
Topografía, Geodesia y Cartografía

Doctorado en Ingeniería Geomática

**Sensores ópticos y radar para la
obtención de información geológica en el
suroeste del Ecuador - Provincia de El
Oro**

TESIS DOCTORAL

Presentada para optar al título de Doctor por:

Aracely Lima Abásolo

Magíster en Sistemas de Información Geográfica

Bajo la dirección de:

Dr. Íñigo Molina Sánchez (Director)

Dr. Antonio Vázquez Hoehne (Codirector)

Madrid, 2023

Título: Sensores ópticos y radar para la obtención de información geológica
en el suroeste del Ecuador - Provincia de El Oro

Autor: Aracely Lima Abásolo

Programa de Doctorado: Doctorado en Ingeniería Geomática

Dirección de tesis:

Dr. Íñigo Molina Sánchez (Director)

Dr. Antonio Vázquez Hoehne (Codirector)

Revisores externos:

Tribunal de tesis:

Fecha de defensa:

“Porque en él vivimos, y nos movemos y somos”.

Hch. 17:28

Agradecimientos

A Dios creador del universo, gracias por estar siempre presente y ayudarme en tiempos difíciles.

A mi esposo Marlon Villón, columna fuerte en el matrimonio, gracias por suplir el tiempo que debía dar a mis hijos, gracias por tu ayuda y sacrificio.

A mi hijo Gabriel y Victoria (16 y 14 años) por su apoyo y comprensión incondicional.

A mis hermanos Margarita, Guadalupe y Hugo que siempre me animaron a culminar este importante reto.

A Beto, quien es otro hermano, gracias por el don de gente que eres.

Al Instituto de Investigación Geológico y Energético de Ecuador (IIGE), Dirección de Gestión Científica y Dirección de Gestión de la Información – Línea de Investigación Geomática – Sensores Remotos, que suministraron la información necesaria para el desarrollo de esta publicación.

Mi reconocimiento sincero al USGS, ASF, Google, ESA, DLR por proveer las plataformas en línea y datos obtenidos gratuitamente para fines de investigación.

A la Universidad Politécnica de Madrid y un agradecimiento muy especial al Dr. Íñigo Molina Sánchez y Dr. Antonio Vázquez Hoehne, profesores y directores de tesis, quienes, con su guía, apoyo y ayuda hicieron posible que pueda alcanzar una meta más.

Abstract

The advancement of geological mapping has become more efficient and effective with information extracted from remote sensing data. The current research performs a methodology that contains satellite data from optical and synthetic aperture radar, geospatial analysis, and data interpretation to extract preliminary information on geological contacts and structural lineaments, resulting in a base map before the geological field trip.

The synergy between optical and synthetic aperture radar satellite data with medium and high spatial resolution is suitable to solve the interest of Geological Surveys from developing countries to elaborate geological mapping, at regional scales such as 1:250,000; 1:100,000 (or 1:50,000 in areas priority). Generally, it is due to the limited availability of financial resources or the natural features particular for its geographic location, such as the lush vegetation and high cloud cover.

The purpose of the research consists of acquiring Landsat and ASTER optical sensors, complemented with ALOS PALSAR, Sentinel-1A/B, and TerraSAR-X radar sensors, to extract the geological information. The precision of the detected geological features depends on the spectral and spatial resolution of the images. The proceed reveals geological contacts with the most representative geological units, and interpreted structural lineaments. During the analysis carried out, boundaries of rock groups were detected that were not observed in the field trip, nor presented on the geological map.

The validation process in the case study consists of visual interpretation to compare the geological characteristics obtained through the interaction of the optical and radar sensors used, with the rock units and the structures of the geological map. The comparing results carried out show 81 % of similitude.

The proposed methodology could be used to generate new geological cartography and to update the historical cartography. Mainly, in remote areas with no geological maps, it is difficult to access due to the lack of roads and others with social conflicts due to the opposition to mineral resource exploitation.

Keywords: Geological mapping, remote sensing, optical images, radar images, SAR, geological contacts, geological units, structural lineaments.

Resumen

El avance de la cartografía geológica se vuelve más eficiente y eficaz con datos extraídos de los sensores remotos.

En este contexto el trabajo de investigación presenta un enfoque metodológico que incluye la selección de imágenes satelitales, el análisis geoespacial y la interpretación de los datos para la extracción de información preliminar de contactos geológicos y lineamientos estructurales, lo cual se plasma en un mapa base previo a la campaña geológica de campo.

La sinergia entre imágenes ópticas y radar de apertura sintética con resoluciones espaciales medias y altas, se convierte en una solución de mucho interés para los servicios geológicos de países en vías de desarrollo, que, por diferentes circunstancias, aún no han podido culminar la cartografía geológica a escalas regionales 1:250.000; 1:100.000 (o 1:50.000 en zonas prioritarias). Esto se debe generalmente a la disponibilidad limitada de recursos financieros o a las particularidades naturales especiales de su ubicación geográfica, como la presencia de exuberante vegetación y alto índice de nubosidad en el caso específico del Ecuador.

De esta forma el objetivo de la investigación consistió en el estudio de imágenes Landsat 8, ASTER complementadas con radar ALOS PALSAR, Sentinel 1 y TerraSAR X, para la obtención de información geológica.

La precisión de las características geológicas detectadas depende de la resolución espectral y resolución espacial de las imágenes. El resultado obtenido fue la detección de 11 contactos geológicos en las unidades geológicas más representativas y la señalización de 150 lineamientos estructurales. En el análisis realizado se detectaron límites de grupos de rocas que no habían sido observados en campo por el geólogo de campo y, por lo tanto, no se encuentran dibujados en el mapa publicado existente.

La validación de los resultados consistió en la comparación de las características geológicas detectadas mediante la interacción de los sensores ópticos y radar utilizados, con las unidades de rocas y estructuras del correspondiente mapa geológico publicado. Los resultados muestran el 81% de similitud en la validación efectuada.

La metodología empleada se puede utilizar preferentemente en la generación de nueva cartografía geológica y también en la actualización de la cartografía publicada. Es especialmente importante en zonas que no disponen de mapas geológicos, zonas remotas de difícil acceso por falta de vías de comunicación y otras con conflictos sociales por la oposición manifiesta a la explotación de recursos minerales.

Palabras Clave: Cartografía geológica, sensores remotos, imágenes satelitales ópticas, imágenes radar, contactos geológicos, unidades geológicas, lineamientos estructurales.

Tabla de Contenido

<i>Agradecimientos</i>	<i>iii</i>
<i>Abstract</i>	<i>iv</i>
<i>Resumen</i>	<i>v</i>
<i>Tabla de Contenido</i>	<i>vii</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>xi</i>
<i>Abreviaturas y acrónimos</i>	<i>xii</i>
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes de la investigación	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Hipótesis de trabajo	2
1.4. Aspectos generales del área de estudio.....	2
1.4.1. Climatología.....	2
1.4.2. Vegetación.....	7
1.4.3. Geomorfología.....	10
1.4.4. Contexto geológico	11
2. Estado del Arte	16
2.1. Teledetección aplicada a la geología.....	19
2.2. Sensores ópticos.....	25
2.2.1. Landsat.....	26
2.2.2. ASTER.....	29
2.3. Sensores radar.....	33
2.3.1. Principios básicos de funcionamiento radar	35
2.3.2. Plataformas satelitales SAR para geología.....	39
2.4. Métodos cualitativos y cuantitativos de interpretación.....	41
2.5. Análisis e interpretación geológica y geomorfológica.....	42
3. Metodología	45
3.1. Área de estudio.....	45
3.2. Datos satelitales y cartográficos	46
3.3. Metodología.....	46
3.4. Recopilación de datos e información	47
3.4.1. Preprocesamiento de las imágenes satelitales	56
3.4.2. Procesamiento, análisis e interpretación geológica a partir de imágenes ópticas y radar.....	62

4. Resultados.....	73
4.1. Mapeo de contactos geológicos	73
4.2. Mapeo de lineamientos por los métodos visual y automático	75
5. Limitaciones.....	83
6. Discusión.....	84
6.1. Recursos satelitales para el cartografiado geológico	84
6.2. Unidades geológicas y lineamientos estructurales	85
7. Conclusiones y futuras líneas de investigación	87
Bibliografía	90

Lista de Figuras

Figura 1: Sistemas atmosféricos tropicales	3
Figura 2: Tipos de clima – Provincia El Oro	4
Figura 3: Distribución temporal de precipitación – Año 2013.....	7
Figura 4: Mapa de Cobertura Vegetal.....	8
Figura 5: Mapa Geomorfológico.....	10
Figura 6: Esquema del marco geodinámico actual en el NW de América del Sur.....	12
Figura 7: Terrenos litológicos y dominios morfoestructurales del Ecuador.....	13
Figura 8: Mapa geológico regional del área de estudio	15
Figura 9: Comportamiento de la energía sobre la superficie terrestre	20
Figura 10: Espectro electromagnético.....	22
Figura 11: Amplitud y longitud de onda de una sucesión de onda.....	24
Figura 12: Línea del Tiempo de la Misión Landsat	26
Figura 13: (A) Sensor OLI; (B) Sensor TIRS	27
Figura 14: Distribución de bandas de ASTER y LANDSAT	30
Figura 15: Observación geométrica de una imagen tomada con radar	34
Figura 16: Zona del espectro de trabajo radar.....	36
Figura 17: Adquisición de una imagen radar	36
Figura 18: Onda electromagnética y sus componentes	37
Figura 19: Polarización de las ondas electromagnéticas, campo eléctrico.....	38
Figura 20: Ubicación del área de estudio. Hojas: Machala, Huaquillas y Santa Rosa.....	45
Figura 21: <i>Path</i> y <i>row</i> de la serie Landsat-8 OLI del área de estudio.....	50
Figura 22: Imágenes Landsat que cubren el área de estudio	50
Figura 23: Imágenes ASTER disponibles en el IIGE.....	51
Figura 24: Descarga de imágenes Alos Palsar.....	53
Figura 25: Descarga del Hi-Res Terrain Corrected	54
Figura 26: Descarga de Sentinel 1	54
Figura 27: Imagen TerraSAR X.....	55

Figura 28: Flujograma metodológico de preprocesamiento imágenes ópticas	58
Figura 29: Flujograma metodológico de preprocesamiento SAR.....	60
Figura 30: Flujograma de preprocesamiento	61
Figura 31: Flujograma metodológico para interpretación geológica	62
Figura 32: Mosaico de imágenes LANDSAT.....	65
Figura 33: Mosaico de imágenes ASTER.....	65
Figura 34: Mosaico de imágenes ASTER.....	66
Figura 35: Mosaico de Sentinel – 1.....	67
Figura 36: Mosaico de imágenes Sentinel-1 y Alos Palsar.....	68
Figura 37: Relación trigonométrica de la Transformada de Hough.....	69
Figura 38: Flujograma metodológico para interpretación de estructuras geológicas	72
Figura 39: Contactos geológicos interpretados superpuestos a las imágenes ópticas.....	74
Figura 40: Zoom del mapa geológico interpretado en mosaicos, combinaciones RGB y SAR	75
Figura 41: Estructuras geológicas superpuestas en la imagen TerraSAR X	76
Figura 42: Estructuras obtenidas con algoritmo LINE.....	77
Figura 43: Líneas de cartografía básica obtenidas por el método automático	78
Figura 44: Mapa geológico interpretado versus mapa geológico publicado.....	80
Figura 45: Diferencias de lineamientos interpretados versus fallas geológicas.....	81

Lista de Tablas

Tabla 1. Rango espectral de Landsat 8.....	28
Tabla 2. Características principales del sensor ASTER.....	31
Tabla 3. Nomenclatura estándar de bandas de frecuencia radar.....	39
Tabla 4. Operación satelital para aplicación geológica	40
Tabla 5. Datos de las imágenes satelitales ópticas Landsat-8 OLI y ASTER.....	49
Tabla 6. Los rangos espectrales y longitudes de onda de imágenes satelitales ópticas	52
Tabla 7. Principales características de las imágenes radar empleadas.....	55
Tabla 8. Combinaciones de bandas RGB analizadas	63
Tabla 9: Parámetros del algoritmo LINE predeterminados y calculados.....	70
Tabla 10: Objetos obtenidos con método automático	78
Tabla 11: Similitud entre áreas de las unidades geológicas del área de estudio	81

Lista de Fotos

Foto 1: Ejemplos representativos de especies de flora:.....	9
Foto 2: Laguna La Tembladera	9

Abreviaturas y acrónimos

ALOS	Advanced Land Observing Satellite
BAT	Bloque Amotape-Tahuín
CONAE	Comisión Nacional de Actividades Espaciales
DLR	Centro Alemán de Datos de Teledetección
ENVISAT	Environmental Satellite
ERSDAC	Earth Remote Sensing Data Analysis
ESA	European Space Agency
ESRI	Environmental System Research Institute
FBS	Fine Beam Single polarization
FBD	Fine Beam Dual polarization
GEE	Google Earth Engine
IEE	Instituto Espacial Ecuatoriano
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JERS-1	Japanese Earth Resources Satellite 1
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
NASA	National Aeronautic and Space Act (Administración Nacional de la Aeronáutica y de Espacio)
MDA	MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd.
MDE	Modelo Digital de Elevación
PALSAR	Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
PLR	Polarimetric mode
RADAR	Radio Detection and Ranging
SNI	Sistema Nacional de Información del Ecuador
SAR	Synthetic Aperture Radar
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TM	Thematic Mapper

1. Introducción

1.1. Antecedentes de la investigación

El Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) se encuentra ejecutando el Proyecto “Investigación geológica y disponibilidad de ocurrencias de recursos minerales en el territorio ecuatoriano”, el cual tiene como objetivo específico elaborar la carta geológica a escala 1:100.000 del territorio continental ecuatoriano; así como la carta geológica 1:50.000 en las zonas de interés minero.

La autora del presente trabajo forma parte del grupo de investigadores del IIGE que tiene como línea de investigación: “Tecnologías de la Información Geoespacial”. A partir del año 2014, se encuentra incursionando en los sensores remotos aplicados a la geología. Hasta el momento se han obtenido algunos resultados con el uso de imágenes ópticas, principalmente con el procesamiento de imágenes ASTER, sin embargo, se requiere complementar con otros denominados radar de apertura sintética (SAR).

Bajo este contexto, la investigación realizada se encuentra bajo el auspicio del Instituto de Investigación Geológico y Energético de Ecuador (IIGE), recoge experiencias e incluye los avances alcanzados con imágenes ópticas y la incursión en sensores radar como una herramienta complementaria.

1.2. Objetivos

Objetivo General

Desarrollar una metodología de trabajo utilizando sensores ópticos y radar para obtener información geológica previa y análisis post campo.

Objetivos Específicos

- Estudiar las características de las imágenes de partida provenientes de sensores ópticos y radar en lo relativo a su aplicación geológica.

- Evaluar el procesamiento de las imágenes ópticas y radar para identificar objetos geológicos de interés para la cartografía geológica, a partir del caso considerado en la tesis.
- Analizar los mecanismos de interpretación previa y post campo de imágenes procesadas para obtener mapas con información geológica, a partir del caso aplicado en la tesis.

1.3. Hipótesis de trabajo

De acuerdo a los estudios realizados hasta el momento, se cree que las regiones que abarcan el infrarrojo de onda corta, el infrarrojo térmico y el microondas del espectro electromagnético, permiten a los sensores captar imágenes para la obtención de información geológica preliminar; es decir que en ciertas longitudes de onda se puede analizar el comportamiento de distintos materiales, hipótesis que debe ser comprobada en este trabajo de investigación.

1.4. Aspectos generales del área de estudio

1.4.1. Climatología

El Ecuador se ubica geográficamente en el hemisferio norte y sur, la zona ecuatorial está incluida en la zona tropical o zona tórrida, regionalmente es afectado por sistemas atmosféricos de baja presión en período lluvioso y sistemas atmosféricos de alta presión en período seco.

Los sistemas atmosféricos de baja presión, en el período lluvioso son:

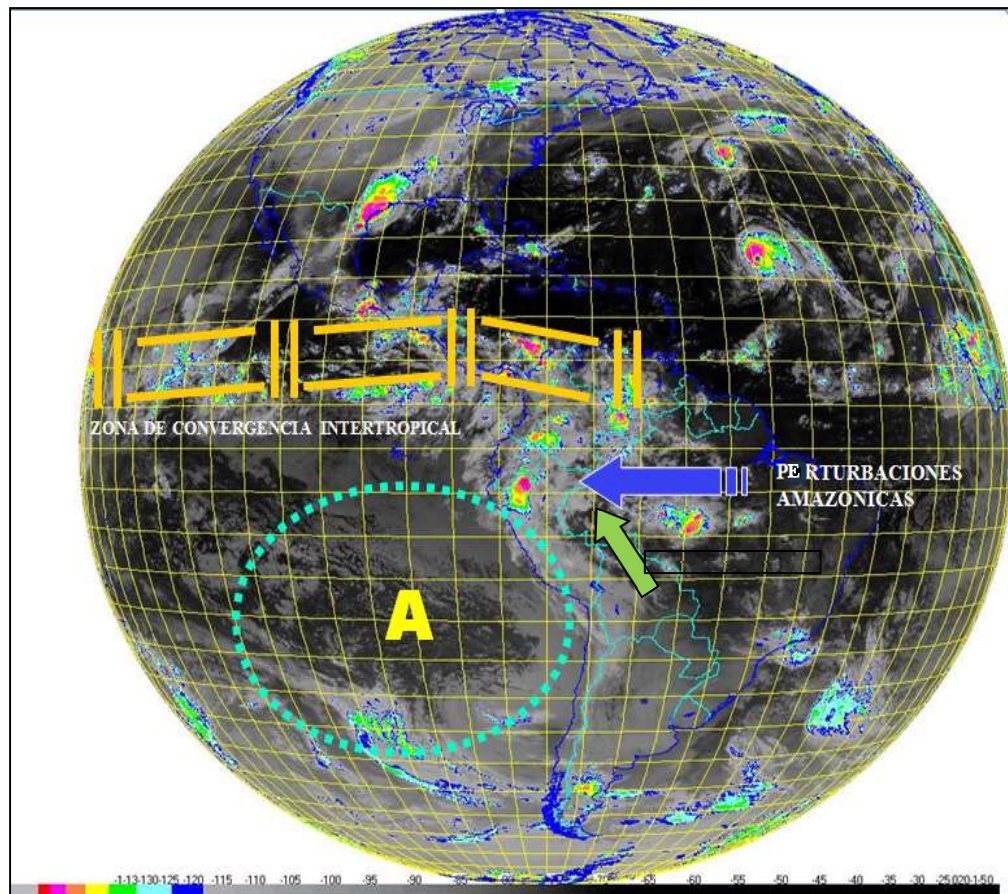
1. La Zona de Convergencia Intertropical
2. Las perturbaciones de la cuenca Occidental de la Amazonía, y
3. La Vaguada del Perú

En la época seca, los sistemas de alta presión atmosférica que dominan la región son:

4. El Alta del Pacífico Sur (Anticiclón - A)
5. La dorsal del Alta del Caribe (Dorsal del Caribe), y
6. La incidencia del Alta troposférica de Bolivia.

La incidencia estacional de estos sistemas atmosféricos (Figura 1) caracteriza el régimen pluviométrico y térmico en las cuatro regiones naturales del Ecuador, entre ellas, la Costa o Litoral donde se encuentra el área de estudio.

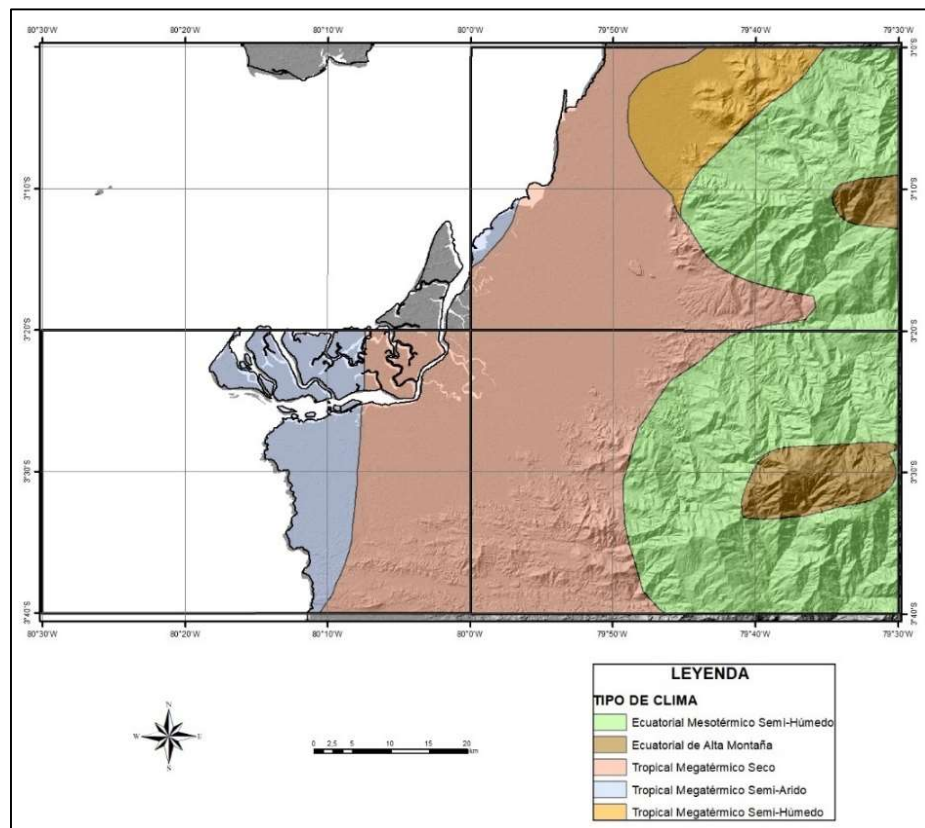
Figura 1: Sistemas atmosféricos tropicales



El clima del área de estudio es de tipo tropical, influenciado de manera determinante por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), con las corrientes fría de Humboldt principalmente y la corriente cálida de El Niño en menor grado, estos fenómenos ocasionan perturbaciones en el régimen de lluvias y vientos.

La figura 2 muestra los tipos de clima predominantes: Tropical Megatérmico Seco y Ecuatorial Mesotérmico Semi-Húmedo.

Figura 2: Tipos de clima – Provincia El Oro



El clima tropical megatérmico seco se caracteriza por tener altas temperaturas durante todo el año y una marcada estación seca. La pluviometría anual está comprendida entre 500 y 1000 mm entre enero y abril.

El clima ecuatorial mesotérmico semi-húmedo, es el más frecuente en la zona andina, a excepción de las zonas con una altura mayor a los 3000 – 3200 m y algunos valles.

La pluviometría anual, distribuida en dos estaciones lluviosas, está comprendida entre 500 y 2000 mm. Las temperaturas medias se sitúan entre 10 y 20°C y la humedad relativa entre el 65 y el 85%.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI), es la institución rectora que suministra información sobre el tiempo, el clima y los recursos hídricos. La disponibilidad de información es medianamente accesible, la poca información disponible está desactualizada. Sin embargo, se ha recopilado información histórica existente procedente de los anuarios meteorológicos del INAMHI disponibles.

1.4.1.1. Humedad Relativa

En general la zona de estudio tiene humedad relativa del aire elevada durante todo el año, fluctúa entre 79 y 89 %. La humedad relativa promedio es del 77 %.

Los valores de humedad fluctúan en íntima relación con los períodos lluviosos. En períodos secos el régimen de humedad es árido.

1.4.1.2. Nubosidad

El área de estudio tiene dos estaciones principales: la estación seca y la estación lluviosa. Durante la estación seca, es más común el cielo despejado con algunas nubes dispersas (INAMHI, 2017). En la estación lluviosa la nubosidad es máxima, en el día suele ser máxima alrededor de las 14h00, momento de máxima ascendencia del aire (ECOSFERA, 2017). En esta temporada, se forman nubes de tormenta y se producen lluvias frecuentes.

1.4.1.3. Insolación

Por su ubicación geográfica, generalmente experimenta una cantidad significativa de insolación y heliofanía a lo largo del año. La zona de investigación tiene una insolación con valores comprendidos entre 850 y 1050 horas de sol por año.

El promedio mensual de la heliofanía es de 4 horas por día, siendo los meses de diciembre a mayo los de mayor heliofanía y los meses de agosto a noviembre los de menor heliofanía (ECOSFERA, 2017).

1.4.1.4. Temperatura del aire

De acuerdo a datos del INAMHI (2018), la temperatura media del aire en la región costa del Ecuador oscila entre los 24 y 25°C. Sin embargo, puede llegar a ser menor a 22°C en zonas de cordillera (Varela y Ron, 2018).

La temperatura media anual de la provincia de El Oro se ubica en los 24 °C, con insuficiencia de humedad en los suelos durante los meses de junio a diciembre, se distribuye ajustándose a la topografía predominante y disminuye del piedemonte hasta la llanura costera. Los meses con mayor temperatura son de marzo a mayo.

1.4.1.5. Evaporación

La evaporación tiende a ser alta debido a las altas temperaturas y la intensa radiación solar durante todo el año. Durante la estación seca, la evaporación tiende a ser aún mayor debido a la falta de lluvias y al aumento de la exposición solar.

La presencia y proximidad de cuerpos de agua, como ríos y embalses, también puede influir en la tasa de evaporación del área de estudio; y, la vegetación existente influye en la cantidad de agua que se transpira.

La evaporación promedio mensual incluida la transpiración presenta valores de 94 mm, con registros máximos de 108 mm en enero y mínimos de 80 mm en septiembre (ECOSFERA, 2017).

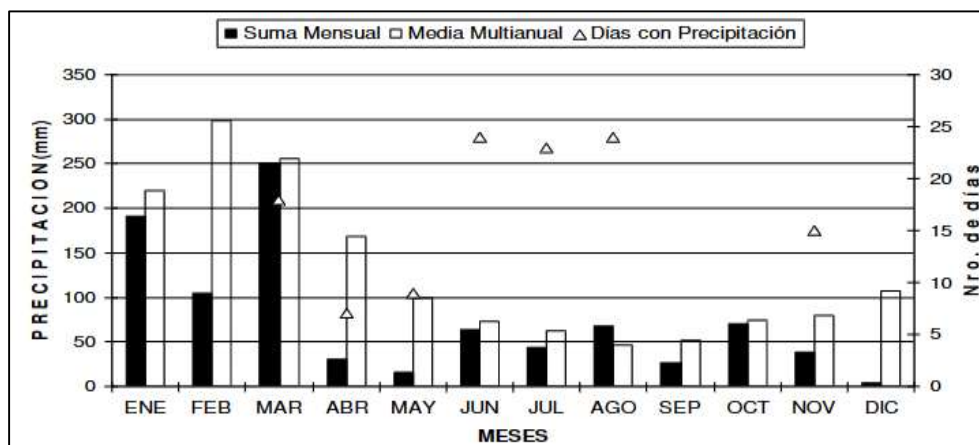
1.4.1.6. Velocidad del viento

Los vientos predominantes y de mayor magnitud, tienen influencia de los cuadrantes suroeste y noroeste en período seco, mientras que en período húmedo aparecen vientos en el cuadrante noreste. En general, es posible que el área experimente períodos de “calma” en los que la velocidad del viento es muy baja o prácticamente nula.

La velocidad del viento varía entre 2 y 4 m/s en promedio anual, siendo mayor durante la época seca de junio a octubre y menor en la época húmeda de enero a abril (Vargas et al. 2014).

1.4.1.7. Precipitación

La precipitación en la zona se produce principalmente entre los meses de enero a abril, mientras que el resto del año se caracteriza por ser seco. Los meses de mayor precipitación son febrero y marzo; siendo los más secos los correspondientes a los meses de agosto y septiembre (Figura 3).

Figura 3: Distribución temporal de precipitación – Año 2013

Fuente: INAMHI, 2017

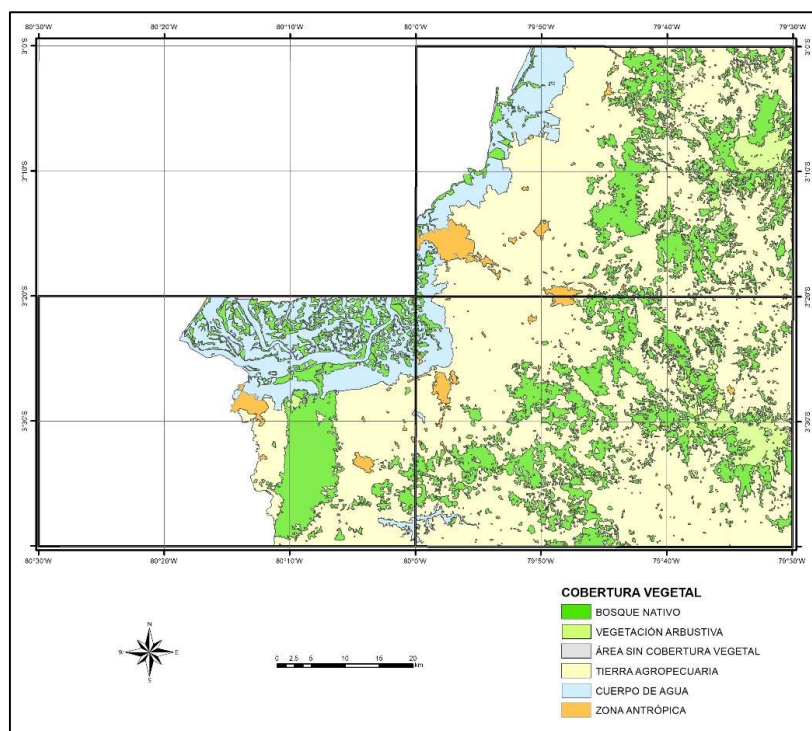
La estrecha faja litoral al pie de la vertiente andina que se prolonga hasta Machala y Huaquillas, presenta una precipitación anual aproximada de 905 mm. Existe también una zona seca que continúa al suroeste entre Machala y Huaquillas, por la prolongación del desierto costero peruano. Las precipitaciones decrecen rápidamente en la proximidad de la frontera con Perú, donde alcanzan los límites del clima árido.

Las condiciones climáticas en la región se ven frecuentemente influenciadas por el gradiente mayor de disminución de las precipitaciones al sur del país.

1.4.2. Vegetación

La provincia de El Oro es conocida por su diversa vegetación. Presenta una variedad de ecosistemas debido a su topografía y clima variado. La figura 4 muestra el mapa de la cobertura vegetal.

Figura 4: Mapa de Cobertura Vegetal



Fuente: MAATE, 2019

En el área de estudio la vegetación de bosque tropical primario fue reemplazada por la *tierra agropecuaria* para la siembra de café, cacao, banano y pastizales.

La llanura de inundación marina está poblada de manglares que bordean el oeste del área de estudio, los manglares son esenciales para la biodiversidad marina y costera de la zona. Existen varios *cuerpos de agua* que también albergan manglares, algunos se han transformado para dar paso a la acuicultura.

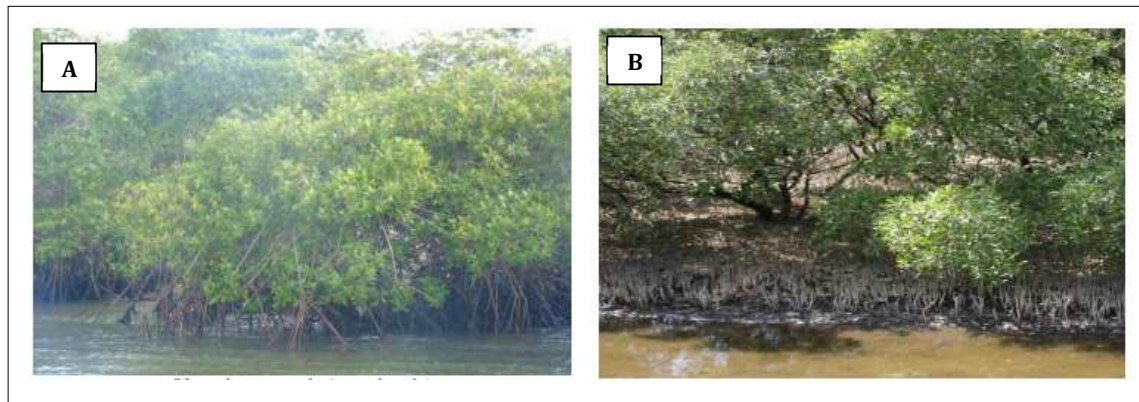
A medida que se asciende a la cordillera, la vegetación pasa de bosque tropical húmedo a *vegetación arbustiva* y pajonales en los páramos; gran parte de la superficie en la cordillera está ocupada por pastizales y cultivos de ciclo corto.

El *área sin cobertura vegetal* y el substrato rocoso no favorecen la retención de aguas de lluvia, lo que explica en parte el aumento del cauce en época de invierno y la fuerte carga de sedimentos en suspensión de los ríos en su curso inferior (SNI, 2015).

Partiendo desde el canal de Jambelí al oeste de Machala, una muestra de la especie que representa más del 90% de los manglares es el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), no solamente por su frecuencia (número de individuos) sino también por su altura y diámetro como se puede ver en la Foto 1, con especies asociadas existe el mangle blanco (*Laguncularia racemosa*), mangle jeli (*Conocarpus erectus*), el mangle iguanero (*Avicennia nítida*) y en forma esporádica el piñuelo (*Pelliciera rhizophorae*).

Foto 1: Ejemplos representativos de especies de flora:

(A) *Rhizophora mangle*; (B) *Avicennia germinans*



Fuente: Archivo fotográfico de Ecosfera Cía. Ltda., 2017

Después de los manglares y dependiendo de la topografía se pueden encontrar también las sabanas o tembladeras con vegetación acuática, son humedales que se inundan durante todo el invierno, estas son fajas de tierra salinas o alcalinas de diferente ancho y con un drenaje deficiente, están cubiertas por arbustos pequeños y tolerantes a la salinidad, estos terrenos están siendo usados en forma extensiva para el cultivo de camarón (L. León, 2012).

Foto 2: Laguna La Tembladera



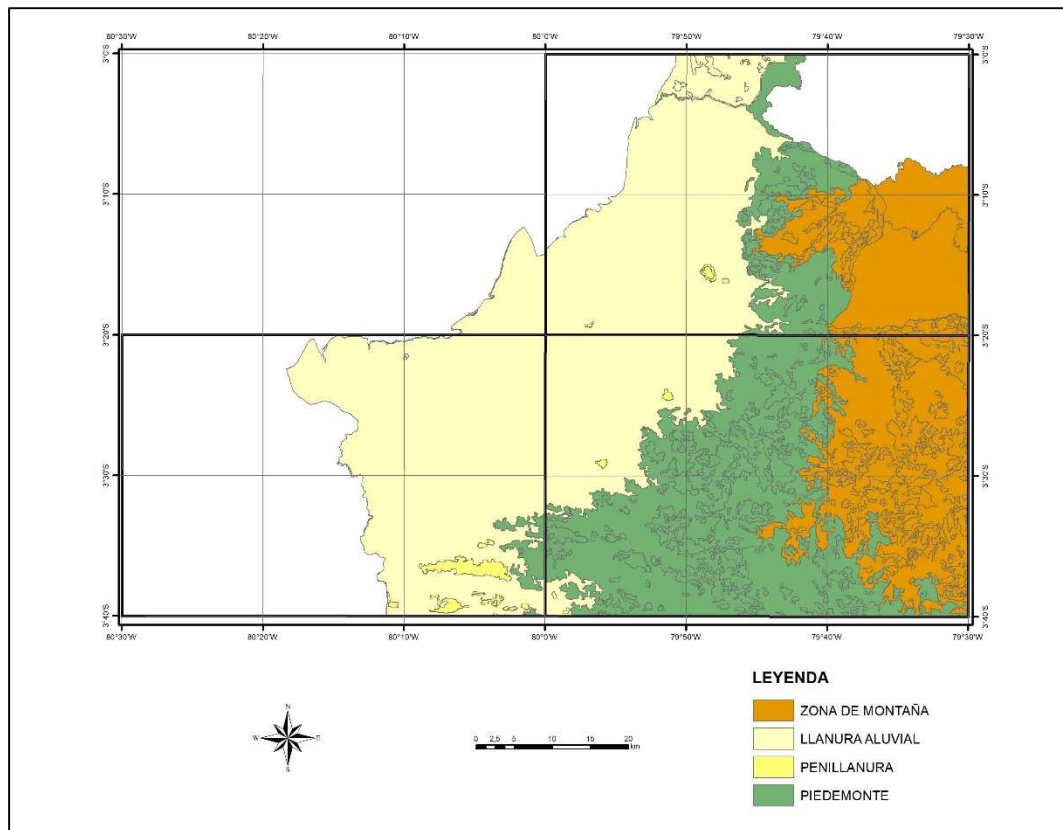
Fuente: Viajando¹

¹ <https://ec.viajandox.com/santa-rosa/laguna-la-tembladera-A1350>

1.4.3. Geomorfología

La zona de estudio tiene una variedad de características geomorfológicas, que incluyen la baja llanura aluvial inundable del Guayas, el piedemonte y la zona montañosa (Figura 5).

Figura 5: Mapa Geomorfológico



Fuente: MAGAP-SIGTIERRAS, 2015

La llanura aluvial inundable comprende las tierras bajas que van desde los 0.5 m s.n.m. en la orilla del mar, hasta los 300 m s.n.m.; se prolonga por la franja costanera meridional Naranjal-Machala-Huaquillas, correspondientes a los cantones Machala y Santa Rosa, en esta zona se encuentra una subzona de manglares, desde la ensenada de Tumbes que continúa por el Este de Santa Rosa y abarca las islas del Archipiélago de Jambelí (Gobierno Provincial Autónomo de El Oro, 2014). El área está sometida a inundaciones anuales en la estación lluviosa.

Existe también una subzona de sabanas desde Santa Rosa, por las cercanías de Machala y llega hasta cerca del Río Jubones. Son lugares que se inundan en el invierno, no se prestan

para la agricultura, pero si para la crianza de ganado. Cuando llega el verano las sabanas se secan y presentan un terreno arcilloso. En las sabanas se encuentran las tembladeras que son extensiones de agua que permanecen estancadas y son alimentadas por diferentes ríos (Gobierno Provincial Autónomo de El Oro, 2014).

El piedemonte se ubica entre los conjuntos sedimentarios costaneros al Oeste y la cordillera andina al Este. Según Winckell (1997), la zona de estudio abarca un relleno de sedimentos detríticos cuaternarios de origen continental, aluvial, fluvio-lacustre a fluvio-marino, forma parte de una depresión topográfica creada por una fosa de subsidencia. Con un ancho general comprendido entre 50 y 100 km en su parte Norte, se estrecha en el sector de Guayaquil-Naranjal para solo subsistir al Sur como una estrecha franja de 10 a 30 km de ancho hasta Machala y Huaquillas.

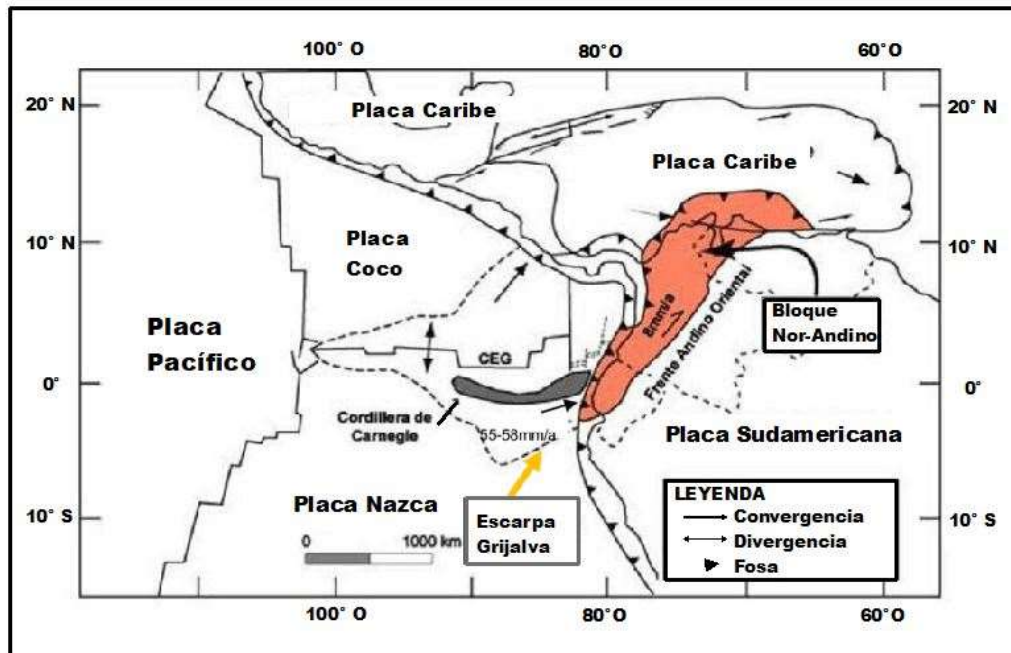
Desde el centro Norte del Ecuador hasta Machala en el Sur, se extiende una serie continua de conos de piedemonte, de deyección y de esparcimiento.

En cuanto al relieve de montaña, comprende las tierras altas que llegan hasta los 3.580 m s.n.m m. La zona alta con ligero relieve montañoso, es de carácter subtropical, también hay terrenos de zonas frías, zonas templadas y zonas cálidas.

1.4.4. Contexto geológico

El Ecuador se localiza en la parte noroccidental de América del Sur, su evolución geológica está controlada por la interacción de las placas Nazca, Caribe, Coco y Sudamericana (Figura 6). La cordillera oceánica de Carnegie se sumerge bajo la litosfera continental Sudamericana (Collot et al. 2009).

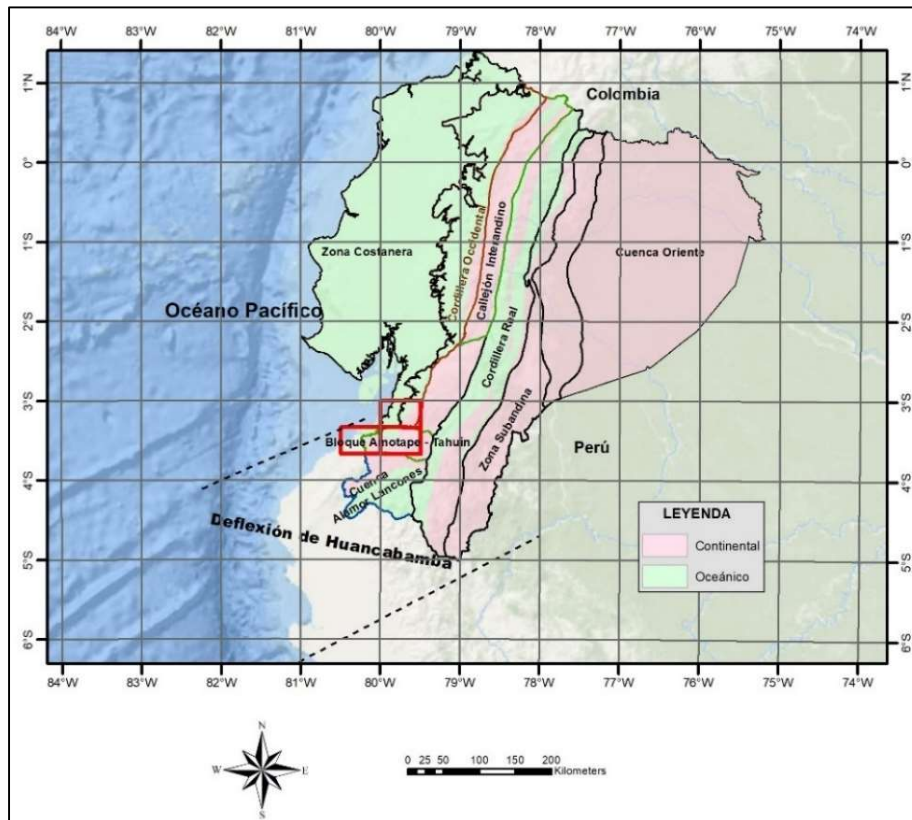
Figura 6: Esquema del marco geodinámico actual en el NW de América del Sur



CEG=Centro de Expansión Galápagos

Fuente: Modificado de Pennington, 1981

El territorio continental del Ecuador está constituido por diferentes terrenos litotectónicos, que tienen relación con los dominios morfoestructurales existentes (Paladines, 1989; Litherland et al., 1994, Yáñez, 2016). De oeste a este forman la Zona Costanera, Cordillera Occidental, Callejón Interandino y Cuencas Intramontañosas, Cordillera Real, Zona Subandina, Cuenca Oriente; además del Bloque Amotape -Tahuín y Cuenca Alamor Lancones en el suroeste del país como se muestra en la figura 7, (INIGEMM, 2017; Calero, 2019).

Figura 7: Terrenos litológicos y dominios morfoestructurales del Ecuador

Fuente: Paladines, 1996; IIGE, 2017

Crédito Mapa Base: ESRI, Garmin, GEBCO, NOAA N GDC y otros

La cordillera de los Andes forma el eje principal del Ecuador. En el sur la tendencia de los Andes cambia absolutamente, relacionada posiblemente a un importante límite geológico o zona de flexión denominada deflexión de Huancabamba (Baldock, 1982; Mitouard et al., 1990; Paladines y Rosero, 1996), que define la transición entre los Andes Centrales y los Andes Septentrionales (Kissel et al., 1992; Paladines y Rosero, 1996; Sánchez et al., 2006). Considerada como una mega estructura de deformación, corresponde al último episodio de acreción del Jurásico – Cretácico Inferior, que involucró tanto a unidades continentales como oceánicas (Litherland et al., 1994), donde se presenta la mayor cantidad de mineralización metálica, relacionada con rocas intrusivas en contacto con rocas volcánicas o rocas carbonatadas (IIGE, 2019a).

La geología del área de investigación, corresponde al Bloque Amotape-Tahuín BAT (Mourier, 1988). El BAT está constituido por las rocas metamórficas más antiguas (gneises, micaesquitos y sedimentos epimetamórficos), que a su vez está conformado

por los Grupos Piedras y Tahuín, atribuidos respectivamente al Precámbrico y al Paleozoico (Feininger, 1978, Feininger y Silberman, 1982). A estas formaciones se encuentran asociadas rocas ultrabásicas (metamorfismo de alta presión).

De igual forma, se atribuye al BAT otras litologías que van desde el Paleozoico hasta el Cretácico (Aspden et al., 1995), agrupadas en varios terrenos bajo el nombre de “Complejo Metamórfico de El Oro” (Bosch et al., 2002). Estos terrenos son grandes bloques desplazados (Mourier, 1988; IIGE, 2019ab) que han sido interpretados como cuerpos alóctonos o parautoctonos independientes (Feininger y Bristow, 1980; Feininger, 1987; Bourgois et al., 1987; Aspden y McCourt, 1986). En el Jurásico tardío-Cretácico temprano se emplaza el Complejo Ofiolítico Raspas que es una escama obductada de una corteza oceánica subducida (Bosch et al., 2002; John et al., 2010).

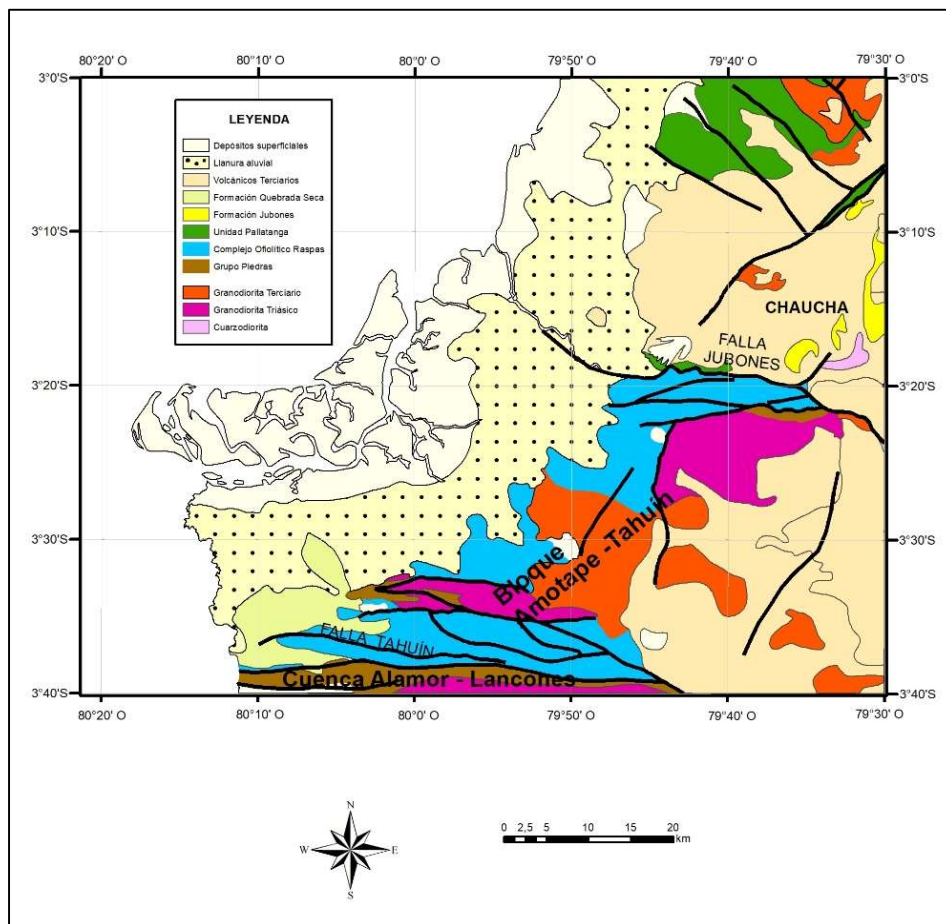
Al SE de los afloramientos metamórficos del BAT, se ubica la cuenca volcano-sedimentaria cretácica Alamor-Lancones (Kennerley, 1973; Reyes-Rivera y Caldas-Vidal 1987). El basamento metamórfico está cubierto discordantemente por el volcanismo continental terciario (Dunkley, y Gaibor, 1997). Estos eventos volcánicos tienen sus equivalentes magmáticos con intrusiones de composición predominantemente granodiorítica.

La geología del área de estudio aún se vuelve más interesante porque está determinada por el control estructural tanto a nivel regional como local.

Debido a la deflexión de Huancambamba, las principales estructuras del Ecuador con dirección preferencial N-S, en el sur del Ecuador cambian completamente y muestran un segmento E-O (fallas transversales) de la Cordillera de los Andes y que forman parte del BAT, cuya presencia hasta la actualidad dificulta el entendimiento de la evolución geológica de esta parte del Ecuador.

Según Yépez (2015) el origen de la ubicación y dirección de este segmento E-O es muy discutido aún, por cuanto su presencia rompe el esquema NS o NNE de los Andes ecuatorianos, numerosos geólogos han tratado de explicar el porqué de su presencia, se habla de microplacas, rotación de bloques, entre otros; es por ello que, es necesario se realicen nuevos estudios que clarifiquen lo que ocurre en la zona.

La figura 8 muestra el mapa geológico regional del área de estudio.

Figura 8: Mapa geológico regional del área de estudio**Fuente:** IIGE, 2017

2. Estado del Arte

La observación de la Tierra desde el espacio ha encontrado muchos usos en las ciencias naturales, más es, en las últimas décadas que los avances tecnológicos también se han extendido hacia la aplicación geológica (e.g., Singhroy, 1995; Massonnet y Feigl, 1998; Ferretti et al., 2001; Hernández y Moragues, 2002; Thurmond et al., 2006, Hong et al., 2007; Martha et al., 2010; Ferretti et al., 2011).

Una de las actividades prioritarias de los Servicios Geológicos a nivel mundial, es culminar la cartografía geológica del territorio nacional. Los mapas geológicos no solo resultan cruciales para la planificación y construcción de obras de infraestructura, prevención de amenazas geológicas y evaluación de riesgos para el ordenamiento territorial, sino que también son clave para la prospección y exploración de recursos minerales (e.g., Brusi et al., 2000; Ramli et al., 2010; Oyarzun, 2011, Gutiérrez et al., 2013; Herrera, 2017; ASGMI, 2020).

Los gobiernos invierten ingentes cantidades de dinero para la localización de nuevas zonas prospectivas de interés geológico - minero, y para ello, primeramente, el país debe completar la cartografía geológica a nivel regional de cobertura nacional, por lo menos en escalas regionales como son 1:250.000, 1:100.000 y en zonas prioritarias en escala 1:50.000.

Un mapa geológico muestra la distribución de unidades de rocas y estructuras geológicas a lo largo de una región, generalmente en una superficie plana (Njue, 2010; Echeveste, 2018). En los mapas geológicos se representa la distribución de diferentes tipos de rocas expuestas en la superficie (SEGEMAR, 2007; ASGMI, 2020). Generar un mapa geológico no es una tarea sencilla considerando que se deben explorar, interpretar y estudiar los diferentes tipos de roca en áreas muy extensas.

El levantamiento de la cartografía geológica constituye una faena larga y costosa; utilizando los sensores remotos se pueden optimizar tiempo y recursos. La percepción remota es una técnica efectiva que permite la detección de objetos, características, áreas o fenómenos situados sobre la superficie terrestre, sin mantener contacto físico con ellos, constituyendo, por lo tanto, una herramienta no destructiva y de gran utilidad en el campo de la geología y ciencias afines (e.g., Bernknopf et al., 1993, Claverol 1993, SEGEMAR 2007, Cobb 2016, ASGMI 2020).

Básicamente, la calidad de un mapa geológico depende de la exactitud y precisión del trabajo de campo. Según Njue (2010), hoy en día la interpretación de la cartografía puede ser más acertada y más precisa por la resolución que tienen las imágenes satelitales, las técnicas utilizadas, el uso de equipos de alta tecnología y precisión.

A lo largo del tiempo, el avance de la cartografía geológica usando teledetección muestra que esta técnica se encuentra en auge y es usada cada vez más en la actualidad, pero es mayormente utilizada en zonas semiáridas y secas (e.g., Ramadan, 2003; Abrams y Yamaguchi, 2019; Chakouri et al., 2020).

Se señalan una serie de aportaciones significativas aplicadas a detecciones concretas de roquedos o minerales, aunque no a un reconocimiento cartográfico general, como se plantea en esta tesis.

En el año 2003, Rowan y Mars fueron los primeros investigadores en el mapeo litológico utilizando datos ASTER, sobre el depósito de minerales de tierras raras en Mountain Pass, California, pudieron distinguir calcita de dolomita, depósitos de skarn mapeados y mármol en las zonas metamórficas de contacto, distinguieron Fe-moscovita de Al-moscovita en los granitos y gneises, y discriminaron rocas cuarzosas. Ninguna de estas discriminaciones se pudo lograr con los datos de Landsat TM, debido a la falta de bandas espectrales SWIR y TIR multiespectrales. Watts y Harris (2005) aplicaron este método para cartografiar granito y gneis en cúpulas del Himalaya.

Por su parte Yamaguchi y Naito (2003) desarrollaron índices espectrales usando transformación ortogonal con bandas ASTER SWIR para el mapeo litológico. Su método se basó en proporciones de bandas y umbrales, en afloramientos expuestos, los datos de ASTER produjeron buenos resultados.

Al analizar todas las bandas espectrales de ASTER, Byrnes et al. (2004) mapearon los flujos de lava volcánica de la erupción de Maunu Ulu, isla de Hawái. Los datos de TIR destacaron variaciones en los recubrimientos de sílice, las bandas VNIR y SWIR indicaron edades relativas de los flujos a medida que desarrollaban productos de meteorización superficial.

Gómez et al. (2005) publicaron un artículo que describe el mapeo litológico en las zonas áridas de Namibia utilizando las bandas VNIR y SWIR de ASTER. Primero convirtieron los datos en reflectancia aparente, luego los procesaron con análisis de componentes principales y clasificación supervisada. La comparación con un mapa geológico existente a escala 1:250.000 indicó que los datos ASTER podrían usarse para discriminar la mayoría de las unidades geológicas. Se encontraron varias unidades adicionales, basadas en diferencias de composición, aunque el mapa geológico las definió como pertenecientes a la misma unidad estratigráfica.

Una de las primeras aplicaciones de los datos ASTER TIR para el mapeo litológico fue publicada por Ninomiya et al. (2005). Desarrollaron índices mineralógicos utilizando proporciones combinadas de las bandas TIR para crear un índice de cuarzo, un índice de

carbonato y un índice máfico; luego probaron su técnica en partes áridas del noroeste de China, el este de Australia central y el sur del Tíbet. Sus resultados demostraron la estabilidad de los índices minerales a la temperatura y los cambios atmosféricos. En los años siguientes, muchos proyectos utilizaron los "índices" de Ninomiya para el mapeo litológico con datos ASTER TIR.

Qiu et al. (2006) compararon varias técnicas de clasificación espectral, utilizando una biblioteca espectral de laboratorio, mediciones espectrales terrestres o seleccionando miembros finales de la imagen. En la sutura Allaqi-Heiani, Egipto, encontraron los tres métodos bastante similares y permitieron un mapeo exitoso de las litologías bien expuestas.

El mapeo de carbonatos y rocas asociadas en Omán fue publicado por Rajendran et al. (2011) y Rajendran y Nasir (2014), lograron separar las rocas ofiolíticas, carbonatos, silicatos ricos en cuarzo y depósitos superficiales. Los mapas de teledetección eran muy similares a los mapas geológicos publicados y recomendaron usar datos ASTER para mapear en otros entornos similares.

En la zona ofiolítica de Neyruz, Irán, Tangestani et al. (2011) utilizaron mediciones espectrales de campo y laboratorio para entrenar la clasificación supervisada de datos ASTER con algoritmo de ajuste de características espectrales. Los resultados sugirieron que este método podría aplicarse para mapear otros complejos de ofiolita, peor mapeados.

En la cuenca de Dahab, Egipto, Omran et al. (2012) utilizaron relaciones de banda de datos ASTER VNIR, SWIR y TIR, combinados con investigaciones de campo, para cartografiar y separar rocas granitoides de las edades Cámbrica y Cretácica. Revisaron y actualizaron mapas geológicos existentes agregando unidades de roca y reinterpretando la historia geológica.

Tayebi et al. (2013) mapearon diapiros de sal y áreas circundantes utilizando modelos de redes neuronales en el cinturón plegado de Zagros, Irán. Las observaciones de campo y el análisis de difracción de rayos X de las muestras de campo confirmaron los minerales identificados de forma remota.

El Janati et al. (2014) utilizaron algoritmos de clasificación para mapear la distribución espacial de granitos porfídicos, granodioritas y leucogranitos peraluminosos. También pudieron mapear diferentes tipos de rocas metamórficas y rocas de cobertura de carbonato.

En África Occidental, Metelka et al. (2018) analizaron datos de radar ASTER, Landsat, Radarsat y Japanese Phased Array tipo L-band Synthetic Aperture Radar (PALSAR),

combinados con espectrometría de rayos gamma aerotransportada, para mapear unidades geomorfológicas de forma de relieve. Los mapas resultantes, sobre un área de historia de meteorización laterítica a largo plazo, fueron más precisos que los mapas existentes.

Kurata y Yamaguchi (2019) propusieron un método para combinar y visualizar múltiples índices litológicos derivados de los datos de ASTER e información topográfica derivada de los datos del modelo de elevación digital, en una sola imagen en color. Los índices destacaron rocas de silicato, rocas de carbonato y cantidades y tipos de minerales arcillosos. Los resultados fueron verificados por estudio de campo y comparación con estudios previos en el área de prueba.

En la publicación "Twenty Years of ASTER Contributions to Lithologic Mapping and Mineral Exploration", Abrams y Yamaguchi (2019) realizan una síntesis del avance de la geología en países desarrollados.

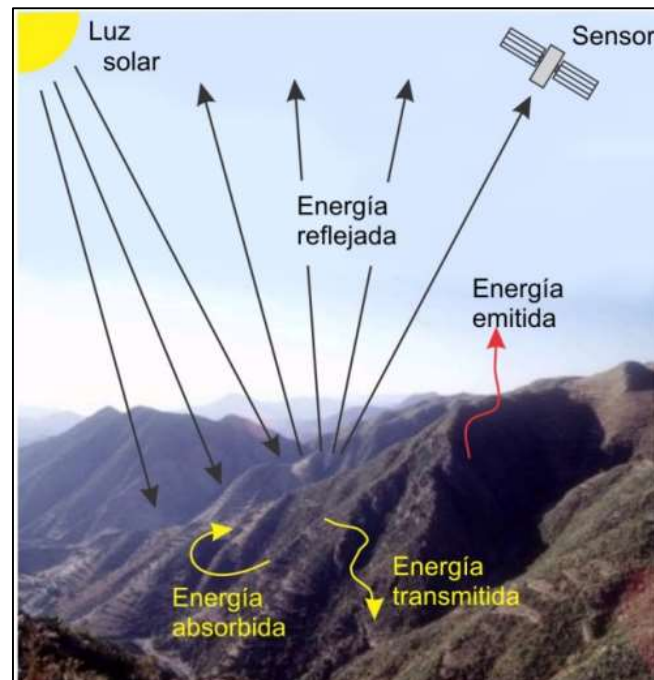
2.1. Teledetección aplicada a la geología

La posibilidad de la observación de la Tierra desde el espacio mediante el uso de los satélites artificiales, permite en la actualidad la adquisición de datos de la superficie terrestre, como las características físicas que se basan en mediciones de radiación reflejada y emitida de esa superficie (ESA, 2007; SEGEMAR, 2023).

Los sensores montados en aviones o satélites cuentan con muchos detectores que miden la cantidad de radiación electromagnética (energía), reflejan los elementos que están en la superficie de la Tierra (Hernández y García, 2014).

Al igual que lo que sucede en la atmósfera, la figura 9 muestra la incidencia de la radiación solar sobre la Tierra, la energía es absorbida, reflejada y transmitida por la superficie terrestre. Cada valor de reflectancia espectral se registra como un número digital (Corrales, 2010; 2016). Los números se transmiten de nuevo a la superficie terrestre, donde un ordenador lo convierte en colores o tonos de gris para visualizarlos en una imagen.

Figura 9: Comportamiento de la energía sobre la superficie terrestre



Fuente: Echeveste, 2018

Se debe tomar en cuenta que, no todos los elementos que forman parte de la superficie de la Tierra lo hacen de la misma forma, lo que permite diferenciarlos unos de otros. Para la geología, esto se convierte en una primera aproximación que incidirá en la identificación de características geológicas en base al color (Echeveste, 2018).

Las imágenes registradas y obtenidas desde los satélites, proporcionan información útil en los trabajos de cartografía, debido a la capacidad de observación de grandes áreas en idénticas condiciones de iluminación, especialmente en la detección de rasgos geomorfológicos, lineamientos estructurales y accidentes de dimensiones regionales. Los avances tecnológicos ofrecen mejor definición de imágenes y la visión estereoscópica, permitiendo verlas en 3D, para realizar una interpretación más precisa en cartografía a mayores escalas.

La visión sinóptica que proveen los sensores montados en plataformas satelitales permite comprender los fenómenos geológicos en su dimensión regional, entender la geología y los procesos relacionados como un todo (Chuvieco, 2002; Hernández y Moragues, 2002).

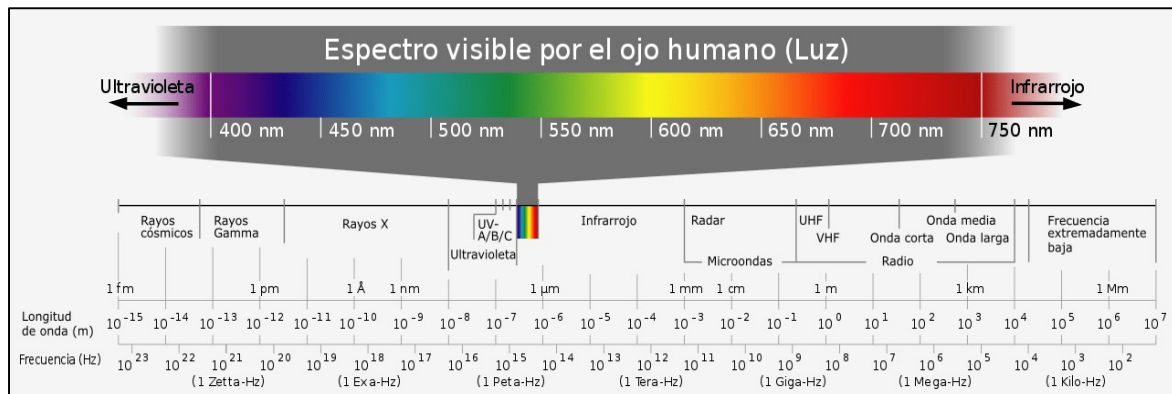
La herramienta básica para los geólogos de todas las disciplinas es un mapa mostrando la distribución y la identificación de unidades rocosas expuestas sobre la superficie terrestre. Utilizando estos mapas, los ingenieros geólogos y en petróleo investigan depósitos de ocurrencias minerales e hidrocarburos; los hidrogeólogos buscan aguas subterráneas; los geólogos estructurales clasifican fallas activas e inactivas (Hernández y Moragues, 2002).

Según Gutiérrez (1993: 13), en geología es de amplia difusión y tradicional el uso de fotografía aérea. Sin embargo, la aparición de la teledetección espacial, aportando con nuevas tecnologías que permiten detectar rasgos ocultos al ojo humano, abre unas perspectivas esperanzadoras para la observación e interpretación de los hechos geológicos.

La teledetección estuvo durante mucho tiempo reducida a la fotografía aérea, que es todavía la técnica más utilizada para la elaboración de mapas topográficos, estudios geológicos, de ingeniería o ambientales. El éxito de estas aplicaciones llevó a intentar conseguir información adicional registrando ondas del espectro no visible (microondas o infrarrojo) (Gutiérrez, 1993: 20).

El espectro electromagnético se divide en base a las longitudes de onda, en distintas regiones (Figura 10):

1. Rayos Gama
2. Rayos X
3. Ultravioleta
4. Luz Visible
5. Infrarrojo Cercano
6. Infrarrojo Medio
7. Infrarrojo Termal
8. Microondas
9. TV y Radio.

Figura 10: Espectro electromagnéticoFuente: MappingGIS²

La atmósfera terrestre absorbe energía en los rangos de rayos gamma, rayos X y la mayor parte en el ultravioleta, sin embargo, estos rangos no son utilizados para las imágenes de sensores remotos. En teledetección se utilizan los rangos de microondas, infrarrojo y visible y a veces las mayores longitudes de onda del rango ultravioleta.

Como parte del trabajo de investigación se van a estudiar una serie de bandas espectrales, que se consideran las más utilizadas en el ámbito geológico; es decir, en ciertas longitudes de onda se puede analizar el comportamiento de distintos materiales, hipótesis que va a ser comprobada en este trabajo de investigación.

De acuerdo a la clasificación realizada por Emilio Chuvieco (2002), se conoce que:

ESPECTRO VISIBLE (V 0,4 a 0,7 μm), se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar (0,5 μm). Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0,4 - 0,5 μm), verde (V: 0,5 - 0,6), y rojo (R: 0,6 - 0,7), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

La luz es producida por el ajuste del movimiento de los electrones dentro de las moléculas y los átomos. No es necesario insistir en la importancia de esta banda, únicamente observar el campo reducido de longitudes de onda que comprende, e indicar que en teledetección se consideran junto al visible los sectores más próximos del infrarrojo y el ultravioleta, a los que son sensibles las películas fotográficas, y que se trabajan conjuntamente con el visible (0,3 - 0,9) (Gutiérrez, 1993).

² <https://mappinggis.com/2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-Landsat-y-sentinel/>

INFRARROJO CERCANO (IRC: 0,7 a 1,3 μm), también se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

INFRARROJO MEDIO (IRM: 1,3 a 8 μm), en esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1,3 y 2,5 μm y resulta una región idónea para estimar contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

INFRARROJO LEJANO O TÉRMICO (IRT: 8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

Hernández & Moragues, 2002, sostienen que el uso del infrarrojo térmico sirve para la detección de minerales y de aguas subsuperficiales para explotaciones mineras.

MICRO-ONDAS (M: por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Gutiérrez (1993: 36) manifiesta que el principal problema que tiene el uso de la radiación infrarroja es que los átomos del aire absorben determinadas frecuencias que no son, por eso, utilizables en teledetección.

De acuerdo a la literatura estudiada, se puede decir que las regiones que abarcan el infrarrojo de onda corta, el infrarrojo térmico y el microondas del espectro electromagnético, permiten a los sensores captar imágenes de satélite que sirven para la obtención de información geológica preliminar.

En este trabajo de investigación se pone especial énfasis en describir y comprender las regiones que abarcan los infrarrojos y el microondas del espectro electromagnético; para entender el comportamiento de los distintos materiales dentro del ámbito geológico.

Según Gutiérrez (1993), se conocen dos tipos de sensores:

1) Pasivos (ópticos), cuando se limitan a recibir la energía proveniente del sol. Registran la energía radiada o reflejada naturalmente por un objeto.

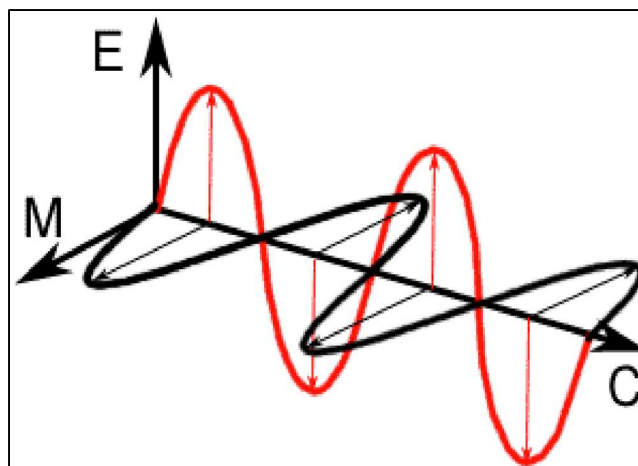
2) Activos (radar), cuando son capaces de emitir su propio haz de energía.

Suministran su propia fuente de energía hacia el objeto, reciben una señal de ondas electromagnéticas para el análisis de la energía reflejada o dispersada. El método más habitual correspondiente a este grupo es el radar, que trabaja en el campo de las microondas. También la fotografía con flash es un método activo.

La radiometría y expresión visual de las imágenes de sensores pasivos y de los sensores activos es diferente en cuanto al mecanismo físico de registro y la expresión de la base numérica de sus datos. En cualquiera de las dos fuentes de energía se transmite en forma de ondas, las cuales son caracterizadas por los siguientes elementos o parámetros: longitud de onda, amplitud, período y la frecuencia (Figura 11).

Figura 11: Amplitud y longitud de onda de una sucesión de onda.

E= campo eléctrico; M= campo magnético, C= Distancia



Fuente: CCRS, 2001

Las imágenes de satélite presentan características particulares de resolución espectral, espacial, radiométrica y temporal.

2.2. Sensores ópticos

Están a bordo de los satélites, miden la radiación electromagnética que refleja la superficie de la Tierra y los objetos que se encuentran en ella.

Cada sensor está diseñado para operar en una o varias bandas del espectro electromagnético, en función de la aplicación requerida. De esta forma se generan imágenes mono, multi o hiper espectrales, en función del número de bandas para ser discriminadas y medidas.

La interpretación geológica a partir de imágenes de satélite es una de las aplicaciones que ha tenido éxito en algunos países a nivel mundial, especialmente en los casos de exploración de yacimientos minerales. Se ha comprobado que imágenes satelitales que cubren extensas áreas, permiten trazar contactos entre diferentes tipos de rocas y estructuras, fundamentalmente en zonas áridas; en países como Ecuador que tienen mucha vegetación, aún se debe experimentar. El trabajo de investigación servirá para conocer la captación que tienen las imágenes ópticas y radar para la interpretación geológica.

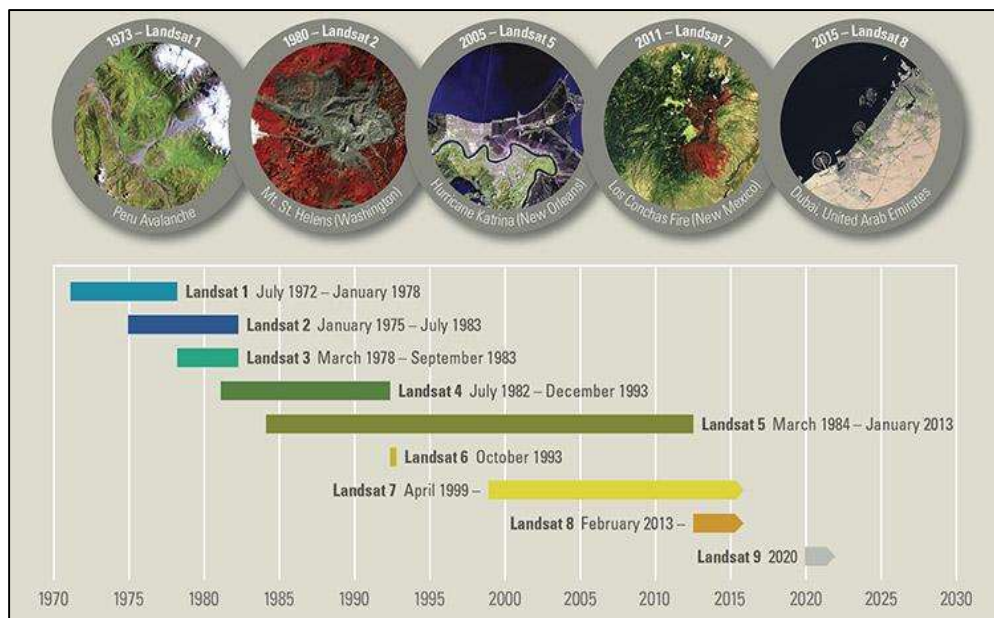
Según Gutiérrez (1993: 71) las imágenes multiespectrales más comúnmente utilizadas obtienen información en distintas bandas del espectro electromagnético 0,4 μ (azul) y 1,7 μ (IR cercano), a través de barridos del terreno, según líneas consecutivas y perpendiculares a la trayectoria de vuelo. La radiación procedente de cada elemento del suelo (pixel) es registrada de manera óptica o electrónica, mediante un conjunto de detectores, pudiendo ser estudiada la variación de la señal espectral en función de la reflectancia de cada objeto o material. La mayoría de los estudios se realizan partiendo de imágenes ópticas, que recogen información en las regiones visible e infrarroja del espectro electromagnético.

Entre los satélites ópticos más mencionados para la interpretación geológica pueden citarse Landsat (sensores MSS, TM, ETM y OLI) y el sensor ASTER.

2.2.1. Landsat

La constelación de satélites Landsat (Land = Tierra y sat = satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres, conformada por 9 satélites como se muestra en la figura 12, su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS (INEGI, 2016; NASA, 2022).

Figura 12: Línea del Tiempo de la Misión Landsat



Fuente: USGS, 2019

Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor, posteriormente el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Su distribución actualmente es gratuita y tienen una alta cobertura geográfica, lo que hace que estas imágenes, sean las más utilizadas en estudios de geociencias, como: estudios de cambios de cubierta del suelo, clima, actividades humanas, mares y océanos, entre otros

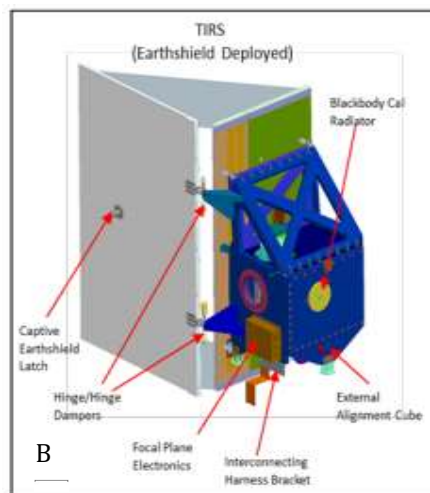
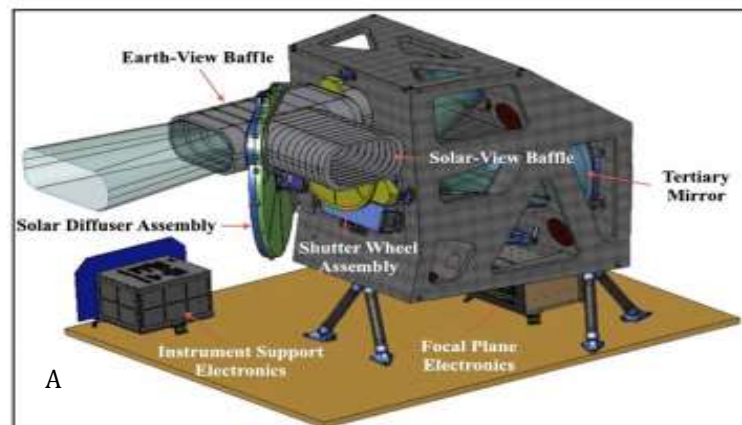
El 11 de febrero de 2013 fue lanzado el satélite Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission LDCM) en Vandenberg Air Force Base, California, EEUU.

Los datos multiespectrales de la serie Landsat no son estereoscópicos, aun cuando se han podido conseguir imágenes seudoestereocópicas mediante tratamientos numéricos.

Landsat 8

El satélite mide diferentes rangos de frecuencia a lo largo del espectro electromagnético, cada rango es llamado banda, el sensor Landsat 8 tiene 11 bandas (NASA, 2022). La plataforma está equipada con el sensor OLI (Operational Land Imager), que incluye observación con 9 bandas que cubren los espectros ópticos y el sensor de infrarrojos térmicos TIRS (Figura 13) conformado por 2 bandas (USGS, 2021).

Figura 13: (A) Sensor OLI; (B) Sensor TIRS



Fuente: Landsat 8 Data Users Handbook, 2019

La satélite colecta imágenes de la Tierra con un ciclo de repetición de 16 días. Cada imagen L8 cubre un área de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste sobre el terreno (NASA, 2022). Las bandas espectrales del sensor OLI, han sido mejorados por la adición de dos nuevas bandas espectrales, un canal visible azul profundo (banda 1), un nuevo canal de infrarrojos (banda 9) para la detección de cirros y dos bandas térmicas (banda 10 y banda 11), tal como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Rango espectral de Landsat 8

BANDAS	RANGO ESPECTRAL (μm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)	DENOMINACIÓN	SENSOR
1	0.435 - 0.451	30	Costera/Aerosol Visible	OLI
2	0.452 - 0.512	30	Blue Visible	OLI
3	0.533 - 0.590	30	Green Visible	OLI
4	0.636 - 0.673	30	Red Visible	OLI
5	0.851 - 0.879	30	NIR	OLI
6	1.566 - 1.651	30	SWIR 1	OLI
7	2.107 - 2.294	30	SWIR 2	OLI
8	0.503 - 0.676	15	Pancromática	OLI
9	1.363 - 1.384	30	Para nubes (cirrus)	OLI
10	10.60 - 11.19	100	Térmico 1	TIRS
11	11.50 - 12.51	100	Térmico 2	TIRS

Fuente: USGS, 2019; NASA, 2022

Las bandas del SWIR serán especialmente tomadas en cuenta para este trabajo de investigación. Tomando información de la NASA a continuación, se describen sus características:

Banda 6 y 7

Las bandas 6 y 7 cubren diferentes partes del infrarrojo de onda corta, o SWIR. Son particularmente útiles para diferenciar la tierra húmeda de la tierra seca, y para la

geología: las rocas y los suelos que parecen similares en otras bandas, tienen a menudo contrastes fuertes en el SWIR. ³.

Finalmente, se debe mencionar que en la actualidad son de acceso gratuito, el USGS dispone de más de un millón de imágenes en archivo, producto de 45 años de recolección de datos de Landsat, lo que la convierte en la mejor opción como fuente de imágenes satelitales para la observación de la superficie terrestre. La NASA en septiembre del año 2021, realizó el lanzamiento de Landsat 9, una reconstrucción del Landsat 8, con mejoras radiométricas y geométricas.

2.2.2. ASTER

El Radiómetro Espacial Avanzado de Reflexión de Emisión Termal (*ASTER, por sus siglas en inglés*), es un generador de imágenes multiespectrales que fue lanzado a bordo del satélite TERRA de la NASA, en diciembre de 1999 en el marco del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la NASA.

El proyecto ASTER fue un esfuerzo conjunto de la NASA, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y el Centro de Análisis de Datos de los Sensores Remotos de la Tierra (ERSDAC).

Las plataformas que conforman el EOS son una parte de los proyectos de las Ciencias de la Tierra de la NASA, cuyo fin es entender las interacciones entre la biosfera, hidrosfera, litosfera y atmósfera.

El ERSDAC (2003), señala en su Guía de Referencia, versión 1.0, que el propósito del proyecto ASTER, fue enfocado a profundizar la comprensión de los fenómenos locales y regionales que ocurren en la superficie de la Tierra y en la atmósfera.

Los objetivos específicos del proyecto ASTER se detallan a continuación:

- ✓ Promover la investigación de los fenómenos geológicos, tectónica e historia geológica, a través de una cartografía detallada de la topografía de la Tierra y

³ <https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/>

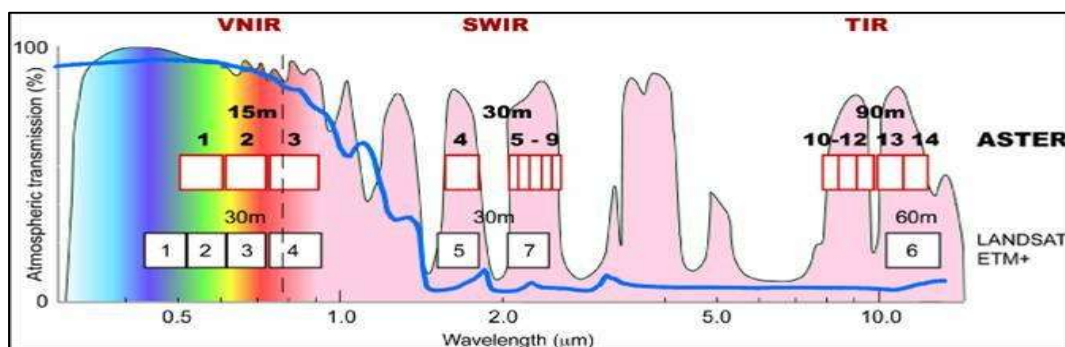
distribución de las formaciones geológicas (esta meta incluye contribuciones a la investigación aplicada utilizando los sensores remotos.)

- ✓ Comprender la distribución de la vegetación y sus cambios.
- ✓ Adquirir conocimiento de las interacciones entre la superficie de la Tierra y la atmósfera por mapeo de temperatura de superficie.
- ✓ Evaluar el impacto de las emisiones de gases volcánicos a la atmósfera mediante el monitoreo de la actividad volcánica.
- ✓ Contribuir para la comprensión de las características de los aerosoles en la atmósfera y su influencia en las nubes.

El sensor ASTER cubre una amplia región espectral desde el visible al infrarrojo termal con alta resolución espacial, espectral y radiométrica. El sensor ASTER mide la reflectancia en 14 bandas subdivididas en 3 subsistemas: VNIR, SWIR y TIR.

Su resolución espacial es similar a LANDSAT con valores entre 15, 30 y 90 metros. La resolución espacial varía según las longitudes de onda: 15 m en el visible e infrarrojo cercano (VNIR) con tres bandas; 30 m en el infrarrojo de onda corta (SWIR) con 6 bandas; y, 90 m en el infrarrojo termal (TIR) con 5 bandas. Cada escena ASTER cubre un área de 60 x 60 km. La figura 14 muestra la distribución de bandas de ASTER y LANDSAT.

Figura 14: Distribución de bandas de ASTER y LANDSAT



Fuente: Wahi et al. 2013, NASA⁴

La principal ventaja del sistema de imágenes ASTER es su alta resolución espectral con 14 bandas, capturan más bandas que la mayoría de los otros satélites comerciales o

⁴ <http://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg>

científicos, principalmente en el rango infrarrojo de onda corta (SWIR), donde tienen más sensibilidad incluso que LANDSAT.

ASTER también presenta un telescopio con visión hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos o anaglifs (ERSDAC, 2001).

La visión estereoscópica o estereoscopía en relieve se logra por la visión simultánea de los objetos desde distinto ángulo, el correspondiente a cada ojo y su coordinación mental, produciéndose una especie de doble visión, que permite apreciar las distancias, espesores, profundidades; esto es, todas las magnitudes tridimensionales. La tabla 2 muestra las características de las imágenes ASTER.

Tabla 2. Características principales del sensor ASTER

SUBSISTEMA	BANDA	RANGO ESPECTRAL μm	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA	RESOLUCIÓN TEMPORAL
VNIR	1	0.52-0.60	15 m	8 bits	16 días
	2	0.63-0.69			
	3N	0.78-0.86			
	3B	0.78-0.86			
SWIR	4	1.600-1.700	30 m	8 bits	
	5	2.145-2.185			
	6	2.185-2.225			
	7	2.235-2.285			
	8	2.295-2.365			
	9	2.360-2.430			
TIR	10	8.125-8.475	90 m	12 bits	
	11	8.475-8.825			
	12	8.925-9.275			
	13	10.25-10.95			
	14	10.95-11.65			

Fuente: ERSDAC (2003 y 2001)

Al ser un sensor multispectral, toma las imágenes en una multiplicidad de colores, discrimina diferencias en tipos de materiales. Estudios realizados indican que los datos

multiespectrales proporcionan información útil para establecer diferencias entre rocas y suelos, en base a su composición mineralógica.

ASTER es un sensor que, por sus características, permite identificar la distribución precisa de diferentes minerales de alteración y de rocas con diferente contenido de sílice, entre otras aplicaciones (Hernández y Moragues, 2002).

Las diferentes respuestas espectrales de la superficie terrestre se fundamentan básicamente en que las rocas y los minerales presentan patrones espectrales característicos de absorción y emisión en ciertas longitudes de onda.

La utilización del infrarrojo permite su detección en la exploración geológica minera.

Se conoce que estas imágenes ayudan a discriminar contactos litológicos y lineamientos estructurales, a escala regional mediante combinaciones de bandas. Estas imágenes también permiten resaltar el relieve, por lo que se pueden asociar tipos de drenajes con lineamientos estructurales.

Hernández y Moragues (2002), concluyen que las imágenes ASTER, proveen datos de mayor resolución espacial y sumando su capacidad de visión estereoscópica, permiten el modelado digital de la topografía, producto invaluable en temas relacionados con la planificación de obras, estudios geotectónicos, desarrollo de grandes obras de infraestructura, desarrollo de explotaciones mineras y petroleras, estudios de riesgos sísmicos y estudios ambientales-geodinámicos en general.

Los sensores ópticos Landsat y ASTER permiten detectar, por su resolución espectral, zonas de minerales alterados, los cuales suelen estar relacionados a la presencia de minerales preciosos y valiosos como el oro, plata y metales de importancia estratégica como el cobre (transición energética). Debe sumarse también la posibilidad de detección de hidrocarburos, tanto de fluencia natural, como de accidentes de derrames petroleros (Hernández y Moragues, 2002: 3).

La mayoría de las rocas han sido extensivamente alteradas hidrotérmicamente, un proceso en el que, mientras se mantiene a altas temperaturas, los fluidos ácidos

transforman químicamente la mineralogía, y a veces se depositan metales preciosos (Hernández y Moragues, 2002).

El sensor ASTER fue diseñado especialmente para aplicaciones geológicas y de medio ambiente, la interpretación de contactos geológicos y lineamientos estructurales es una técnica que se requiere en el cartografiado geológico. Se conoce que algunos países continúan investigando y evaluando el potencial de estas imágenes satelitales.

2.3. Sensores radar

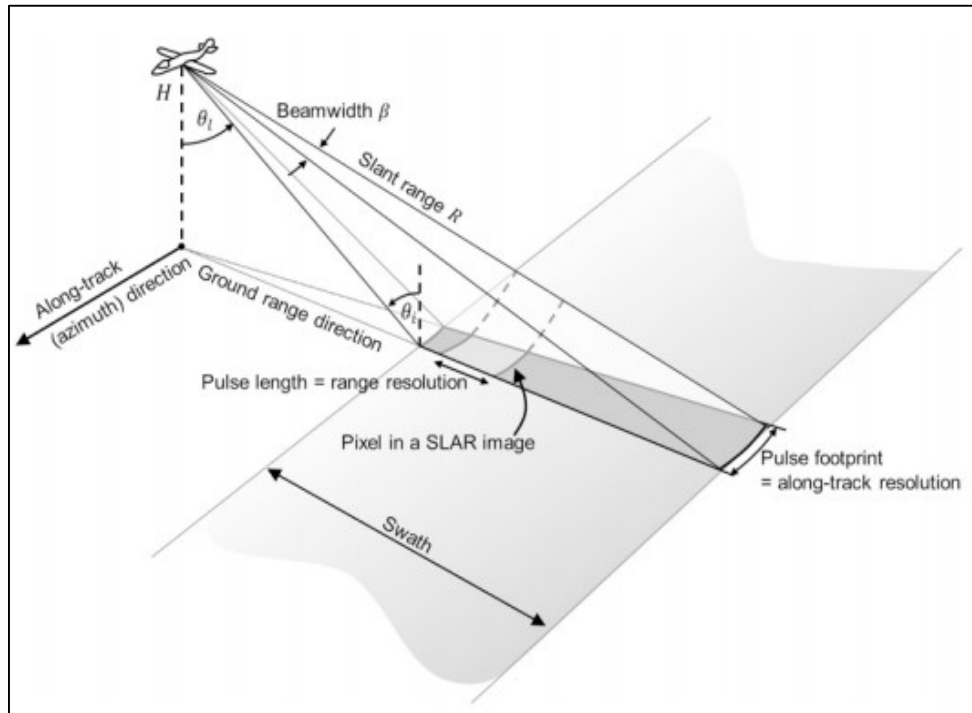
El trabajo de investigación incluye el estudio de sensores Radar de Apertura Sintética SAR (*siglas en inglés Synthetic Aperture Radar*), con el fin de disponer de imágenes satelitales sin afectación de nubes, ya que, en el caso del Ecuador, debido a su ubicación geográfica en el Cinturón de Fuego del Pacífico y punto de encuentro entre de varios sistemas climáticos y geográficos como la línea ecuatorial, gran parte del territorio permanece cubierto por nubosidad durante casi todo el año.

Las imágenes radar son producto de un sensor activo que trabaja con una longitud de onda que traspasa una variedad de fenómenos atmosféricos como: nubes, brumas, lluvia, neblina y otros fenómenos meteorológicos que ocultan parte de la superficie terrestre. Adicionalmente, capta información a cualquier hora del día o de la noche, lo que hace de este sistema óptimos en teledetección, siendo aconsejado para aplicar en grandes áreas en estudios preliminares (Meyer, 2019).

Radar es un acrónimo del inglés que define detección y localización por radio. Las imágenes radar difieren de las imágenes ópticas multiespectrales, por el tipo de datos adquiridos, sus características son insensibles a las variaciones atmosféricas, no se ven afectadas por la falta de iluminación solar (MDA, 2013; Meyer, 2019). El radar tiene su propia fuente de energía y, por lo tanto, puede funcionar durante el día o la noche, como se lo mencionó anteriormente.

- La señal del sensor radar se transmite de forma inclinada, fuera del nadir del satélite, por lo tanto, la superficie de la tierra se ilumina en un ángulo oblicuo, esa vista refuerza las variaciones de los desniveles y las texturas de la superficie, que en muchos de los casos mejora la capacidad de interpretación de las imágenes debido a que se acerca más al modo acostumbrado de observación de los seres humanos (Figura 15).

Figura 15: Observación geométrica de una imagen tomada con radar



Fuente: NASA, 2019

La resolución espacial de las imágenes radar es variable y su rango de captura no se mide en longitudes de onda del espectro electromagnético, sino en bandas de frecuencias, obteniéndose distintos matices de gris.

De acuerdo a Marchionni y Cavayas (2014: 576) los datos radar se han convertido en los últimos años en una herramienta de uso frecuente para la extracción de información geológica, siendo cada vez más numerosos los sistemas de teledetección por radar, que ponen a disposición una gran variedad de imágenes de gran utilidad para la cartografía geológica.

Los datos e información proporcionados por satélites radar son muy útiles en actividades de exploración y cartografía geológica (MDA, 2013).

Un sistema radar tiene tres funciones primordiales:

1. Transmitir señales de microondas (radio) hacia una escena.
2. Recibir la energía transmitida (porción), que se refleja hacia el sensor desde la escena iluminada.

3. Observar la potencia de la señal reflejada y el tiempo necesario para que la señal regrese al sensor.

El Ecuador a pesar de su tamaño relativamente pequeño (256.370 km²), tiene diversa y abundante vegetación, las rocas están enmascaradas por cobertura vegetal (zonas de vegetación espesa, selvas, sabanas), las imágenes radar podrían ser una opción para obtener información en las zonas donde hay cubierta vegetal, por ello se consideran una fuente de información complementaria a las imágenes ópticas.

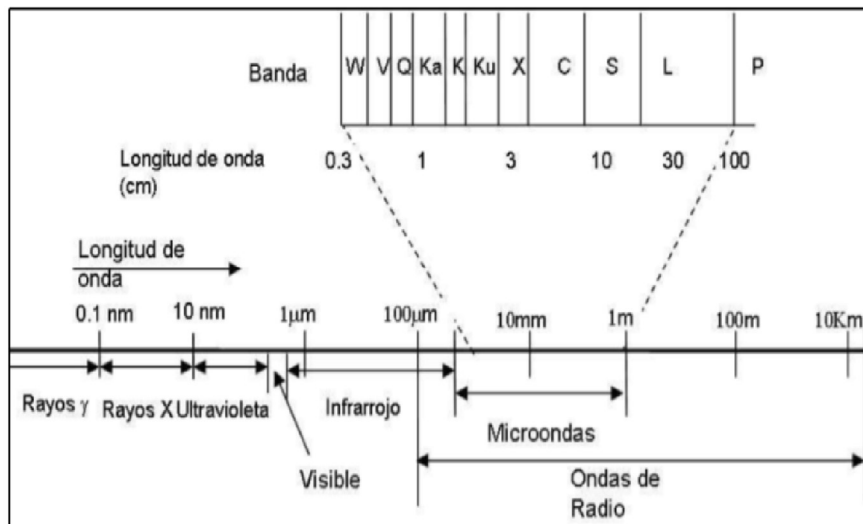
El SAR es sensible a la rugosidad de la superficie del suelo y la pendiente, dada su capacidad de resaltar rasgos topográficos sutiles y detectar la rugosidad del terreno, los datos radar son auxiliares insustituibles en el relevamiento geológico en zonas de vegetación densa (Hernández y Moragues, 2002).

Algunos estudios demuestran que, los sistemas radar tienen gran aplicación en la detección de estructuras geológicas, las cuales son importantes desde el punto de vista de la exploración de cuerpos mineralizados, una correcta interpretación de fallas, lineamientos y en general estructuras puede redundar en una mejor comprensión del modelo geológico de un posible yacimiento mineral.

2.3.1. Principios básicos de funcionamiento radar

El radar es un radiómetro activo, trabaja en la zona del espectro electromagnético correspondiente a las microondas (Figura 16), comprendida entre 0,1 y 100 cm, que constituyen las longitudes de onda más amplias utilizadas en teledetección.

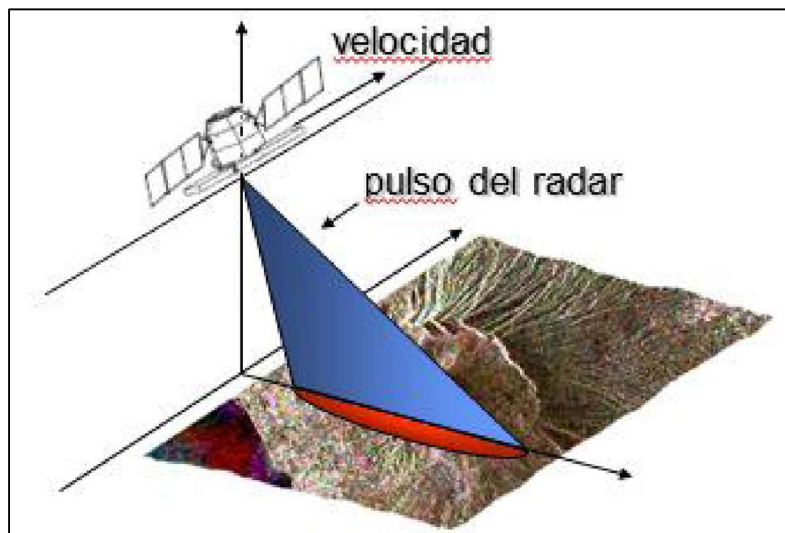
Figura 16: Zona del espectro de trabajo radar



Fuente: Fernández, 2009

Emite energía electromagnética y detecta el eco que regresa de los objetos reflejados. La naturaleza de la señal del eco de retorno contiene información sobre el objeto, como se muestra en la figura 17 (Skolnik, 1989; Mayorga, 2013).

Figura 17: Adquisición de una imagen radar



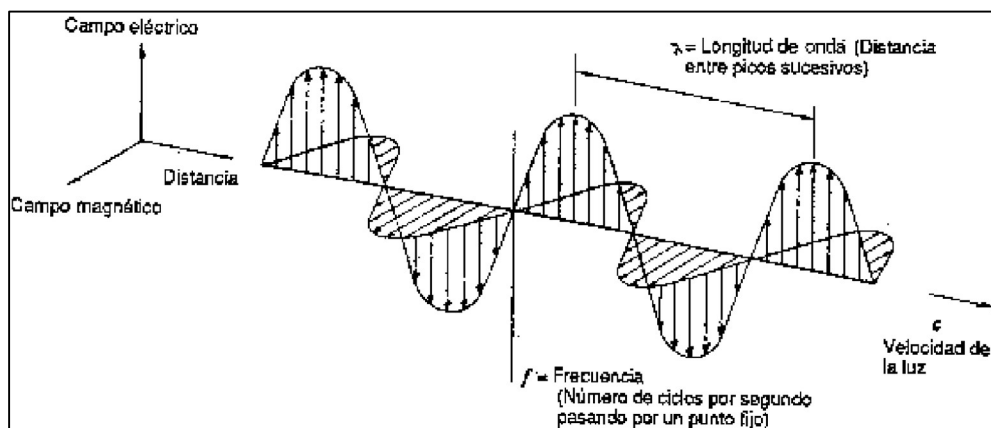
Fuente: Lopinto (2010)

Olmsted (1993 citado en Masuelli, 2003) señaló que el proceso de detección de un radar se basa en cuatro principios tecnológicos que son:

1. La antena transmite un pulso corto en una dirección precisa.
2. Detecta en una dirección precisa el eco dispersado, muy atenuado, de un blanco.
3. La habilidad de medir el tiempo de retardo entre la emisión y la detección y así la distancia al blanco.
4. Realiza muestreo con un haz direccionado y examina blancos en áreas grandes.
5. La energía electromagnética se trasmite a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas (Figura 18), formadas por un campo eléctrico y un magnético oscilante y perpendicular entre sí y a su vez a la dirección de propagación. Una onda tiene cierta velocidad (c), frecuencia (f) y longitud de onda (λ), conectadas por la relación:

$$c = f * \lambda$$

Figura 18: Onda electromagnética y sus componentes



Fuente: FAO 1990

La longitud de onda es la distancia entre dos picos y se define por la velocidad con que se propaga la onda (c), dividido por la frecuencia (f).

$$\lambda = c/f$$

La frecuencia es el número de ondas enteras que pasan por un punto fijo en un segundo.

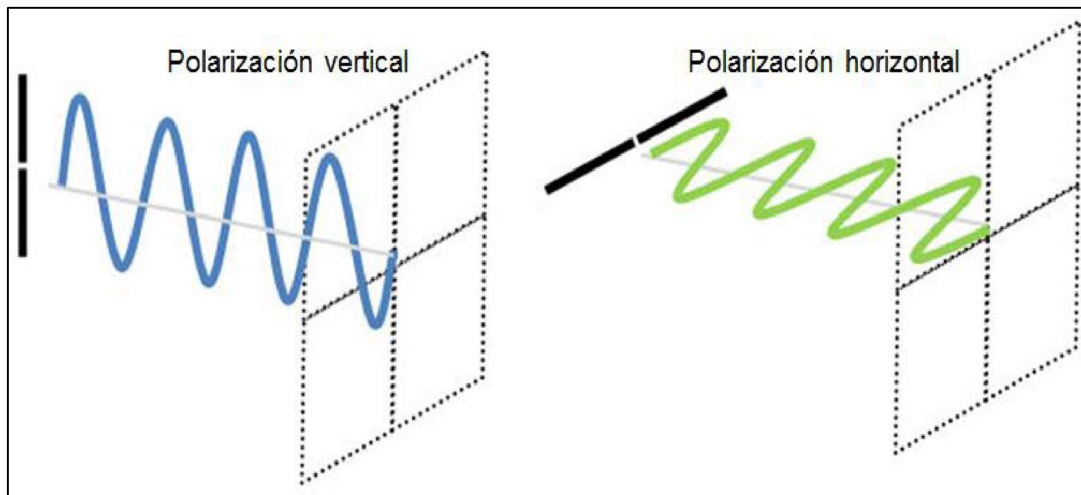
La velocidad se mide en metros/segundo, la frecuencia en ciclos/segundo (o Hertz, abreviado Hz), y la longitud de onda en metros. Las ondas tienen una propiedad denominada amplitud, que es la distancia desde el centro de la onda hasta el extremo de

uno de sus picos, donde la frecuencia es dos ciclos por segundo o 2Hz (MontevideoLibre, 2007, Mayorga, 2013).

En el radar se pueden controlar las condiciones de adquisición de la escena, al especificar el ángulo, distancia, orientación, polarización, entre otros.

La orientación de la onda (plano a lo largo del cual viaja) es referido como la polarización. El sistema radar algunas veces produce ondas con una polarización vertical u horizontal con respecto a la superficie (Figura 19) (FAO, 1990).

Figura 19. Polarización de las ondas electromagnéticas, campo eléctrico



Fuente: FAO, 1990

La polarización permite tener una medida de la simetría de un objetivo. En principio, un radar puede medir la rugosidad de la superficie del objetivo y determinar algo sobre sus propiedades dieléctricas (Skolnik, 1989). En la polarización se toma en cuenta la orientación, fase relativa y periodicidad de los campos eléctricos y magnéticos de las ondas.

La antena del sistema radar está configurada para transmitir y recibir radiación electromagnética ya sea horizontal o vertical (CCR, 2001). En la polarización similar, la energía transmitida es polarizada en la misma dirección que la recibida (HH, VV). La polarización es cruzada cuando varía la polarización entre la señal emitida o la recibida (HV o VH). La dirección con la que la señal está polarizada influye en el haz de retorno porque el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación (Chuvienco, 2002). El

retorno de polarización cruzada HV o VH es débil y se lo asocia con diferentes reflexiones debido a la rugosidad de la superficie (SARMAP, 2008).

En el radar se distingue una serie de bandas como se detallan en la tabla 3:

Tabla 3. Nomenclatura estándar de bandas de frecuencia radar

BANDA	LONGITUD DE ONDA λ (cm)	FRECUENCIA f (GHz)	SENSOR
Ka	0,75 - 1,10	26,5 - 40	
K	1,10 - 1,67	18 - 26,5	Uso militar
Ku	1,67 - 2,40	12,5 - 18	
X	2,40 - 3,75	8 - 12,5	TerraSAR-X-1, COSMO-SkyMed
C	3,75 - 7,50	4 - 8	ERS-1/2 SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, RISAT-1,
S	7,50 - 15	2 - 4	Almaz-1
L	15 - 30	1 - 2	JERS-1 SAR, SEASAT, ALOS PALSAR
P	30 - 100	0,3 - 1	AIRSAR de JPL/NASA

Fuente: Chuvieco (2002), CCRS (2001), SARMAP (2008)

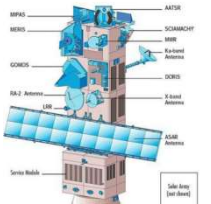
Las bandas corresponden a una letra, con frecuencias entre 0,3 y 300 GHz (CCR, 2001).

En general, frecuencias inferiores a la banda S son adecuadas para la vigilancia aérea; mientras que frecuencias por encima de la banda S son mejores para la recopilación de información, rastreo de precisión y el reconocimiento de objetivos individuales (Skolnik, 1989). El radar se ha usado para la seguridad de vuelos aéreos, barcos, naves espaciales, para la teledetección aplicada en el medio ambiente (clima) y otras aplicaciones.

2.3.2. Plataformas satelitales SAR para geología

A continuación, se muestran los cinco sistemas satelitales más usados para la investigación geológica, especificando las principales áreas de aplicación (Tabla 4):

Tabla 4. Operación satelital para aplicación geológica

SISTEMA	APLICACIÓN	PROVEEDOR
ALOS-PALSAR 	Desastres naturales (inundaciones, fenómenos de remoción en masa-deslizamientos, sismos).	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (<i>JAXA</i>)
TERRASAR-X 	- Geología - Interferometría	Centro Aeroespacial Alemán y EADS Astrium.
RADARSAT 2 	Geología (detectar características estructurales y litológicas, examinar geo-amenazas como deslizamientos, extraer información geomorfológica).	Agencia Espacial de Canadá
ENVISAT 	- Geología (análisis de estructuras geológicas: fracturas, fallas y pliegues). - Monitoreo de movimientos tectónicos, zonas de minerales y yacimientos de petróleo y gas natural.	Agencia Espacial Europea
SENTINEL-1 	- Monitoreo de volcanes y deslizamientos. - Interferometría InSAR (deformación del terreno).	Agencia Espacial Europea

2.4. Métodos cualitativos y cuantitativos de interpretación

La interpretación geológica mediante el uso de sensores remotos puede involucrar tanto los métodos cualitativos como cuantitativos, y con frecuencia se utilizan en conjunto para obtener una comprensión amplia de la geología en una zona o región establecida.

Entre los métodos cualitativos más conocidos, en resumen, se pueden enunciar:

- a) **Interpretación visual**, cuando los geólogos analizan las imágenes provenientes de los satelitales o fotografías aéreas para discriminar características geológicas visibles, como son las formaciones rocosas (e.g., Harris, 1991; Rajesh, 2004), fallas geológicas (e.g., Liu et al. 2000; Rajesh, 2004), cuerpos de agua, suelo y vegetación. La interpretación se basa en la experiencia y el conocimiento del investigador intérprete (e.g., Sabins, 1999; Rajesh, 2004; Lillesand et al. 2015).
- b) **Interpretación de tonalidad y textura**, se enfoca en el análisis de la tonalidad y textura de las imágenes para identificar diferencias en la superficie terrestre. Tonalidades más oscuras podrían indicar presencia de rocas ígneas o basalto, mientras que áreas con texturas rugosas podrían indicar zonas de erosión.

Comparación temporal, se comparan imágenes de diferentes fechas de toma para identificar cambios en la superficie que podrían ser el resultado de procesos geológicos, como deslizamientos de tierra, cambios en los cuerpos de agua o actividad volcánica (e.g., Jensen, J. 1983; Lillesand et al. 2015).

En referencia a los métodos cuantitativos, existen:

- c) **Análisis espectral**, se basa en la medición de la reflectancia espectral de las superficies terrestres en diferentes longitudes de onda. Los espectros resultantes se utilizan para identificar minerales específicos y composiciones de rocas. Esto puede realizarse mediante el uso de imágenes multiespectrales e hiperespectrales (e.g., Jensen, J. 1983; Clark y Roush, 1984; Sabins, 1978, 1997, 1999; Longui et al., 2001; Rajesh, 2004; Lillesand et al. 2015; Mars, 2017).
- d) **Índices de vegetación**, como el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), para evaluar la salud y densidad de la vegetación en una región (Lillesand et al. 2015). Podría ser útil para identificar áreas de interés geológica con vegetación densa.
- e) **Modelos de elevación y topografía**, los datos LiDAR (Light Detection and Ranging) se utilizan para crear modelos digitales de elevación y topografía, lo que permite la

identificación de características geológicas como fallas, pliegues, elevaciones, ocurrencia de deslizamientos, entre otros (e.g., Jensen, J. 1983. Fernández et al. 2021).

- f) **Clasificación supervisada y no supervisada**, se aplican algoritmos de clasificación a imágenes satelitales para identificar y categorizar automáticamente características geológicas. La clasificación supervisada implica la identificación manual de regiones de interés, mientras que la no supervisada agrupa automáticamente píxeles similares (e.g., Gómez et al. 2005; Lillesand et al. 2015).

En la práctica, se suelen combinar métodos cualitativos y cuantitativos para comprender mejor la geología de un área de estudio. La información cualitativa proporciona contexto y detalle visual, mientras que los métodos cuantitativos intentan brindar una caracterización aproximada de los objetos geológicos y minerales. Según Rajesh (2004) en la mayoría de los casos, un intérprete de datos de teledetección tiene que confiar en pistas indirectas, como el entorno geológico general, zonas de alteración, rocas asociadas, estructura, lineamientos, productos de oxidación, morfología, drenaje y anomalías de la vegetación, ya que sólo en raras ocasiones es posible identificar directamente la ocurrencia y la mineralogía de un depósito basándose únicamente en datos de teledetección. Por lo tanto, la integración de datos de sensores remotos con datos de campo y muchas fuentes adicionales permiten validar y mejorar la interpretación.

2.5. Análisis e interpretación geológica y geomorfológica

El análisis e interpretación mediante el uso de sensores remotos se está convirtiendo en un procedimiento clave en la geología y la geomorfología modernas, ya que permite detectar información a detalle sobre la estructura geológica y la topografía de una región, sin necesidad de realizar muestreos extensos en el terreno.

A continuación, se detallan los pasos para llevar a cabo este tipo de análisis.

1. Selección de datos de sensores remotos, el primer paso es seleccionar los datos de sensores remotos adecuados para el área de estudio. Esto puede incluir imágenes satelitales, fotografías aéreas, datos LiDAR.
2. Preprocesamiento de datos, los datos de sensores remotos suelen requerir preprocesamiento para eliminar ruido, corregir distorsiones y mejorar la calidad de la imagen (e.g., Chuvieco, 2002; Rasilla y Conde, 2023).

3. Análisis espectral, se utilizan bandas espectrales específicas de los datos para identificar tipos de roca, minerales y vegetación en la superficie terrestre. Cada material tiene una firma espectral única que se puede detectar en los datos (e.g., Jensen, J. 1983; Clark y Roush, 1984; Sabins, 1978, 1997, 1999; Longui et al., 2001; Rajesh, H. 2004; Lillesand et al. 2015; Mars, 2017).
4. Clasificación de imágenes, se aplican algoritmos de clasificación para dividir la imagen en clases o categorías, como tipos de roca, vegetación, cuerpos de agua etc. Esto se hace a través de algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada (e.g., Lillesand et al. 2015).
5. Modelado de elevación y topografía, se utilizan datos LiDAR y radar interferométrico de apertura sintética, para crear modelos digitales de elevación, caracterizar la topografía del terreno, identificar cambios y rastrear deformaciones con alta precisión en áreas extensas y en escalas de tiempo prolongadas (e.g., Jensen, J. 1983, Meyer, 2019, Fernández et al. 2021).
6. Análisis de cambios temporales, comparación de imágenes de diferentes fechas para identificar cambios en la superficie, como deslizamientos de tierra, cambios en cursos de ríos o actividad volcánica (e.g., Béjar-Pizarro et al. 2018).
7. Identificación de estructuras geológicas, análisis de patrones y texturas para identificar fallas, pliegues y otras estructuras geológicas en la superficie terrestre.
8. Análisis de cobertura vegetal, evaluación de la salud y densidad de la vegetación utilizando índices de vegetación (Lillesand et al. 2015).
9. Integración de datos, la información obtenida de los diferentes análisis se integra para proporcionar una comprensión completa de la geología y la geomorfología del área de estudio. De acuerdo a Rajesh (2004), los resultados se integran cada vez más en modelos operativos de exploración basados en la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, que juega un papel relevante en la exploración minera.
10. Interpretación geológica y geomorfológica a partir de los resultados de los análisis, los geólogos y geomorfólogos interpretan la información para comprender la historia geológica y la configuración del paisaje de en la región (e.g., Moragoda, 2023). Esto implica la identificación de características geológicas, procesos geológicos pasados y actuales, así como la evolución del paisaje.
11. Validación en campo, cuando sea posible se realiza una validación en campo para verificar los resultados obtenidos a partir de los datos de sensores remotos.

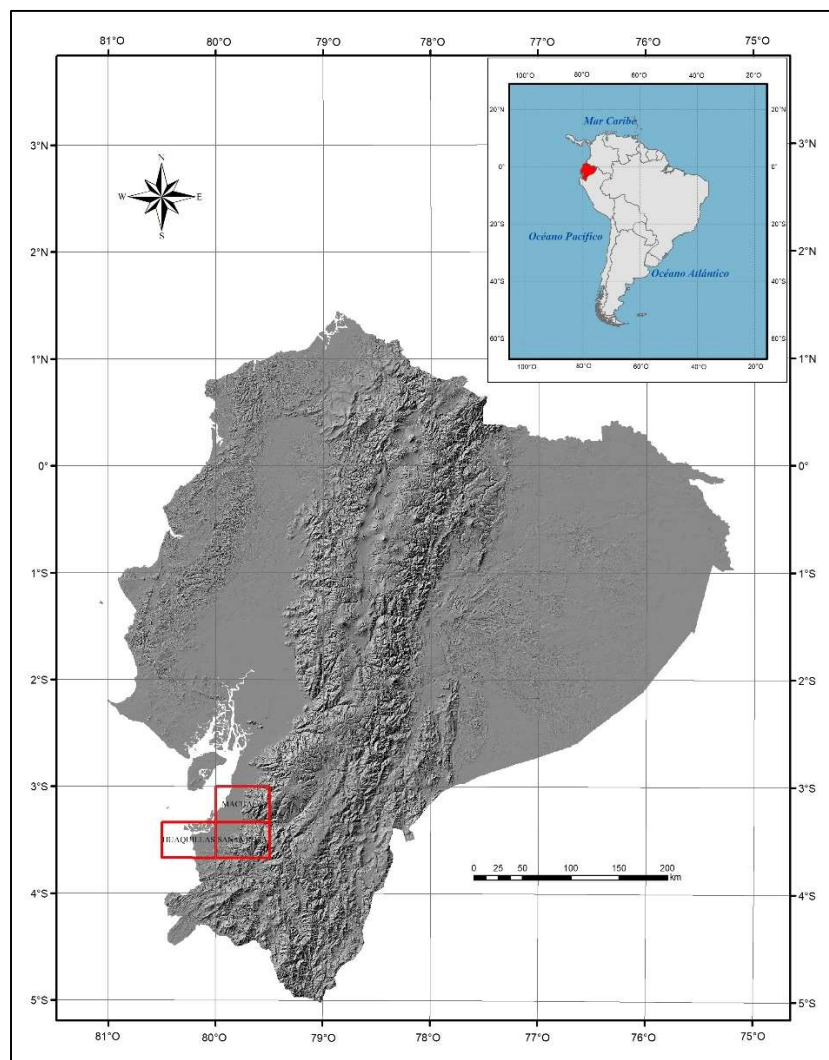
La combinación de datos de sensores remotos, técnicas de procesamiento y análisis geoespacial, junto con el conocimiento geológico y geomorfológico, permite obtener una comprensión completa de la geología y la geomorfología de una determinada área. Esto es fundamental para la exploración de recursos naturales renovables y no renovables, la gestión ambiental, la planificación del uso del suelo, ocurrencia de amenazas geológicas, la mitigación de riesgos, entre otros.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en el suroeste del Ecuador (Figura 20), en la región costanera, correspondiente a sectores de las hojas geológicas Huaquillas, Machala y Santa Rosa, de la provincia de El Oro, entre los 3° - 3°40' de latitud sur y 79°30' - 80°30' de longitud oeste del meridiano de Greenwich, con un área aproximada de análisis de 4000 km².

Figura 20: Ubicación del área de estudio. Hojas: Machala, Huaquillas y Santa Rosa sobre el mapa sombreado de relieve MDE-SRTM 30 m



Fuente: SRTM (USGS), 2020

3.2. Datos satelitales y cartográficos

- Imágenes ópticas y radar de apertura sintética (SAR).
- Cartografía básica publicada por el Instituto Geográfico Militar de Ecuador.
- Modelo Digital del Elevación (MDE) Alos Palsar de 12,5 m.
- Mapa Geológico del Ecuador en escala 1:1.000.000 y los mapas geológicos publicados de Machala, Santa Rosa y Huaquillas en escala 1:100.000.
- Estación de trabajo (Workstation) y paquetes especializados para el tratamiento y procesamiento de imágenes de satélite que manejen la mayoría de formatos de imágenes):
 - ✓ ENVI
 - ✓ PCI Geomatica
 - ✓ SNAP
- Sistema de Información Geográfica (SIG), software ArcGIS 10.6 de ESRI, para integrar capas de información concerniente a la cartografía básica (límites, poblaciones, nombres/etiquetas, entre otros); unidades geológicas mapeables y lineamientos estructurales interpretados, para mostrar su distribución espacial en un mapa final.

3.3. Metodología

La metodología propuesta consiste en cuatro fases de investigación:

1. Recopilación de datos e información.
2. Preprocesamiento y procesamiento de las imágenes satelitales utilizando el software especializado para manejo de sensores remotos complementado con herramientas disponibles en las plataformas web de las Agencias Espaciales.
3. Análisis e interpretación geológica a partir de imágenes satelitales mediante el método visual y automático.
4. Integración de la información espacial.

3.4. Recopilación de datos e información

Consistió en la búsqueda, recopilación de datos y revisión bibliográfica de informes, artículos científicos, libros, páginas web de las agencias espaciales, entre otros; relacionados con el uso de imágenes ópticas y radar.

De igual manera, se consultó información cartográfica básica y geológica elaborada y publicada del área de estudio.

Se procedió con la selección y descarga de las imágenes satelitales disponibles del área de estudio. En el trabajo de investigación se usaron cinco conjuntos de datos satelitales entre ópticos y radar de mediana y alta resolución espacial que cubren el área de estudio.

En la actualidad, a través de internet se pueden encontrar varias páginas web, que permiten seleccionar y descargar datos satelitales de manera gratuita. Adicionalmente, existen las imágenes disponibles en las instituciones que proveen datos satelitales en cada país, para el caso de Ecuador, la institución rectora que proveía datos satelitales orientados a la defensa e inventario de los recursos naturales fue el Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) que, debido a la nueva política gubernamental, actualmente forma parte del Instituto Geográfico Militar de Ecuador.

Por otra parte, se debe mencionar que el IIGE dispone de las imágenes satelitales ASTER adquiridas en el año 2011.

En esta investigación una buena parte de tiempo se ocupó en la búsqueda, selección y descarga de imágenes ópticas y radar, previo al conocimiento sobre el lanzamiento de plataformas basadas en computación en la nube, a finales del año 2018 y principios del 2019.

Actualmente, las plataformas en la web están revolucionando y aportando un gran cúmulo de datos de observación de la Tierra. A tal punto que permiten realizar inclusive procesos y análisis de datos de sensores remotos en línea, lo que ahorra una gran cantidad de tiempo a los investigadores, tanto en el preprocesamiento como en el procesamiento de las imágenes, optimizando inclusive los recursos tecnológicos que se disponen, permitiendo al investigador enfocarse mayormente en el análisis e interpretación de estas imágenes.

Una de estas plataformas, es Google Earth Engine (GEE), donde se pueden visualizar conjuntos de datos geoespaciales y se puede realizar el análisis científico a escala petabyte (PB), se conoce que la plataforma ha sido desarrollada por la infraestructura de la nube de Google y brinda el acceso gratuito a las supercomputadoras, esta plataforma cuenta con imágenes satelitales almacenadas, organizadas y disponibles, además tiene un editor de códigos (scripts) y no tiene limitaciones como lo tiene el software comercial (donde lo que no está hecho tiene un coste muy alto por el desarrollo que demanda). Adicionalmente, GEE presenta un conjunto de datos geoespaciales con capacidades de análisis para detección de cambios, mapeo de tendencias y cuantificación de diferencias en la superficie de la Tierra (<https://earthengine.google.com>).

Otra plataforma desarrollada en el ambiente de nube es la denominada SEPAL (System for Earth Observation Data Access, Processing and Analysis for Land Monitoring), es una combinación de GEE y software de código abierto como GDAL, Jupyter, Open Foris Geospatial Toolkit ORFEO Toolbox, Python, R, R Shiny Server, R Studio Server y SNAP Toolkit (<https://docs.sepal.io/en/latest/index.html>). Es un proyecto y una plataforma de código abierto que permite a los usuarios obtener una mejor comprensión de la dinámica de la cubierta terrestre al facilitar el acceso y el uso eficientes de los datos de observación de la Tierra, sin necesidad de conocimientos de codificación (<https://docs.sepal.io/en/latest>). Tiene un entorno informático con módulos de procesamiento y almacenamiento, por lo tanto, no se trabaja en el escritorio, sino más bien en una variedad de supercomputadoras, actualmente estas computadoras forman parte de la nube de Amazon. Especialistas desarrolladores de FAO, indican que la búsqueda de imágenes, la composición, la vista previa y la descarga en esta plataforma están a cargo de GEE, su gran ventaja es que se utilizan recursos de procesamiento basados en la nube y presenta la facilidad de acceder a las imágenes Landsat, ASTER, Sentinel 1 y otras. Además, dispone de varios algoritmos creados para diferentes aplicaciones y la posibilidad de personalizar códigos para obtención de datos satelitales. Una buena parte de los algoritmos de descarga y procesamiento de SEPAL son traducciones de GEE, que se realizan desde Javascript a Python.

Aprovechando las supercomputadoras basadas en la nube y las modernas infraestructuras de datos geoespaciales, SEPAL permite el acceso y el procesamiento de datos históricos de satélites, así como datos más recientes de Landsat y datos de mayor resolución del programa europeo Copernicus (<https://github.com/openforis/sepal>). La

plataforma se encuentra en permanente actualización y mejoramiento constante de las herramientas que dispone.

Esta tendencia se espera que siga en crecimiento durante los próximos años, ya que estas plataformas con enfoque de nube han quebrantado paradigmas en referencia a las limitaciones que se conocían para el procesamiento, almacenamiento y acceso de datos (Tituaña Jami, 2018).

A partir de obtener este conocimiento durante el desarrollo de la tesis, se procedió a trabajar en el ambiente de las plataformas anteriormente mencionadas, con la finalidad de optimizar tiempo en el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes.

Imágenes ópticas

Las imágenes ópticas de satélites multiespectrales corresponden a Landsat-8 OLI y ASTER, adecuadas para examinar la escala regional. Del servidor de USGS se distinguió 5 escenas Landsat-8 OLI y 7 escenas ASTER adquiridas por el IIGE (Tabla 5).

Tabla 5. Datos de las imágenes satelitales ópticas Landsat-8 OLI y ASTER

CÓDIGO	PATH	ROW	NIVEL DE PROCESAMIENTO	COBERTURA NUBOSA (%)	FECHA DE TOMA
LC08_L1TP_011062_20140802_20170420_01_T1	11	62		38	20-04-2017
LC080100622014191LGN00	10	62		34	2017-04-27
LC08_L1TP_010062_20170920_20200903_02_T1	10	62	L1TP	35	2020-09-03
LC08_L1TP_010062_20180907_20180912_01_T1	10	62		35	2018-09-12
LC08_L1TP_010063_20180907_20180912_01_T1	10	63		11	2018-09-12

CÓDIGO	CARACTERÍSTICAS	
AST-L1B-14139	NIVEL DE PROCESAMIENTO	L1B
AST-L1B-49486	FORMATO	HDF / DAT
AST-L1B-09883	FECHA DE TOMA	2001 -2007
AST-L1B-22386	COBERTURA TEMPORAL	

2000-03-04 al presente

AST-L1B-22381	EXTENSIÓN ESPACIAL	Global
AST-L1B-10897	SUPERFICE	60 km x 60 km
AST-L1B-14654	RESOLUCIÓN ESPACIAL	15, 30, 90 m

Fuente: USGS, IIGE. 2018

Figura 21: Path y row de la serie Landsat-8 OLI del área de estudio

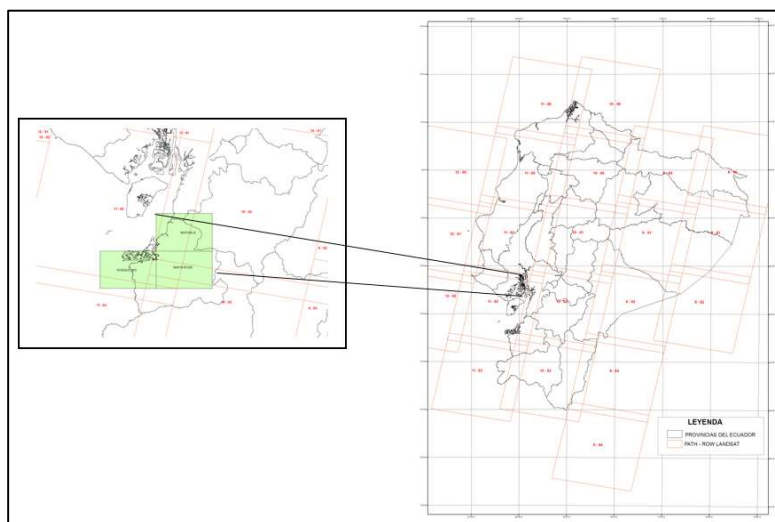
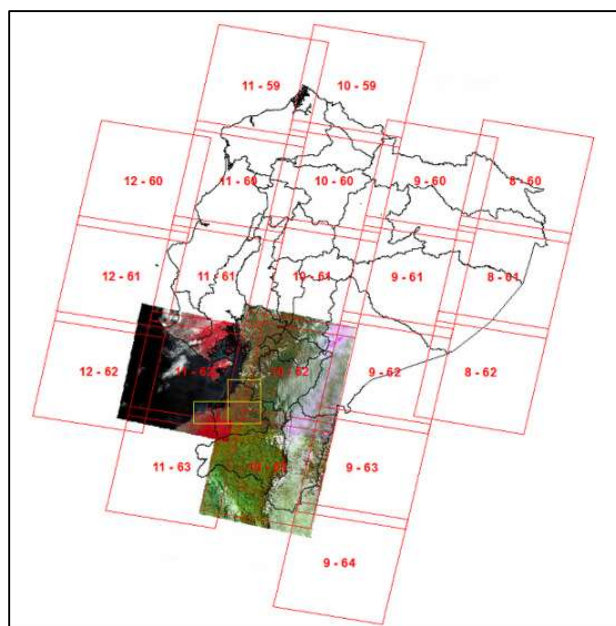


Figura 22: Imágenes Landsat que cubren el área de estudio



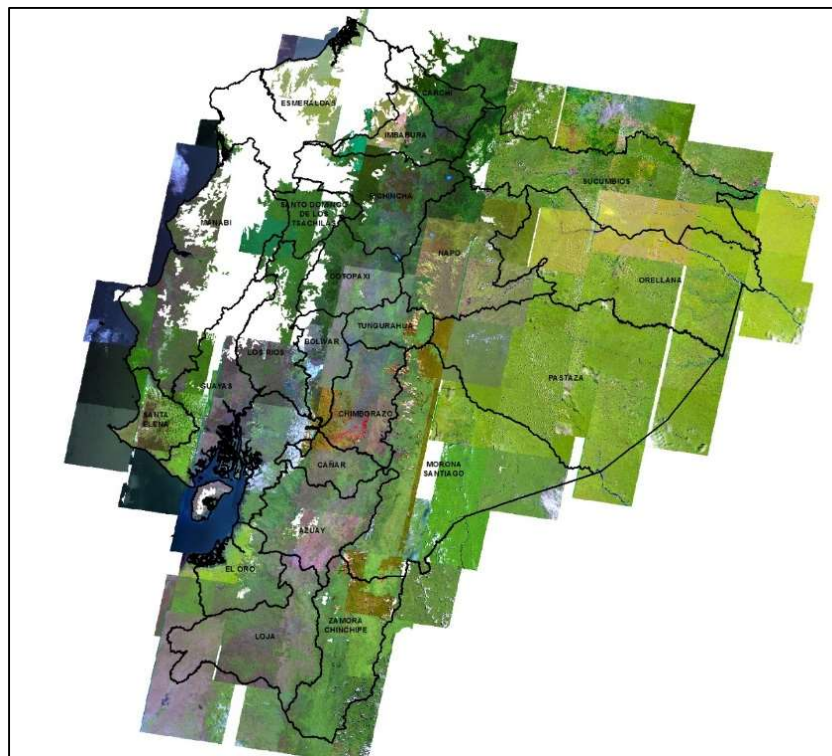
Elaborado por: Autor, 2019

Se revisaron muchas más imágenes Landsat en la plataforma GEE, se debe destacar que desde esta plataforma se puede tener acceso gratuito a la serie histórica de Landsat, se incluyen capturas de hasta las últimas dos semanas.

Otra fuente principal de datos utilizada, fueron las imágenes ópticas ASTER que por sus características espectrales y geométricas se han utilizado especialmente para aplicaciones geológicas, se seleccionaron varias imágenes con la menor cantidad de nubes y otros factores atmosféricos como niebla, bruma y humo.

La figura 23 muestra las imágenes ASTER adquiridas por el IIGE, con nivel de procesamiento L1B, que corresponde a radiancia georreferenciada en el sensor (formatos HDF y DAT).

Figura 23: Imágenes ASTER disponibles en el IIGE



Fuente: IIGE, 2018

En la aplicación geológica no es necesario contar con imágenes adquiridas en fechas actuales, pero sí es necesario seleccionar las escenas con la menor cobertura de nubes. Ambos tipos de imágenes tienen un porcentaje de nubosidad que varía entre 11 y 40%.

Los sensores Landsat-8 OLI y ASTER registran la energía reflejada y emitida desde la Tierra, en varias longitudes de onda del espectro electromagnético (NASA, 2022), constan de 11 y 14 bandas espectrales respectivamente (Tabla 6).

Tabla 6. Los rangos espectrales y longitudes de onda de imágenes satelitales ópticas

Landsat-8 OLI y ASTER			
LANDSAT-8 OLI		ASTER	
SPECTRAL RANGE	WAVELENGTH (μm)	SPECTRAL RANGE	WAVELENGTH (μm)
1-Coastal aerosol	0.435 - 0.451		
2-Blue	0.452 - 0.512		
3-Green	0.533 - 0.590	1-VNIR	0.52-0.60
4-Red	0.636 - 0.673	2-VNIR	0.63-0.69
5-NIR	0.851 - 0.879	3N-VNIR	0.78-0.86
6-SWIR1	1.566 - 1.651	3B-VNIR	0.78-0.86
		4-SWIR	1.600-1.700
		5-SWIR	2.145-2.185
7- SWIR2	2.107 - 2.294	6-SWIR	2.185-2.225
		7-SWIR	2.235-2.285
		8-SWIR	2.295-2.365
		9-SWIR	2.360-2.430
8-Panchromatic	0.503 - 0.676		
9-SWIR/Cirrus	1.363 - 1.384		
		11-TIR	8.475-8.825
10-TIR	10.60 - 11.19	12-TIR	8.925-9.275
		13-TIR	10.25-10.95
11-TIR	11.50 - 12.51	14-TIR	10.95-11.65

Fuente: USGS, 2019; NASA, 2022

Un factor importante que fue tomado en cuenta en este proceso, es tratar de obtener imágenes que han sido tomadas en época seca, donde la cobertura vegetal es menor, esto permite una mejor diferenciación de litología y estructuras. Dependiendo de la ubicación geográfica de la zona y una temporalidad marcada con período seco y período de lluvias, se pueden escoger preferentemente las imágenes del período seco para discriminar las características geológicas.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología - INAMHI (2019), informó que, debido al cambio climático, actualmente en Ecuador no se tienen marcadas o definidas las

estaciones verano o invierno, sino únicamente se clasifican los días, como días soleados y días lluviosos.

Adicionalmente, se utilizó el Modelo Digital de Elevación (MDE) Alos Palsar de 12,5 m de resolución obtenido de la plataforma de libre acceso Alaska Satellite Facility (ASF).

Imágenes radar

En segundo lugar, se utilizaron para este trabajo las imágenes obtenidas por tecnología radar (Figuras 24, 25 y 26). Se incluyen: 1 imagen Alos Palsar RTC (ASF, 2022), 1 imagen Sentinel 1 GRD (ESA, 2007; ASF, 2022) que fueron descargadas gratuitamente de las plataformas ASF- Earth Data Vertex (ASF) y Agencia Espacial Europea (ESA) para fines de investigación (proyecto presentado) y 1 imagen TerraSAR-X EEC (AIRBUS, 2015), una cortesía del German Remote Sensing Data Centre (DFD) a través del ex Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).

Figura 24: Descarga de imágenes Alos Palsar

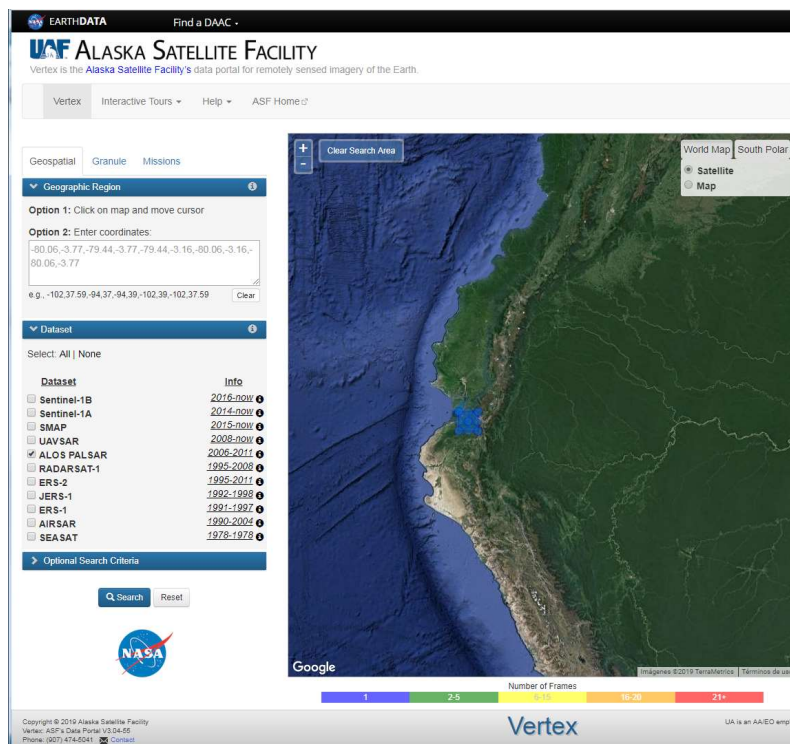


Figura 25: Descarga del Hi-Res Terrain Corrected

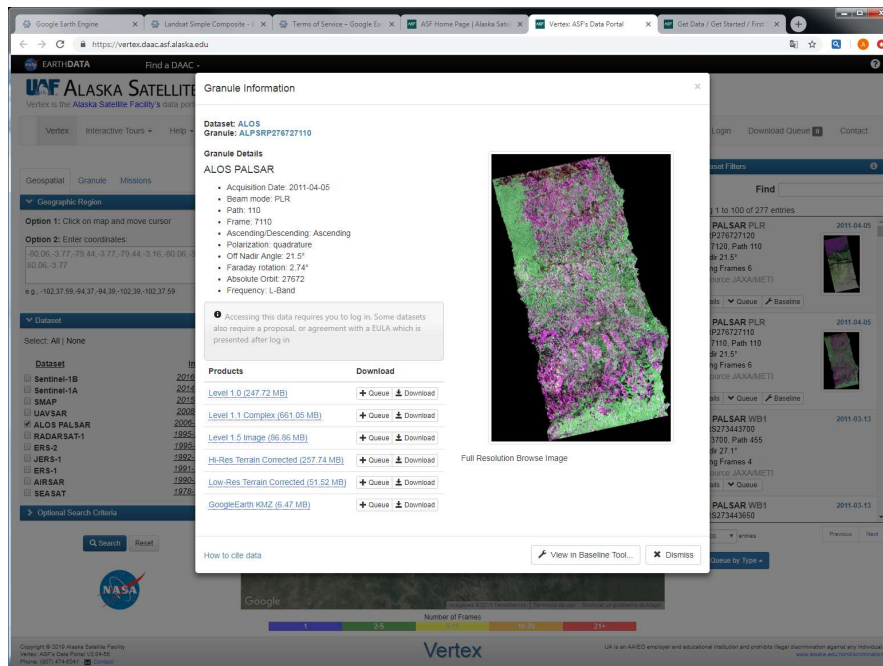
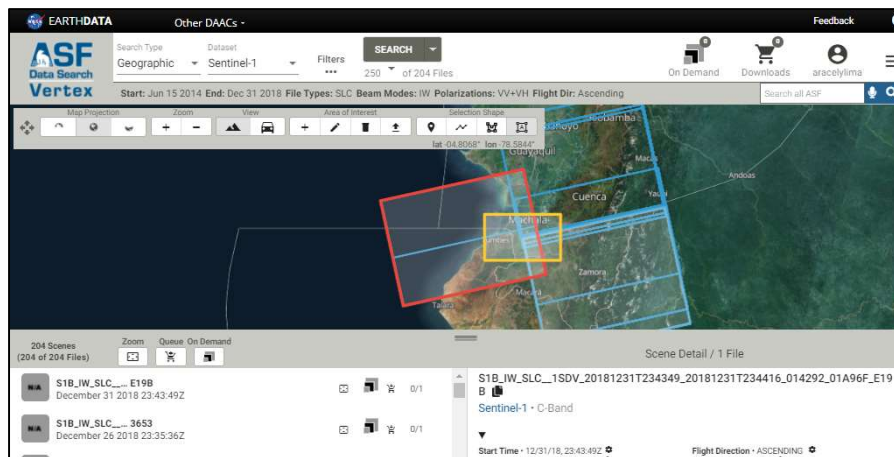


Figura 26: Descarga de Sentinel 1



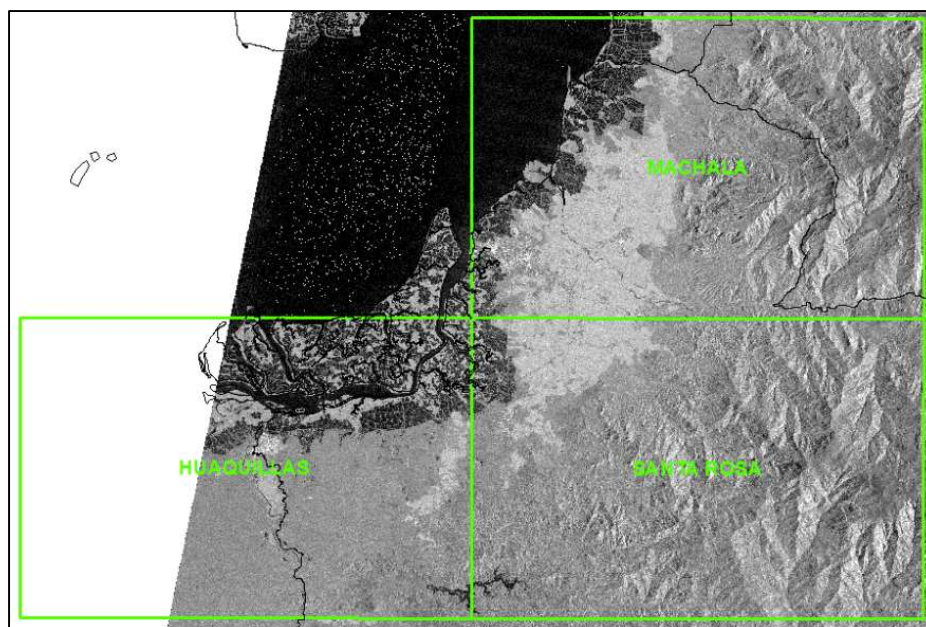
Fuente: ASF, 2020

La figura 27 muestra la imagen TerraSAR-X EEC (AIRBUS, 2015) del área de estudio, una cortesía obtenida del German Remote Sensing Data Centre (DFD) a través del ex Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE).

Figura 27: Imagen TerraSAR X

TSX1_SAR_EEC_RE__SC_S_SRA_20160225T105936_20160225T105958

Fecha de adquisición: 2016-02-25



Se tomaron en cuenta criterios de bandas, resoluciones espaciales, ángulos de incidencia y órbitas, polarizaciones, beam modes, entre otros.

Las tres imágenes SAR utilizadas, fechas tomadas y sus características instrumentales se resumen en la tabla 7.

Tabla 7. Principales características de las imágenes radar empleadas

	ALOS 1	Sentinel-1B	TerraSAR X
Agencia	JAXA – Cross Restec	Agencia Espacial Europea (ESA)	Centro Alemán de Datos de Teledetección (DFD) y EADS Astrium
Instrumento	PALSAR	SAR	SAR
Banda	L	C	X
Longitud de onda	30 - 15	7.5 - 3.8	3.8 - 2.4
Fecha	2011-03-13 2011-04-05	2019-03-25	2016-02-25
Frecuencia (GHz)	1 - 2	4 - 8	8 - 12

Ciclo de repetición (días)	46	6	11
Polarización	Cuadratura	VV + VH	HH
Dirección de órbita	Ascendente	Ascendente	Descendente
Modo del haz	PLR	<i>Interferometric Wide Swath (IW)</i>	<i>ScanSAR (SC)</i>
Resolución	30x10 m	5x20 m	18-40 m
Tipo de producto	1.1 Complex	SLC	L1B
Nivel de producto	<i>Hi-Res Terreno Corregido</i>	<i>L1 Detected High-Res Dual-Pol (GRD-HD)</i>	EEC*

*Enhanced Ellipsoid Corrected

Fuente: ASF, ESA, GEOSPATIAL, AIRBUS. 2021

En resumen, hoy en día, el acceso a las imágenes radar puede ser gratuito desde las diferentes plataformas antes mencionadas:

- Alaska Satellite Facility, ASF Data Search - Vertex
<https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/>
- European Space Agency Portal
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1>

Las imágenes radar atraviesan toda clase de obstáculos atmosféricos (nubes, brumas, lluvia, etc.), pueden ser adquiridas a cualquier hora del día o de la noche y en cualquier lugar; estudios demuestran que son ideales para trabajar en grandes áreas en estudios previos de reconocimiento (Vergara, 1988).

3.4.1. Preprocesamiento de las imágenes satelitales

La segunda fase consistió en el preprocesamiento y procesamiento de las imágenes satelitales. Para ello, se analizó primeramente el punto de vista de algunos expertos:

Rasilla y Conde (2023) indica que el preprocesamiento debe realizarse en las imágenes antes de ser usadas, pues las imágenes requieren correcciones radiométricas, las cuales tienden a remover los efectos de los errores del sensor y de la contaminación producida por la atmósfera.

En referencia a las imágenes radar, Chuvieco (2002) sustenta que estas imágenes tienen distorsiones geométricas, las variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del haz, implican notables deformaciones geométricas. Además, la señal de retorno no solo depende del coeficiente de retrodispersión (σ) del objeto, sino también de su distancia a la antena, por lo que es complejo la interpretación de las imágenes radar.

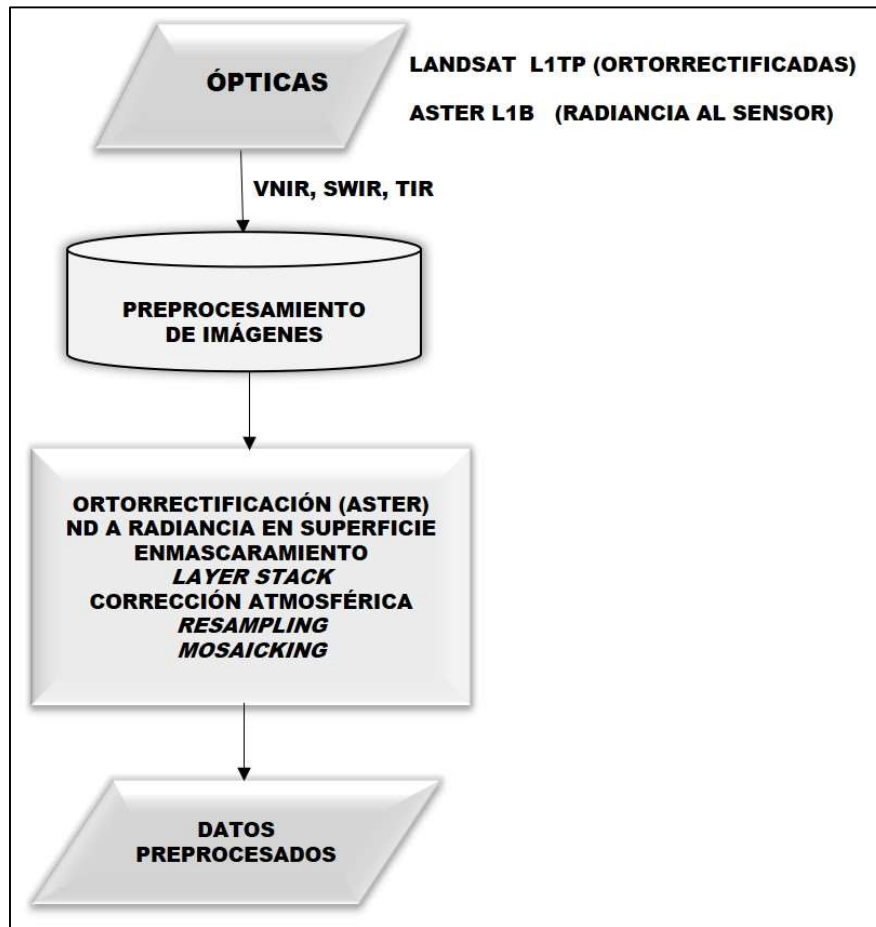
Colesanti y Wasowski (2006) citan a Monti Guarnieri (2002), indican que, los efectos de distorsión geométrica causados por el mecanismo del radar inducen una resolución que depende de la pendiente a lo largo del rango oblicuo (ground range).⁴

Chuvieco (2007) sostiene que el preprocesamiento permite corregir problemas geométricos y espectrales de las imágenes, generados por diversas fuentes, tales como: distorsiones originadas por la plataforma satelital, el sistema de registro de datos del sensor, la rotación terrestre y la influencia de la atmósfera.

El preprocesamiento incluye correcciones radiométricas y geométricas, esto permite la creación de un área adecuada para trabajar, con buenas características espectrales a ser utilizadas en el proceso de extracción de la información geológica.

Sensores ópticos

El flujograma metodológico comienza con el preprocesamiento de las imágenes ópticas realizado en el software ENVI (Figura 28).

Figura 28: Flujograma metodológico de preprocesamiento imágenes ópticas

El nivel de preprocesado de Landsat-8 OLI es L1TP (Terrain Precision Correction), tiene una calibración radiométrica (imperfecciones presentes en los píxeles corregidas) y ortorrectificación (deformaciones inducidas por el relieve y minimizadas) utiliza puntos de control terrestre GCP o información de posición integrada a bordo para entregar una imagen registrada a una proyección cartográfica (IGAC, 2013; NASA, 2022). Los GCP utilizados para la corrección L1TP se derivan del conjunto de datos Global Land Survey (GLS) y datos de elevación proporcionados por un Modelo Digital de Elevación (MDE) para corregir el desplazamiento del relieve.

El sensor ASTER con nivel de procesamiento L1B, corresponde a radiancia georreferenciada en el sensor, donde las dimensiones para cada uno de los tres subsistemas de sensores: visible infrarrojo cercano (VNIR), infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo térmico (TIR) permanecen constantes de una escena a otra, con

resolución espacial de 15 m, 30 m y 90 m respectivamente (Abrams, 2002; ERSDAC, 2012). Las imágenes ópticas se encuentran en bandas separadas y escala de grises.

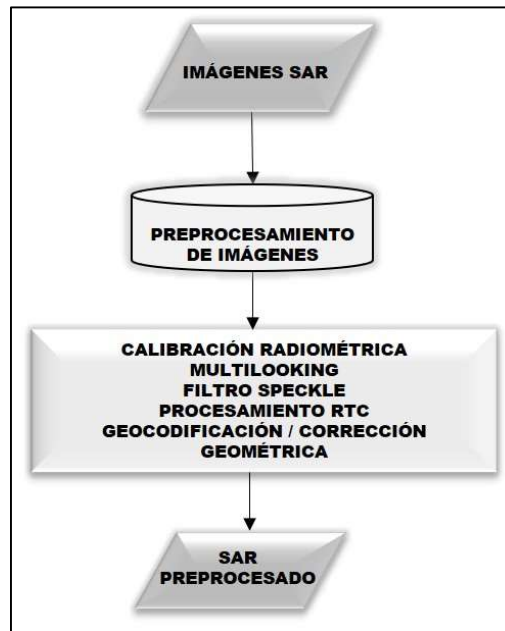
El proceso de correcciones geométricas y topográficas fue realizado en el software SilcAst desarrollado para ortorrectificar exclusivamente las imágenes ASTER, genera imágenes ortorrectificadas por cada banda de la imagen, usando el DEM derivado de ASTER y puntos de control de tierra. Se transformaron los valores de nivel digital ND a radiancia espectral (Kruse, 2004).

Para los dos tipos de imágenes se enmascararon los elementos de no interés (nubes y sombras). Se integraron las diferentes bandas de interés en un solo archivo (layer stack; INIGEMM, 2013). Se realizó la corrección atmosférica que elimina los efectos atmosféricos, esencial antes de cualquier análisis cuantitativo (Adiri et al., 2020), para obtener valores de reflectancia espectral (Song et al., 2001). Se empleó el módulo FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) del software ENVI basado en el modelo de transferencia de radiación MODTRAN (MODerate resolution atmospheric (TRANsmision) (Anderson et al., 2000; Chakouri et al., 2020) utilizando información del metadato de la imagen (coordenadas del centro de la escena, valores de temperatura del aire superficial, vapor de agua, latitud (Atmospheric Model Tropical para latitudes entre 0 y 5 grados en el caso de Ecuador), entre otros; datos indispensables para poder aplicar la corrección atmosférica (Aguilar et al., 2014).

Sensores Radar

La metodología utilizada contempló también el uso de imágenes radar, con el fin de contar con una herramienta tecnológica completa, auxiliar y complementaria, que se ajuste perfectamente con las imágenes ópticas utilizadas anteriormente.

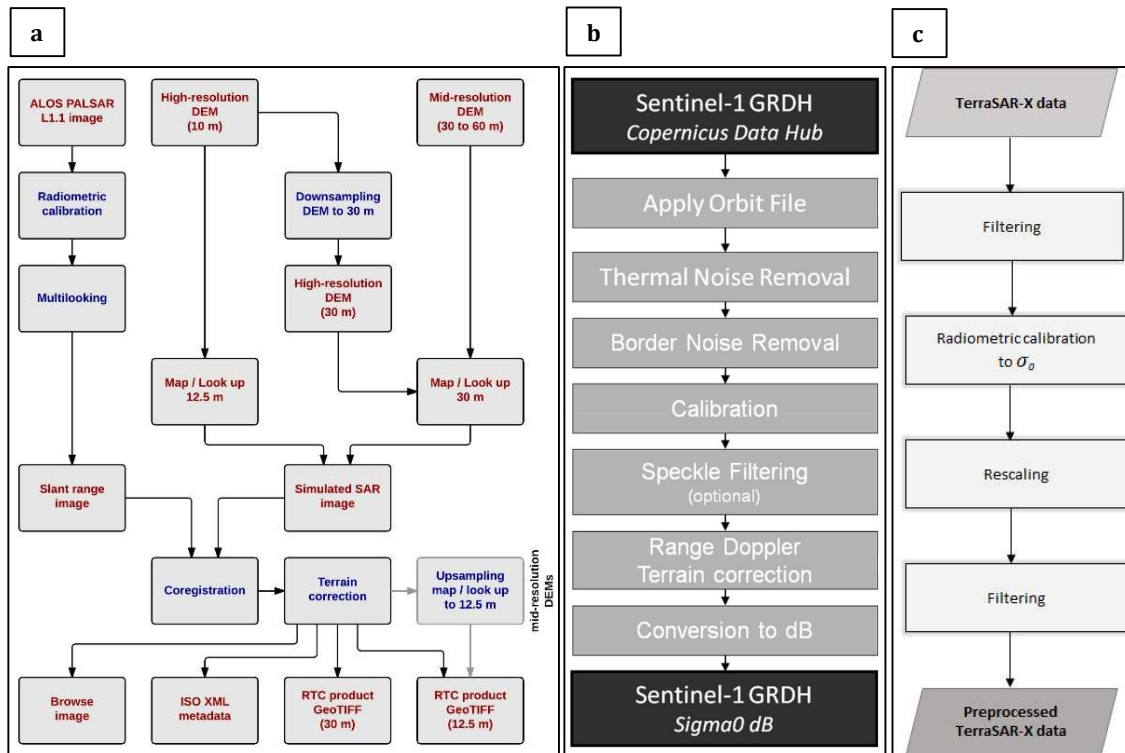
Los efectos de distorsión geométrica que se presentan en los datos SAR, ya sea por el relieve o la pendiente local del terreno (α), deben ser tomados muy en cuenta, ya que esa distorsión puede influir directamente, acarreando errores de interpretación, por lo que es necesario realizar el preprocesamiento de imágenes, realizando correcciones y calibración para conseguir una representación similar a la superficie terrestre. La figura 29 muestra el preprocesamiento básico realizado en las imágenes SAR.

Figura 29: Flujograma metodológico de preprocesamiento SAR

La apariencia de las imágenes radar que se ve influenciada por los parámetros del sensor (polarización de la señal y longitud de onda), así como por los factores ambientales (humedad del suelo y rugosidad de la superficie) (Meyer, 2019); lo que repercute en que el preprocesamiento de los datos radar sea complejo y muy intenso desde el punto de vista informático, al igual que el software es complicado de usar y extremadamente caro (ASF, 2023). Para obtener una escena adecuada y que sirva para la interpretación, se optó por conseguir escenas preprocesadas, presentando un proyecto de investigación a las Agencias Espaciales para que faciliten y pongan a disposición los diferentes productos existentes. Actualmente, se ha implementado este procedimiento para que los datos SAR sean accesibles al investigador (ASF, 2023).

Para el caso de estudio, fue una excelente alternativa contar con el acceso del servicio para investigación, a cargo de la Instalación Satelital de Alaska (Alaska Satellite Facility), que forma parte del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska en Fairbanks, denominado HyP3, el cual facilitó el procesamiento de imágenes SAR del área de estudio.

La figura 30abc muestra las diversas etapas que las Agencias Espaciales, realizan para obtener los diferentes productos (ASF, 2023).

Figura 30: Flujograma de preprocesamiento

a. Alos Palsar; b. Sentinel 1; c. TerraSAR-X

Fuente: ASF, 2015; Filipponi, F., 2019; Martinis, S., 2013

Para este trabajo, se logró obtener el producto Alos Palsar RTC que tiene corrección radiométrica y corrección geométrica. Ambas correcciones del RTC hacen un producto superior para aplicaciones científicas. Las escenas se presentan en el formato GeoTIFF compatible con GIS. Los datos RTC son escenas polarimétricas y de haz fino (ASF, 2023).

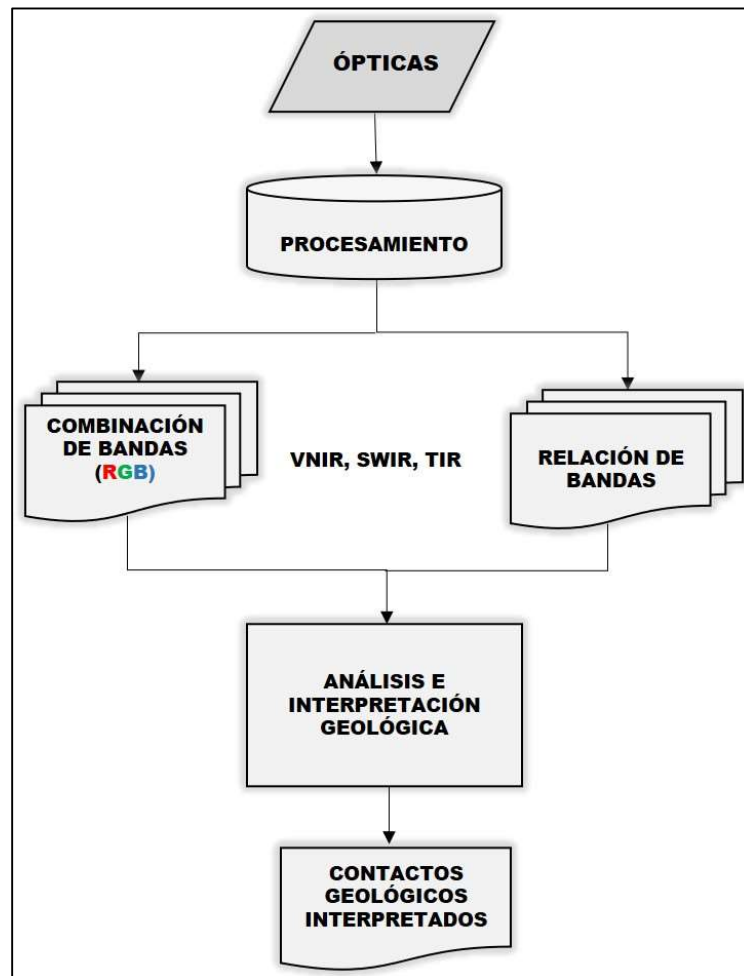
Las imágenes Sentinel 1 producto Ground Range Detected GRD, son datos SAR enfocados, que han sido detectados, analizados y proyectados al rango terrestre utilizando el modelo de elipsoide terrestre WGS84 (Filipponi, F. 2019; ARSET, 2021; ESA, 2021), con la finalidad de facilitar el procesamiento digital, por el tamaño de las imágenes (aprox. 1 Gb), además incluye calibración radiométrica (efectos de los errores del sensor y de los factores ambientales removidos) y un tratamiento multilooking. Para reducir la apariencia granulosa, es aplicado un filtro de moteado o speckle (distorsión radiométrica inherente a cualquier sistema de adquisición de imágenes radar) (Álvarez-Mozos et al., 2005); y, la corrección geométrica (por las variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del haz en las deformaciones).

La imagen TerraSAR-X producto Enhanced Ellipsoid Corrected EEC, permite una superposición rápida y muy precisa con otros datos espaciales. Se utiliza para todo tipo de fines cartográficos que requieren una geocodificación precisa, se presenta en formato GeoTIFF (Martinis, 2013).

3.4.2. Procesamiento, análisis e interpretación geológica a partir de imágenes ópticas y radar

Se aplicaron técnicas de procesamiento, análisis espacial para la detección de objetos geológicos: contactos geológicos y estructuras geológicas, así como en la generación automática de lineamientos a partir de las imágenes satelitales. La figura 31 resume la metodología empleada para el procesamiento, análisis y la interpretación geológica de las imágenes ópticas.

Figura 31: Flujograma metodológico para interpretación geológica



Para mayor facilidad, se crearon varios mosaicos de imágenes ópticas y de radar; y posteriormente se analizaron algunas alternativas de fusión con las imágenes escogidas para aumentar la precisión de la interpretación y resaltar las características geológicas. Los dos tipos de imágenes utilizadas en el área de investigación se complementaron favorablemente.

3.3.3.1. Contactos geológicos

Como primer criterio se empleó el método de observación visual de las imágenes provenientes de las imágenes Landsat y ASTER, basado en el uso de diferentes combinaciones RGB (Rojo/Verde/Azul) y relación de bandas (cocientes de bandas) como se muestra en la tabla 8, combinaciones específicas y exclusivas para la interpretación de contactos geológicos de las unidades mapeables, que son la base para la confección de un mapa geológico. Esto se fundamenta en que los diferentes conjuntos de rocas y materiales presentan patrones espectrales característicos de absorción en ciertas longitudes de onda.

Tabla 8. Combinaciones de bandas RGB analizadas

RED	GREEN	BLUE	CARACTERÍSTICA	SENSOR	FUENTE
12	7	2	Geología	ASTER	(e.g., II GE)
14	5	1	Contactos geológicos	ASTER	(e.g., II GE)
3	2	1	Contactos geológicos	ASTER	(e.g., II GE)
3	4	5	Contactos geológicos	ASTER	(e.g., II GE)
6	3	1	Geología, estructuras	ASTER	(e.g., Navarra)
7	4	1	Interpretación geológica	LANDSAT	(e.g., Azcurra - SEGEMAR)
7	4	2	Estructuras	ASTER	(e.g., Marchionni - UNPL-CIC)
7	3	1	Litología Interpretación geológica	ASTER	(e.g., Rowan - USGS)
6	5	4	Alteraciones hidrotermales	ASTER	(e.g., Di Tomasso - SEGEMAR; Marchionni - UNPL-CIC)
3/1	4/6	7/5	Alteraciones hidrotermales	ASTER	(e.g., Azcurra - SEGEMAR)
4/1	3/1	12/14	Contactos geológicos, Geología	ASTER	(e.g., Marquetti - SEGEMAR)

RED	GREEN	BLUE	CARACTERÍSTICA	SENSOR	FUENTE
12/11	12/13	12	Volcánicos	ASTER	(e.g., Addelsalam)
4/5	4/6	4/8	Alteraciones hidrotermales	ASTER	(e.g., Castro - SEGEMAR)
4/5	4/6	4/7	Alteraciones hidrotermales	ASTER	(e.g., Castro - SEGEMAR)
4/8	4/2	8/9	Zonas de alteración	ASTER	(e.g., SEGEMAR)
3/1	5/4	5/7	Contactos geológicos	ASTER	(e.g., Safwat Gabr)

Las combinaciones RGB producen imágenes de color, esto permite al geólogo analizar y realizar la interpretación de los objetos identificables, siguiendo los contornos de los diferentes polígonos o cuerpos que se observan en diferentes gamas de colores, se deben tomar los polígonos más representativos y evidentes para inferir las unidades geológicas. Aplicando esta técnica, se puede optimizar el área planificada para el levantamiento del cartografiado geológico.

En esta investigación se han tenido a disposición varias herramientas tecnológicas y plataformas (software especializado para tratamiento de imágenes satelitales, Sistemas de Información Geográfica SIG, Google Earth Engine GEE, SEPAL) que han contribuido para facilitar el proceso de combinación de las diferentes bandas y ratios, tal como se muestra en la tabla 8, los algoritmos disponibles permiten en su programación realizar cambios de las diferentes bandas con el propósito de escoger los mejores compositos o mosaicos de las escenas.

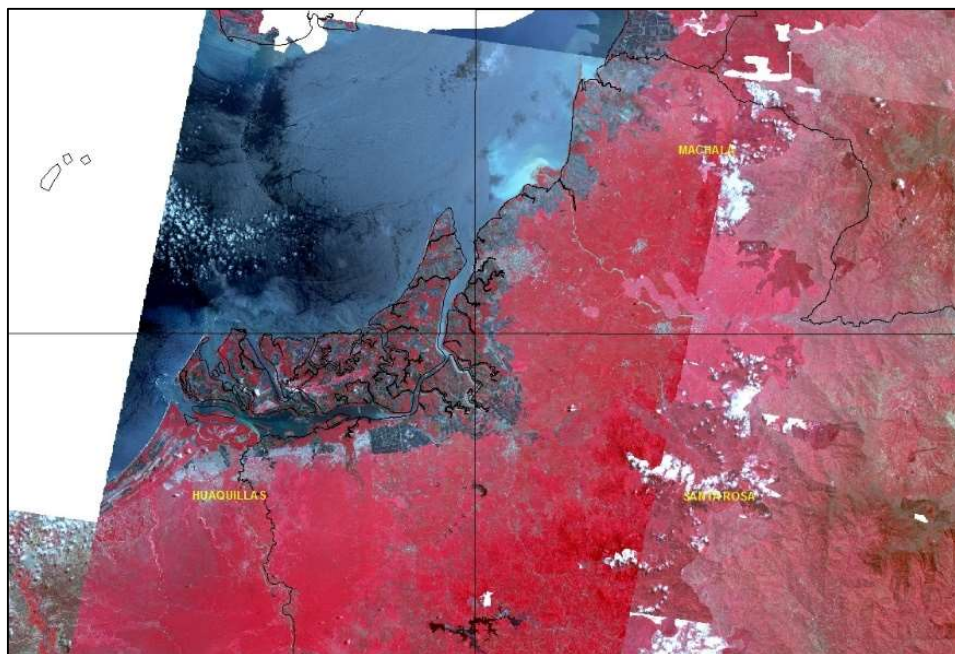
A continuación, algunos ejemplos de los compositos obtenidos con imágenes ópticas (Figuras 32, 33 y 34):

Figura 32: Mosaico de imágenes LANDSAT
Período: 2013-01-01, 2018-12-31
LC08_C01_T1_SR
RGB 742



Fuente: Google Earth Engine, 2019

Figura 33: Mosaico de imágenes ASTER
Período: 2000-01-01, 2018-08-15
Aster L1T
RGB 3N, 2, 1



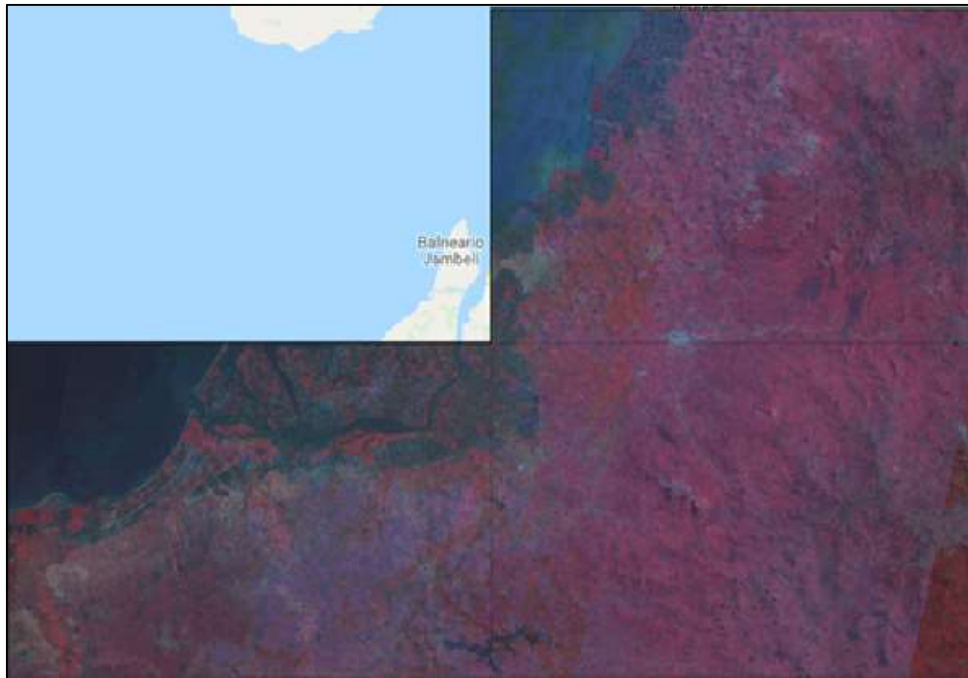
Fuente: Google Earth Engine, 2019

Figura 34: Mosaico de imágenes ASTER

Período: 2000-01-01, 2018-08-15

Aster L1T

RGB: 14, 5, 1



Fuente: Google Earth Engine, 2019

Las imágenes de falso color obtenidas por las diferentes combinaciones de bandas y ratios en composición RGB (3/1, 5/4, 5/7) (4/1, 3/1, 12/14) (ver mayor detalle en la tabla 8), proporcionan una respuesta espectral visual que resalta las características geológicas.

3.4.2.1. Estructuras geológicas

Por otra parte, las imágenes de radar, aunque limitadas desde el punto de vista espectral (una sola frecuencia) pero con un sistema de iluminación lateral (Meyer, 2019), realzan las pequeñas diferencias de textura. Esto acompañado por la orientación de las laderas y la rugosidad del terreno, utilizando el DEM, permitieron realzar las estructuras para la identificación de lineamientos rectos o algo curvos en las imágenes.

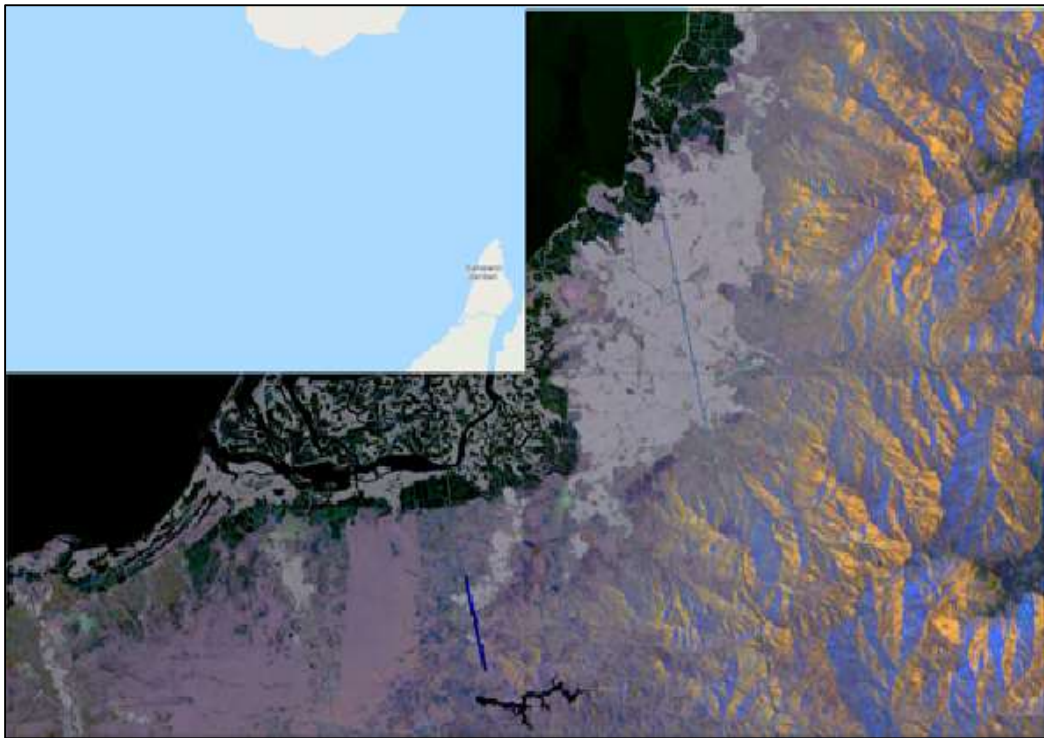
Para este propósito, se procesaron mosaicos con imágenes radar GGE (Figuras 35 y 36):

Figura 35: Mosaico de Sentinel – 1

Copernicus_S1_GRD

Dual polarization VV-VH

Ascending and Descending



Fuente: Google Earth Engine, 2019

Mediante GGE, se obtuvo un mosaico fusionado de Sentinel 1 y Alos Palsar, con características espectrales (resolución espacial y penetración en el suelo respectivamente), para poder identificar rasgos geológicos.

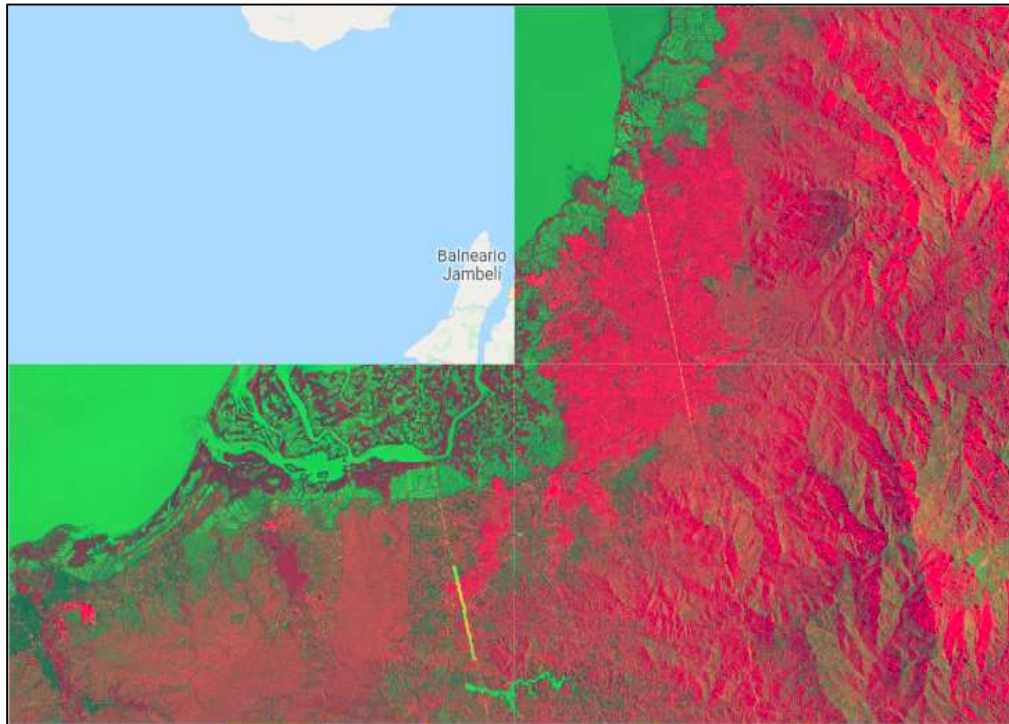
Figura 36: Mosaico de imágenes Sentinel-1 y Alos Palsar

Período: 2016-01-01, 2016-12-31

Sentinel-1: VV VH

Alos Palsar: HH y HV

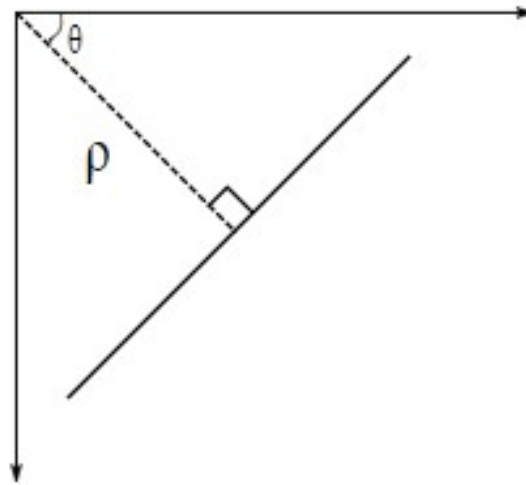
Ascending and Descending



Fuente: Google Earth Engine, 2019

Adicionalmente, tomando en cuenta que las imágenes satelitales son matrices de datos numéricos, como segundo criterio surgió la idea de probar dos métodos automáticos para la detección de lineamientos estructurales, el primero, aunque no pudo ser implementado aún, es importante mencionar que se intentó mediante la aplicación de la “Transformada Progresiva Probabilística de Hough”, esto fue realizado en el sistema operativo Ubuntu 18-04, lenguaje C++, a partir de la librería de visión computacional OpenCV (2014), las pruebas fueron realizadas por Muñoz (2020) en conjunto con el grupo del trabajo del IIGE.

El algoritmo debía detectar formas lineales, siempre que se pueda representar la forma matemática $y = mx + c$ o en forma paramétrica, como $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$, donde ρ es la distancia perpendicular desde el origen a la recta, y θ es el ángulo formado entre esta perpendicular a la recta y el eje horizontal, medido en sentido contrario a las agujas del reloj. Esta dirección varía según cómo represente el sistema de coordenadas (Figura 37) (UNIPYTHON, 2020).

Figura 37. Relación trigonométrica de la Transformada de Hough

Fuente: UNIPYTHON, 2020

Por lo tanto, si la línea pasa por debajo del origen, tendrá un ρ positivo y un ángulo menor que 180° . Si la línea va por encima del origen, el ángulo también se toma menor de 180° pero ρ se toma negativo. Cualquier línea vertical tendrá 0° y las líneas horizontales tendrán 90° (UNIPYTHON, 2020). Luego de aplicar el algoritmo, cada elemento de la matriz tendrá un valor igual a la suma de los puntos o píxeles que están posicionados en la línea representada por parámetros cuantificados (ρ, θ) en la matriz. De este modo, el elemento (en la posición (ρ, θ) de la matriz) con el valor más alto indicará la línea más representada en la imagen radar (UNIPYTHON, 2020).

La aplicación de la Transformada Progresiva Probabilística de Hough, se realizó en las imágenes radar con polarizaciones VV y VH de Sentinel 1 y polarizaciones HH y HV de Alos Palsar, descargadas de la plataforma GEE. Una vez que se generaron los lineamientos con la corrida del algoritmo para cada polarización, se procedió a la calibración de: umbral, dimensión máxima de los lineamientos y el espacio máximo interlínea, usando como referencia los lineamientos generados a través de la interpretación visual. Para evaluar la calidad de los resultados obtenidos, se evaluaron las topologías y similitudes entre cada línea obtenida y los lineamientos de referencia.

En la plataforma se evitó realizar el filtrado de ruido *speckle*, porque este tipo de filtrado hace disminuir el contraste característico de lineamientos en imágenes radar y por ende se reduce la potencialidad de discriminación de las estructuras geológicas, pero se utilizaron filtros para resaltar rasgos no muy visibles. Lamentablemente, no se obtuvieron los resultados esperados, a consideración del grupo de trabajo del IIGE, el algoritmo necesita mayor desarrollo (programación) porque presenta errores.

Por otra parte, como segundo método se aplicó al caso de estudio el algoritmo *LINE* utilizando una versión demo del *software* Catalyst (antes llamado *PCI Geomatics*). *LINE* ha sido diseñado para extraer lineamientos de imágenes de radar. El algoritmo extrae características lineales de una imagen y registra polilíneas en un segmento vectorial mediante tres etapas: detección de bordes, umbrales y extracción de curvas (PCI, 2022ab; Thomas, 2022; Villalta, 2022).

La cantidad de lineamientos extraídos y la longitud de cada línea depende de los valores de los parámetros ingresados (Villalta, 2022). Bajo este contexto, se hicieron varias pruebas experimentales (Tabla 9). Primeramente, se ingresaron los parámetros predeterminados y luego se probaron con diferentes valores. Los valores más bajos dieron como resultado segmentos de línea más cortos, éstos se aproximan mucho mejor al lineamiento; sin embargo, un valor mayor proporciona un mejor promedio de ruido, lo que resulta en lineamientos más rectos y más largos.

Tabla 9: Parámetros del algoritmo LINE predeterminados y calculados

Nro.	Name	Description	Unit	Data range	Value	Range default
1	RADI	Radio de filtro en píxeles	pixels	0 - 8192	5	5-100
2	GTHR	Umbral de gradiente de borde	--	0-255	50	5-255
3	FTHR	Umbral del error de ajuste de línea	pixels	0 - 8192	20	5-100
4	LTHR	Umbral de la longitud de la curva	pixels	0 - 8192	3	1-100
5	ATHR	Umbral de diferencia angular	pixels	0 - 90	30	0-90
6	DTHR	Umbral para vincular la distancia	pixels	0 - 8192	20	5-100

Fuente: PCI Geomatics, 2022a; Autor, 2022

El parámetro RADI especifica el tamaño del núcleo gaussiano utilizado como filtro durante la detección de bordes. Cuanto mayor sea el valor de RADI, menos ruido y detalle aparecerán en el resultado de la detección de bordes, por esto se colocó un valor de 5 (PCI Geomatics, 2022a; Salui, 2018).

El valor para el umbral de la imagen degradada se define con el parámetro GTHR. Este valor debe estar en el rango de 5 a 255. Si los píxeles activados de la imagen parecen demasiado escasos, se debe reducir el valor de GTHR. Sin embargo, si los píxeles activados parecen densos y ruidosos, se debe aumentar el valor de GTHR. Es importante tener suficiente información en la imagen de borde, ya que el proceso de extracción de lineamientos posterior se basa en esta imagen de borde como entrada (Salui, 2018; PCI Geomatics, 2022a).

Según las especificaciones de Catalyst (2022), varios otros parámetros controlan el proceso de extracción de la curva. FTHR define la tolerancia para ajustar segmentos de línea a un lineamiento (curvo).

LTHR especifica la longitud mínima de una curva (en píxeles) para ser considerada como un lineamiento para una consideración posterior.

ATHR define el ángulo máximo (en grados) entre dos vectores para vincularlos.

DTHR especifica la distancia máxima (en píxeles) entre dos vectores para que se vinculen. Los valores de los parámetros pueden cambiar en función de la zona y su topografía (Villalta, M. et al., 2022; Salui, 2018).

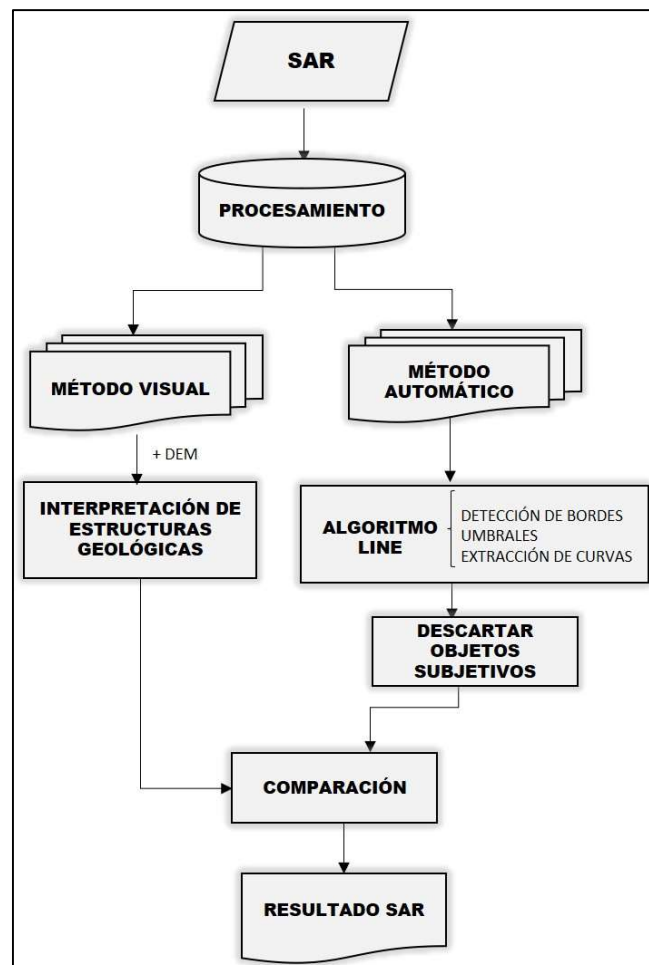
Un lineamiento se mide por el gradiente de cambio en la intensidad de la imagen. Al aplicar filtros de detección de bordes, se puede construir un método numérico para la detección de lineamientos. Sin embargo, este método no es tan preciso como el sistema visual humano (Villalta, M. et al., 2022), que es muy eficiente para extrapolar características lineales. Para el ojo humano, un lineamiento que varía en intensidad a lo largo de su longitud puede verse como un solo lineamiento largo, mientras que, para un método numérico, el mismo lineamiento puede aparecer como varios lineamientos cortos (Villalta, M. et al., 2022). Por lo tanto, el desarrollo de un método numérico para extraer

lineamientos debe ser robusto, permitir cambios graduales en el gradiente a lo largo del lineamiento y también cambios menores en la dirección (PCI Geomatics, 2022a).

De acuerdo al análisis realizado con este método, muchos de los lineamientos obtenidos pueden estar relacionados con infraestructura hecha por el hombre (Villalta, 2022; Abdullah et al., 2010) como líneas de transmisión eléctrica, redes de transporte (carreteras), canales o estructuras geológicas como fallas, fracturas, contactos geológicos, discordancias o redes de drenaje (ríos), crestas de las montañas, entre otras.

Se realizó un inventario de líneas rectas y curvas (lineamientos), tratando de descartar los objetos subjetivos que aparecen en la interpretación de sensores remotos, fueron considerados conjuntos de líneas con determinadas tendencias para la comparación respectiva en los mapas publicados, la metodología se muestra en la figura 38.

Figura 38: Flujograma metodológico para interpretación de estructuras geológicas



Se considera que el algoritmo debe ser mayormente pulido por la empresa a cargo con el aporte científico o contribuciones externas por parte de la Academia, Servicios Geológicos o Institutos de Investigación.

Finalmente, se realizó la integración de la información espacial obtenida, se aplicaron técnicas de superposición espacial (e.g., Rajesh, 2004; Olmedo, 2006) en el software ArcGis, para analizar la relación de los contactos geológicos y lineamientos extraídos a través de sensores remotos, con la litología y las estructuras geológicas del área de estudio.

4. Resultados

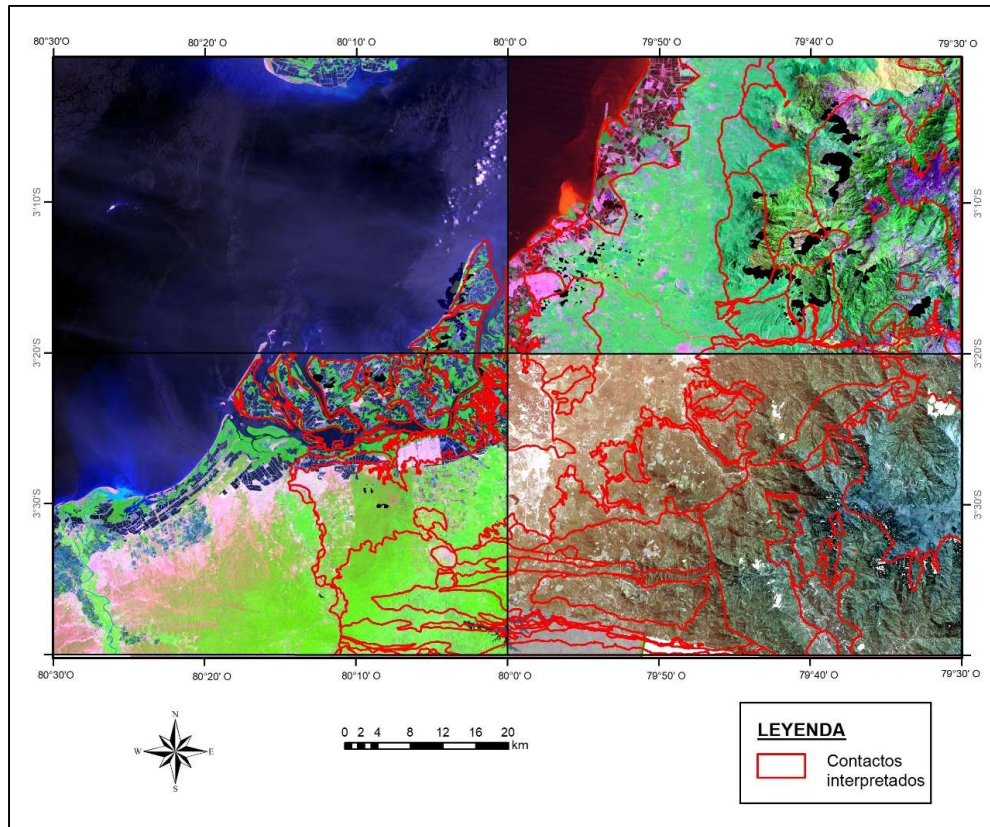
4.1. Mapeo de contactos geológicos

La metodología empleada mediante la interpretación visual y análisis geoespacial (superposición de mosaicos, combinaciones independientes de bandas en falso color, DEM), permitió discriminar 11 unidades mapeables (conformadas por aproximadamente 74 polígonos), identificadas por los cambios notorios de colores.

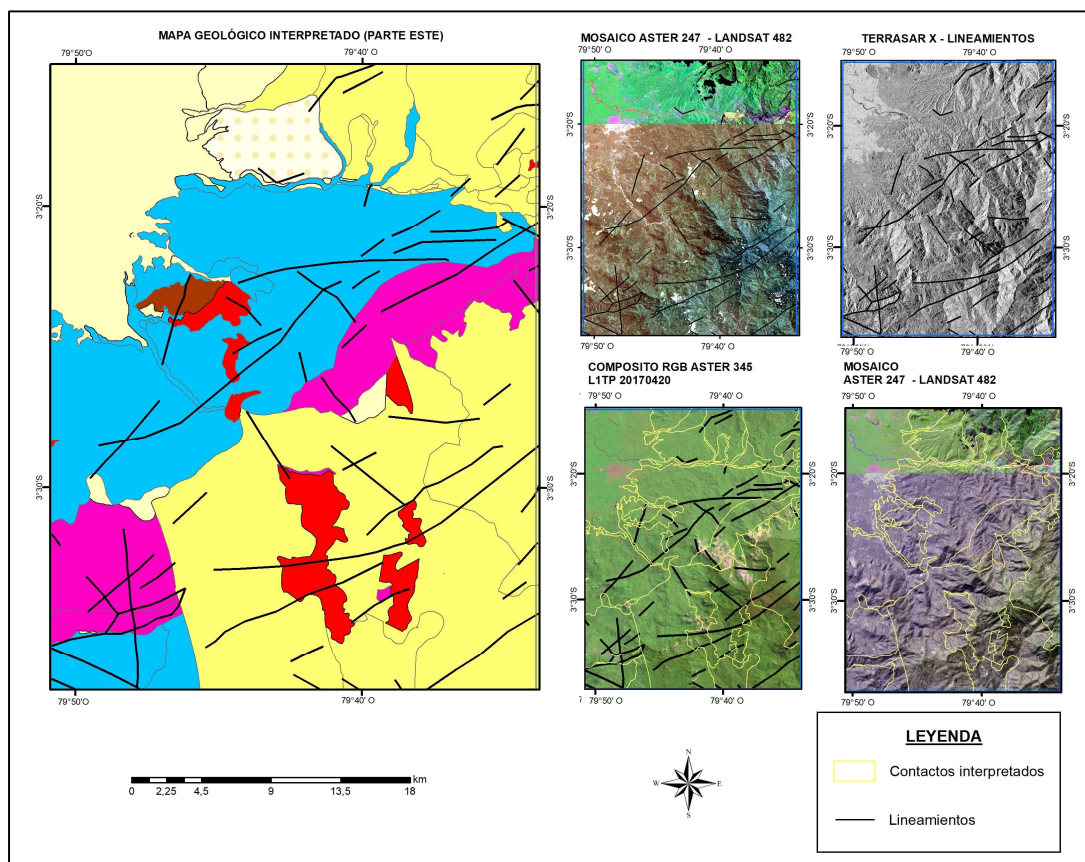
La figura 39 muestra los contactos geológicos interpretados, superpuestos en los mosaicos de Landsat y ASTER, los límites detectados en el área de estudio fueron digitalizados en el SIG. Los satélites Landsat y ASTER se utilizan ampliamente a nivel mundial, sin embargo, los mejores resultados para discriminación de unidades geológicas son los observados mayoritariamente en las imágenes del sensor ASTER, debido a la amplia región espectral de ASTER (14 bandas), las cuales se relacionan con los distintos materiales que aparecen en la superficie de la Tierra (gamas de color), los materiales reflejan y emiten energía de manera diferente, prevaleciendo cambios de tonalidades para la detección de los contactos geológicos o límites de los distintos grupos rocosos.

Figura 39: Contactos geológicos interpretados superpuestos a las imágenes ópticas
(compositos de falso color RGB)

Aster 247 / Aster 742 / Aster 435 / Aster 754 / Landsat 482



La figura 40 muestra algunos ejemplos de las combinaciones realizadas utilizando mosaicos, composiciones en RGB de las imágenes disponibles para el caso de estudio.

Figura 40: Zoom del mapa geológico interpretado en mosaicos, combinaciones RGB y SAR

4.2. Mapeo de lineamientos por los métodos visual y automático

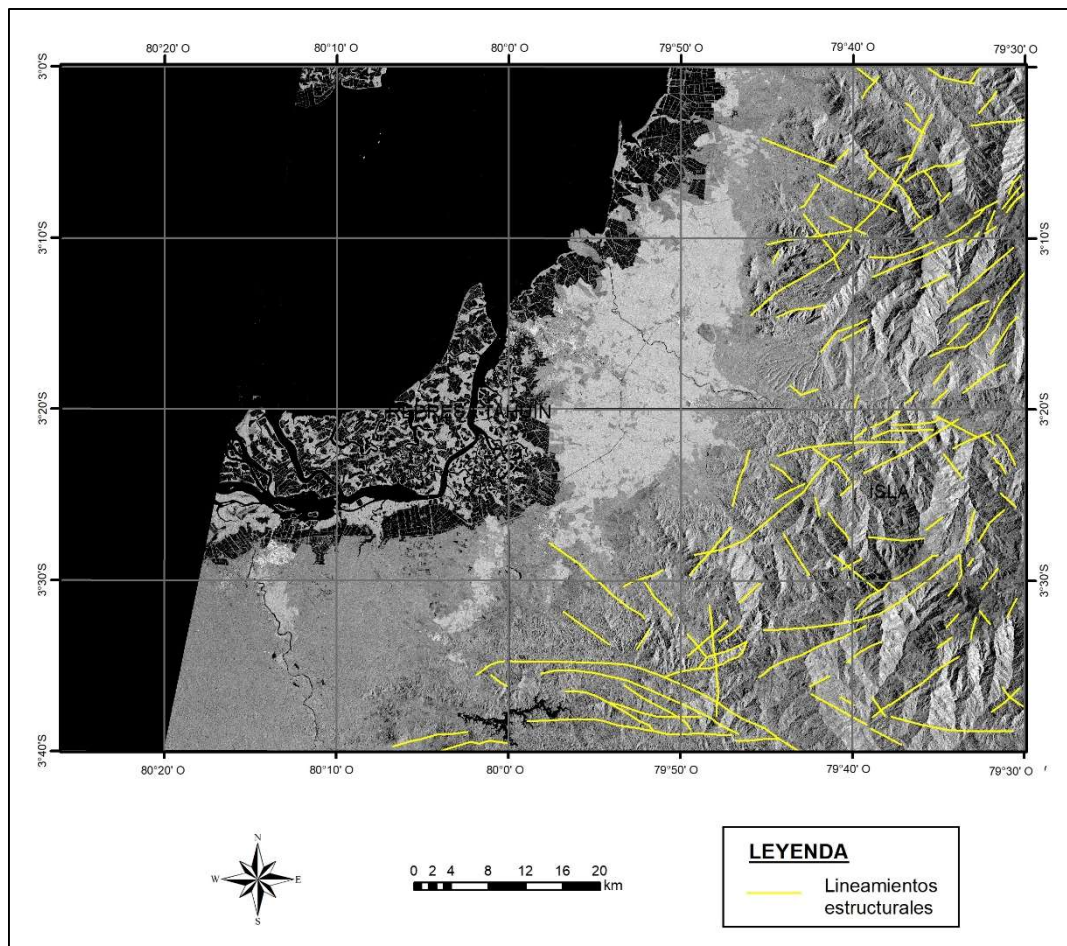
Con respecto a las estructuras geológicas, la metodología empleada mediante la interpretación visual permitió discriminar 150 lineamientos estructurales. Los resultados de procesamiento de las escenas Sentinel 1 y ALOS PALSAR, no delinearon características de fallas geológicas, por la resolución de las bandas C y L. Por lo tanto, las escenas se descartaron en este trabajo de investigación.

Los mejores resultados de discriminación de estructuras geológicas, fueron obtenidas de la imagen TerraSAR X, que tiene la más alta resolución espacial (con nivel de procesamiento EEC (Enhanced Ellipsoid Corrected), resolución ScanSAR 18-40 m, polarización HH, entre otras características descritas a mayor detalle en la tabla 7, las estructuras encontradas fueron mayormente visibles en este tipo de imagen. Para esta detección se utilizaron filtros de mediana, filtro de Lee, para reducción del moteado, de

esta manera poder resaltar rasgos lineales del área de estudio y detección de bordes (Filter Radius), obteniéndose distinciones y cambios notorios, que permitieron trazar líneas, marcar las tendencias y como producto se obtuvieron las estructuras geológicas.

La figura 41 muestra el mapa de lineamientos estructurales (fallas, fracturas, lineamientos y otros) detectados en el análisis e interpretación, éstos fueron digitalizados y superpuestos, se identifica un patrón de lineamientos NE-SO y otras características lineales transversales E-O, similar a las tendencias que tiene el mapa geológico publicado.

Figura 41: Estructuras geológicas superpuestas en la imagen TerraSAR X

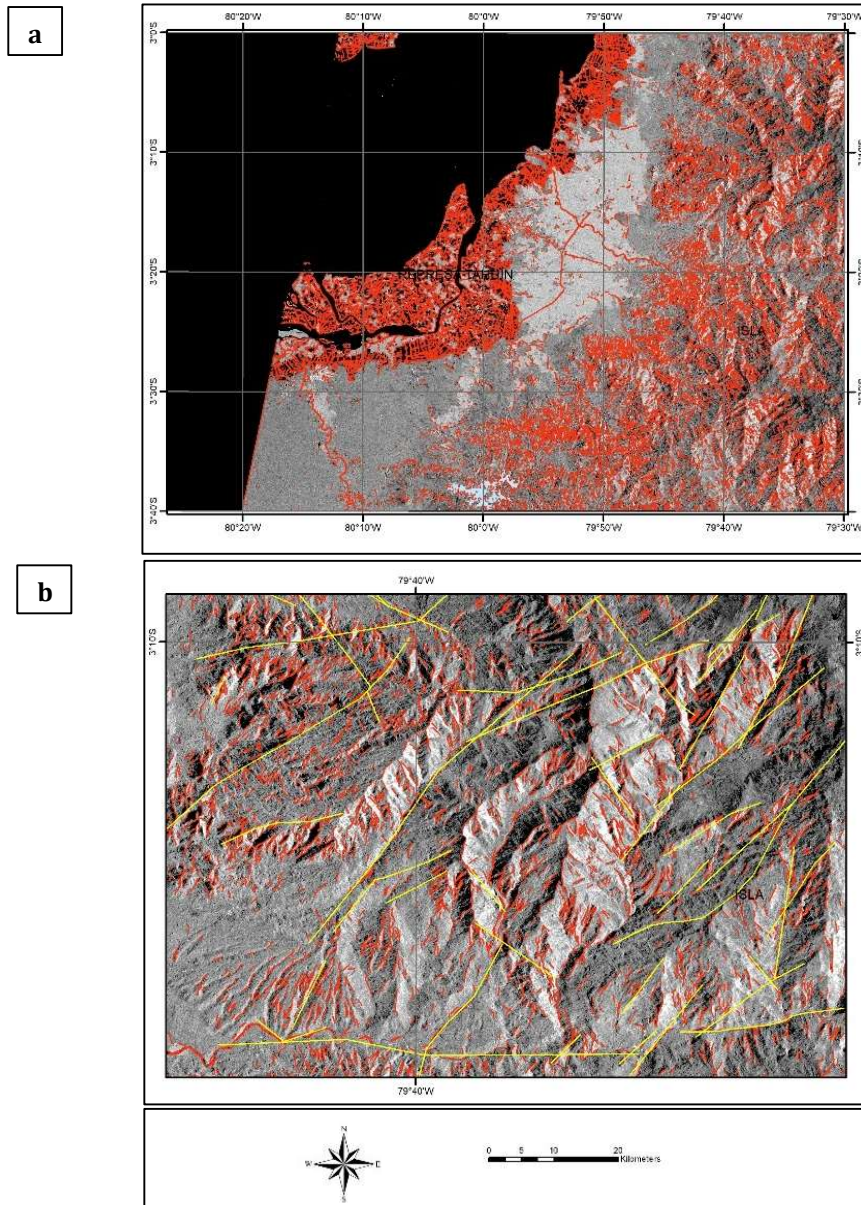


Se identificó un patrón de lineamientos NE-SO y otras características lineales transversales E-O, similar a las tendencias que tiene el mapa geológico publicado. Las características geológicas extraídas de las imágenes de radar demuestran que esta

metodología sirve como una base preliminar para la actualización o generación de nueva cartografía geológica a escala regional.

Mientras que, la figura 42 muestra el mapa de lineamientos estructurales obtenidos a partir del método automático (algoritmo LINE).

Figura 42: Estructuras obtenidas con algoritmo LINE



a. Lineamientos estructurales interpretados con LINE

b. Zoom de lineamientos interpretados - Métodos visual y automático

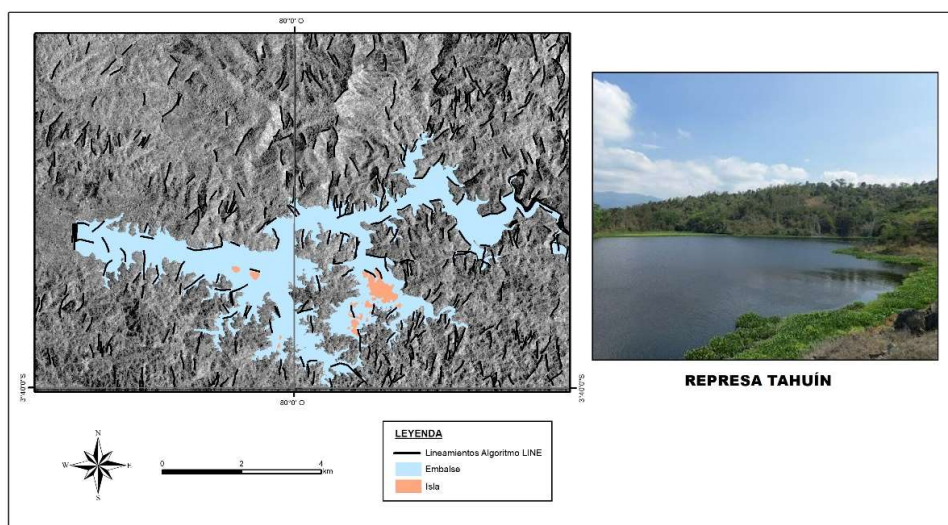
En la tabla 10 se indica la clasificación de lineamientos. Se obtuvo una gran densidad de líneas cortas, un total de 20480.

Tabla 10: Objetos obtenidos con método automático

No. LINEAMIENTOS	BORDE - CATEGORÍA OBJETO
20480	Líneas obtenidas totales
6652	Cuerpo de agua, camaronera (infraestructura antrópica), ríos, embalse, isla, manglar, pasto cultivado, urbano, vías.
13828	Lineamientos, fallas, líneas de crestas

La densidad de líneas depende de la extensión del área investigada y la escala de trabajo, se procedió a filtrar los lineamientos y descartar los que corresponden a información secundaria (cartografía básica), se han desestimado 6652, equivalente al 32,5% que corresponde a bordes de diferentes objetos, ubicados al oeste y sureste del área de estudio; y que pueden causar confusión, como por ejemplo los que se muestran en la figura 43, donde se observan líneas de actividad antrópica y límites del continente, embalse e isla de la Represa Tahuín.

Figura 43: Líneas de cartografía básica obtenidas por el método automático

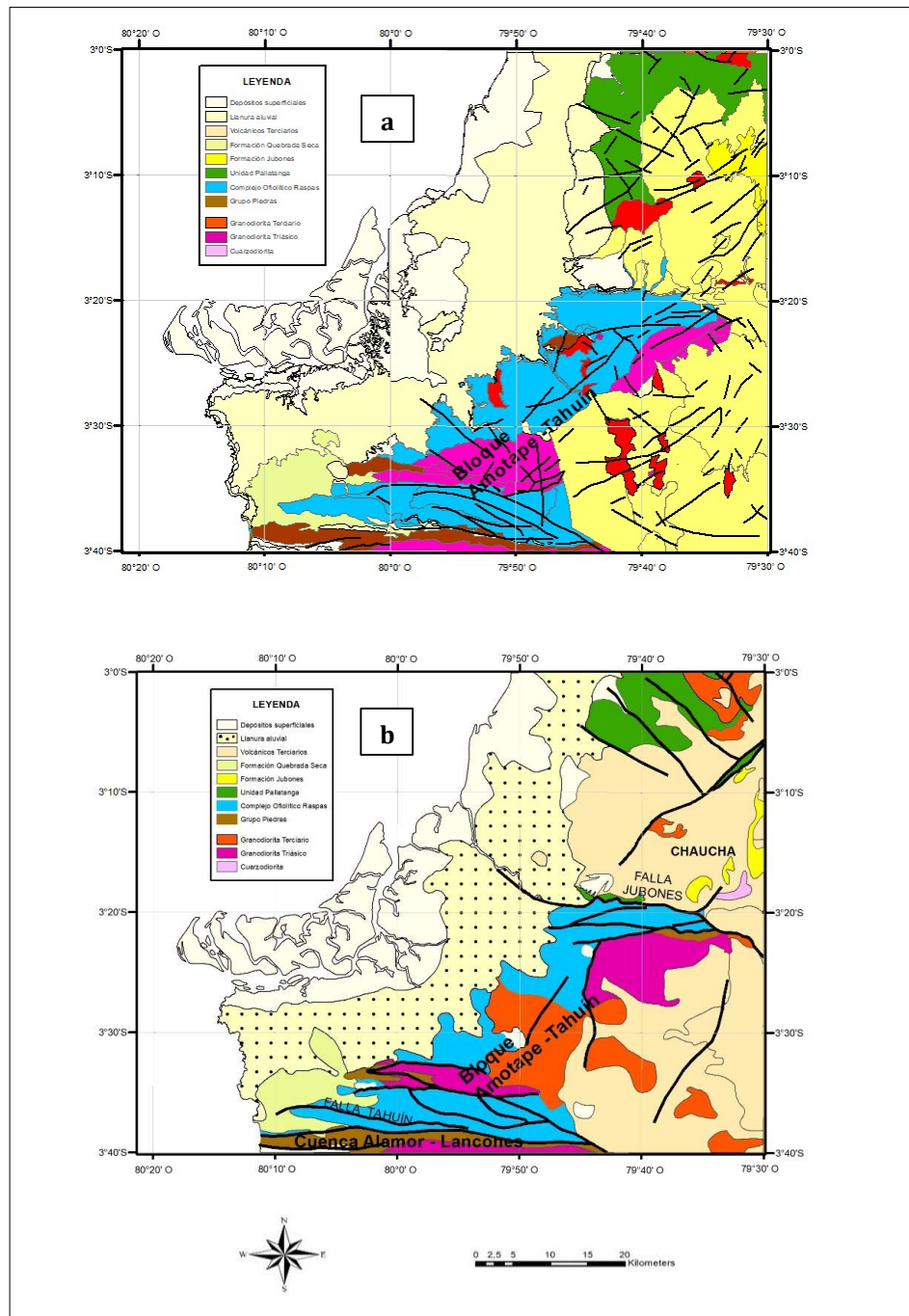


El resto correspondiente a 13828 líneas cortas, se observan que están distribuidas entre varios conjuntos de lineamientos con tendencias similares a las fallas interpretadas y otras que posiblemente no han sido observadas en campo, por lo tanto, no se encuentran plasmadas en el mapa publicado. No es procedente borrar las líneas cortas menores a 500 m, pues se estarían eliminando inclusive aquellas que si forman parte de las tendencias de los lineamientos encontrados.

El mapa obtenido puede contribuir para tener una idea global de las tendencias de orientación de los lineamientos. Sin embargo, definitivamente no es conveniente competir con la experticia del geólogo en la interpretación. Al utilizar el método automático en las imágenes satelitales, todas las texturas encontradas se colocaron como lineamientos y esto no es real.

El mapa interpretado (Figura 44a) que contiene contactos geológicos de las unidades litoestratigráficas y lineamientos estructurales fue comparado con el mapa geológico del Ecuador publicado (Figura 44b), escala 1:1.000.000, mediante el uso de técnicas de superposición GIS para revelar la relación, el patrón y la correlación de los datos.

Figura 44: Mapa geológico interpretado versus mapa geológico publicado

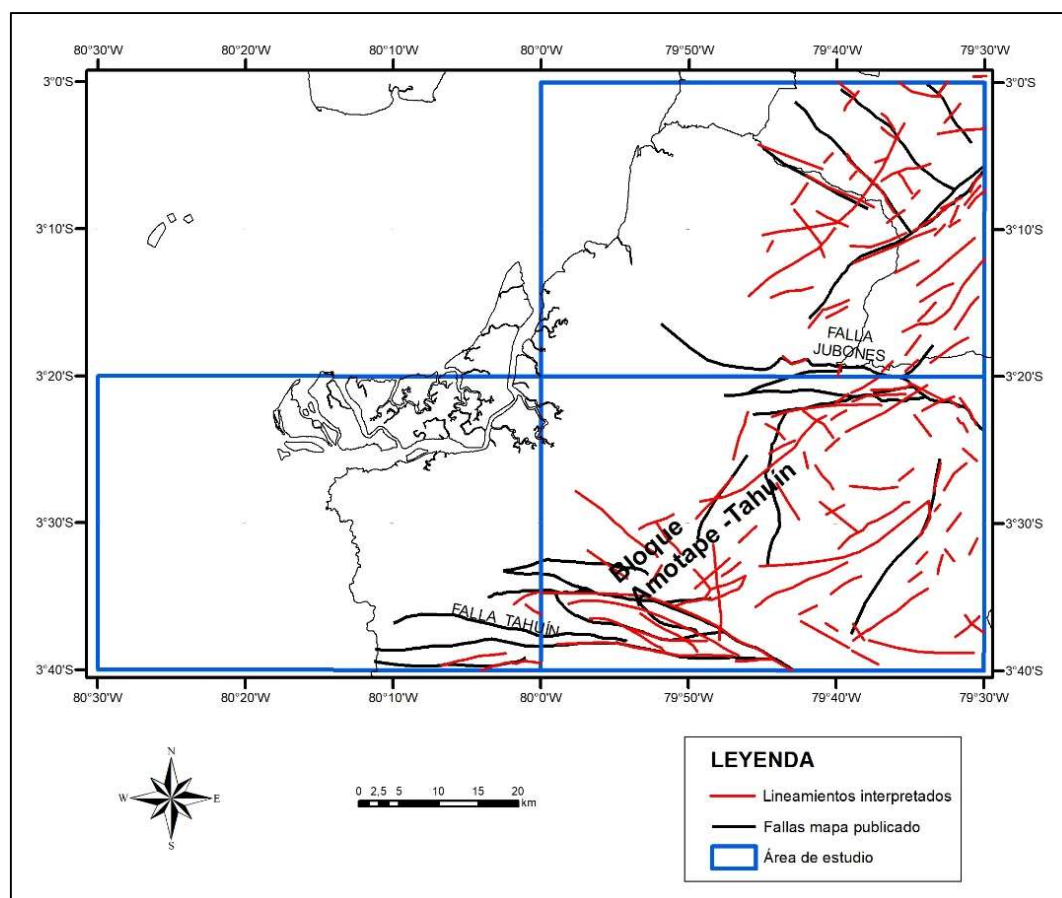


a. Mapa interpretado del área de estudio

b. Mapa geológico publicado

En la figura 45 se muestran las diferencias alcanzadas con la interpretación de lineamientos estructurales en comparación con el mapa de fallas geológicas publicado.

Figura 45: Diferencias de lineamientos interpretados versus fallas geológicas del mapa publicado



En la tabla 11 se detallan los porcentajes de similitud entre las áreas de las unidades geológicas más representativas:

Tabla 11: Similitud entre áreas de las unidades geológicas del área de estudio

	Contactos Interpretados Área (km ²)	Mapa publicado Área (km ²)	Porcentaje similitud (%)	Promedio similitud (%)
Complejo Ofiolítico Raspas	640,7	520,4	81	81
Grupo Piedras	113,1	116	98	
Llanura aluvial	945,7	988,6	96	
Granodiorita Triásico	240,5	247	97	
Formación Quebrada Seca	129	125,2	97	
Granodiorita Terciaria	65,4	343,6	19	

Fuente: Autor, 2023

Se realizó comparaciones entre 6 unidades geológicas representativas para establecer su paridad. El promedio de los porcentajes de coincidencia de unidades mapeables (polígonos), corresponde al 81% de similitud con las unidades litoestratigráficas del mapa geológico regional publicado. Este valor porcentual se obtuvo realizando la comparación simple de áreas, es decir la comparación de superficies de polígonos identificados por teledetección versus los polígonos del mapa publicado.

Es importante mencionar que se identificaron unidades pequeñas que no han sido representadas en el mapa geológico publicado. Lo que significa que, aplicando esta metodología, el geólogo podrá llevar su mapa interpretado como insumo preliminar para campo y poner mayor atención en sitios de intersección entre unidades geológicas. Se pueden realizar consultas y análisis adicionales en función de los conjuntos de datos de las capas generadas.

Si bien el resultado obtenido constituye una información preliminar obtenida por sensores remotos, sin lugar a duda este resultado favorece en gran medida tanto la planificación de las campañas geológicas como la optimización de recursos humanos y económicos.

5. Limitaciones

Algunas limitaciones se presentaron en el desarrollo de este trabajo de investigación, entre las principales se pueden enunciar las siguientes:

La ubicación geográfica del Ecuador en zona tropical, con exuberante vegetación, cuenta con una cobertura de nubes abundante. La nubosidad interfiere en la adquisición continua de imágenes satelitales ópticas que necesitan de la radiación solar.

El área de estudio está localizada en la provincia de El Oro, la zona no tiene rocas expuestas, los afloramientos están en su mayoría recubiertos por cobertura vegetal y material superficial.

La aplicabilidad de los datos ópticos tiene limitantes que impiden obtener el 100% de resultados, siendo necesario el enmascaramiento de los elementos de no interés, produciendo una pérdida de información. Por tal motivo, fue necesario complementar una nueva técnica de investigación con el uso de radar de apertura sintética, que ha sido probada en países desarrollados.

El procesamiento de escenas radar es complejo en relación con las imágenes ópticas.

Otro limitante de las imágenes de satélite, sobre todo las imágenes radar de alta resolución tienen un costo elevado.

Finalmente, se debe considerar también que la geología no es una ciencia exacta, por lo tanto, su interpretación en gabinete y en campo puede diferir entre un investigador y otro.

6. Discusión

En zonas tropicales con vegetación se utilizó con éxito la sinergia entre imágenes ópticas multiespectrales y radar de apertura sintética. El enfoque metodológico empleado como se muestra en las figuras 28, 29, 31 y 37, sin lugar a duda brinda al geólogo una herramienta fundamental para la discriminación y extracción de características geológicas, convirtiéndola en una herramienta complementaria para la planificación del levantamiento geológico a escala regional. La metodología planteada radicó en dos partes principales: a) proveer a los lectores y a la comunidad geológica de los países que aún no han podido culminar la cartografía geológica regional, una nueva visión sobre los datos satelitales y las técnicas a implementar; b) la identificación de contactos geológicos y la detección de lineamientos estructurales.

6.1. Recursos satelitales para el cartografiado geológico

Si bien, parece un proceso similar al trabajo convencional y de uso cotidiano que se realiza en muchos servicios nacionales e institutos de investigación geológicos, la diferencia radica en realizar levantamiento de la cartografía geológica acompañado con el avance vertiginoso de tecnología, mediante el uso de herramientas y técnicas de teledetección, que coadyuvan en la eficiencia, precisión y efectividad del proceso (Laubacher y ESPOL-ORSTOM, 1994; Abrams y Yasushi, 2019). Este método supera ampliamente al método convencional, pues el costo de adquisición de las imágenes satelitales es más barato (gratuito en muchos casos) que el costo de captura de fotografía aérea y se cubren grandes extensiones.

A esto se debe añadir, la facilidad de obtener imágenes, utilizando plataformas de la Agencias Espaciales y procesamiento en la nube, el geólogo contará con datos listos para interpretar, ya no perderá tiempo en preprocesamiento de imágenes o programación de algoritmos, sino que se optimizará el tiempo para ocuparlo en la interpretación.

Una limitación que ha impedido culminar la cartografía geológica, en muchos casos, es la arraigada metodología convencional clásica implantada en los países en vías de desarrollo: una gran cantidad de geólogos muestran resistencia al uso de la teledetección para la confección de las cartas geológicas; a pesar de que hoy en día se pueden conseguir estas facilidades.

En varias publicaciones científicas se ha demostrado que la cartografía geológica con sensores remotos se adapta mejor a las regiones áridas y semiáridas (e.g, Ramadan, 2003; Gómez et al. 2005; Chakouri, 2020). En este trabajo de investigación se logró identificar objetos geológicos para la cartografía geológica con alto porcentaje de precisión, en áreas ubicadas en Ecuador, que tienen vegetación y un alto índice de nubosidad. Esta técnica aún no ha sido explorada totalmente, se requiere continuar, desarrollar y aplicar nuevas líneas de investigación.

6.2. Unidades geológicas y lineamientos estructurales

El juego de superposición de capas (MDE, mosaicos, composiciones independientes de bandas en falso color, imágenes radar) en un SIG, conjuntamente con la experticia del geólogo mediante el análisis visual presentado en las figuras 39, 40 y 41 muestran un mapa interpretado por sensores remotos (Figura 44a), que sirve como un insumo para la planificación de las campañas de trabajo de campo, donde será validado.

En la mayor parte de publicaciones científicas (e.g., Hunt, 1979; Yamaguchi 1987, Ninomiya, 2001, 2002, 2005; Hernández y Moragues, 2002; Novikova, 2004; Marquetti, 2005; Karimpour et al., 2014), las composiciones de bandas en falso color y relaciones de bandas descritas, son de uso para la identificación y exploración de minerales, en algunos casos determinadas litologías. Sin embargo, en esta investigación las combinaciones han sido utilizadas para la detección de unidades mapeables como se muestra en los resultados.

Esta técnica no ha sido explotada totalmente. Servicios geológicos a nivel regional se han enfocado preferencialmente al cálculo de razones de bandas para obtener la discriminación de minerales, mientras que la detección de contactos geológicos ha sido dejada de lado, debido a que en la cartografía geológica aún se aplican las técnicas convencionales como la fotointerpretación o la fotogeología mediante el uso de un estereoscopio.

Los resultados mostraron un aumento en el número total de características geológicas detectadas, en comparación con los contactos geológicos y lineamientos estructurales plasmados en el mapa publicado (IIGE, 2017), esto se debe al detalle que se puede conseguir a partir de las imágenes satelitales de media y alta resolución.

La metodología empleada inclusive podría ayudar en auditorías de trabajo de campo (hojas nuevas y actualización de hojas históricas), la experticia del geólogo que analiza e interpreta los datos de los sensores remotos juega un papel primordial. Adicionalmente, si existieran inconsistencias en la interpretación realizada en campo, las mismas pueden ser afinadas con las observaciones que se tienen en las imágenes satelitales, las mismas que denotan en muchos casos mayor precisión.

El resultado de los lineamientos interpretados visualmente en la imagen radar TerraSAR-X son más detallados que los hallados en campo. Se encontraron 121 lineamientos adicionales (Figura 41).

Mientras que la identificación de estructuras geológicas por el método automático presenta un gran interés por la rapidez con la que se encuentran los lineamientos, éstos podrían contribuir en la idea general, pero no definen con certeza los lineamientos existentes como se mostró en la figura 42, son datos que deben ser comprobados y mejorados. Las empresas proveedoras de *software* especializado deberían trabajar conjuntamente con la Academia, Servicios Geológicos o Institutos de Investigación para mejorar los algoritmos presentados con la finalidad de reducir los procesos “a mano”, optimizando de esta manera la cantidad de tiempo, esfuerzo y recursos.

Hasta el día de hoy, la geología no produce un resultado cuantitativo en esta temática, sino más bien uno de orden cualitativo o de interpretación y producción sistemática (Pascale, 2021; Red Geomatica, 2022). No obstante, se hacen muchos esfuerzos desde el siglo XXI para dar inicio a la geología matemática y para ello, están siendo tomadas en cuenta las grandes cantidades de datos obtenidos por los satélites y sensores (Suarez-Burgoa, 2017).

Todo el trabajo realizado utilizando la teledetección, no funciona, si no existe una estrecha colaboración entre el geomático y el geólogo de campo, esto es fundamental para que los mapas interpretados con sensores remotos sean funcionales, porque si el geólogo de campo no confía en el producto interpretado simplemente será un trabajo infructuoso que se guardará en el escritorio.

7. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se implementó un enfoque metodológico para la obtención de contactos geológicos y lineamientos estructurales, a partir de imágenes ópticas y radar de apertura sintética, fácilmente comprensible para los geólogos que planifican, recopilan y preparan los insumos previos a las campañas de campo.

Al estudiar y evaluar las características de las imágenes satelitales, se comprobó que las imágenes radar se complementan adecuadamente con las ópticas, utilizar solo las imágenes ópticas en áreas similares a las de Ecuador (zonas tropicales con vegetación y alto índice de nubosidad), no proporcionan buenos resultados.

Se evidenció el exceso de tiempo que el geólogo pierde en el preprocesamiento de imágenes con software comercial. Más aún que, el preprocesamiento de radar es mucho más complejo y el geólogo debe ser muy meticuloso en el ingreso de los parámetros y secuencia de procesos, a fin de evitar mejor dos puntos para que las imágenes sirvan para el análisis y la interpretación.

Se ha prestado mucha atención en la selección de imágenes, en el análisis espacial e interpretación, para la extracción de características geológicas, principales aportaciones de este trabajo.

La metodología propuesta tomó en cuenta el desarrollo y avance de la teledetección en los últimos años, mediante el uso de datos ópticos y radar de apertura sintética, la disponibilidad de imágenes gratuitas para investigación con nivel de preprocesamiento adecuado para maximizar la precisión, y procesamiento en la nube mediante algoritmos programados para la obtención de composiciones de bandas en falso color y mosaicos, que se encuentran disponibles en las plataformas de las Agencias Espaciales.

Definitivamente se concluye que es una herramienta de gran utilidad para los países en vías de desarrollo, porque permite la optimización de recursos humanos, ahorro de gran cantidad de tiempo y dinero.

Se confirmó que las regiones que abarcan el infrarrojo de onda corta, el infrarrojo térmico y el microondas del espectro electromagnético, son de mayor interés para la detección de información geológica preliminar. Resalta la comprobación de la importancia de la banda 7 (SWIR) de ASTER para geología, por el resultado obtenido a través de la combinación de bandas realizada. Las imágenes ópticas deben ser complementadas necesariamente con las de radar, ya que, en zonas como el Ecuador, donde gran parte del territorio permanece cubierto por nubosidad durante casi todo el año, es necesario utilizar los dos tipos de sensores como un método alternativo de adquisición de objetos geológicos y obtención de los mejores resultados. Este método no está condicionado por la presencia de factores meteorológicos adversos como la presencia de nubes que dificultan la captura de información, ni tampoco por conflictos sociales donde las comunidades locales se resisten a la prospección geológica para la búsqueda de recursos minerales.

Los resultados obtenidos son la detección de objetos geológicos, los mismos que fueron comparados con los mapas geológicos publicados. La identificación de líneas de intersección entre superficies que limitan dos grupos de rocas, convierte a la teledetección en una técnica de predicción. Discutimos el resultado y el porcentaje de asertividad, concluyendo que esta información sirve como un insumo preliminar para la planificación de campañas y también discusión post campo para afinar los empalmes entre hojas geológicas aledañas, debido a las interpretaciones y discrepancias que se suscitan en el levantamiento geológico.

Los objetivos planteados se cumplieron, tanto el uso de imágenes satelitales como el método empleado se acoplaron a la cadena de producción en el Ecuador, y de igual forma, contribuirán con los servicios geológicos de los países en desarrollo similares en el contexto geográfico, y aquellos que aún no han podido culminar el levantamiento de la cartografía geológica, a escala regional por falta de financiamiento económico.

Esta metodología se puede aplicar en todos los países que aún se encuentran en etapas de inicio-avance o actualización de la cartografía geológica.

Si bien el resultado obtenido constituye una información preliminar obtenida por sensores remotos, sin lugar a duda este resultado favorece en gran medida tanto la planificación de las campañas geológicas como la optimización de recursos humanos y económicos.

Finalmente, si bien los objetivos se encuentran definidos en el alcance del trabajo, es importante remarcar que quedó en evidencia la necesidad de elaborar metodologías automáticas que coadyuven en la identificación de las características geológicas, dado que las problemáticas emergentes en este campo requieren intervenciones rápidas, como así también la exploración y explotación de yacimientos precisan análisis eficientes y acelerados. Probablemente, se deberá avanzar hacia metodologías automatizadas que mediante programación relacionen la emisión-reflexión, la clasificación, metodologías de segmentación, inclusive la aplicación de inteligencia artificial (*machine learning*) para mejorar la precisión. De igual forma, se podría realizar la clasificación supervisada de imágenes ópticas para distinguir litología, y así poder llegar a una interpretación mucho más robusta de las rocas existentes en la superficie terrestre.

Bibliografía

- Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B. 2002. ASTER user handbook, version 2. Jet Propulsion Laboratory.
- Abrams, M. y Yamaguchi, Y. (2019). Twenty years of ASTER contributions to lithologic mapping and mineral exploration. *Remote Sensing*, 11(11), 1394.
- Adiri, Z., Lhissou, R., El Harti, A., Jellouli, A., Chakouri, M. Recent advances in the use of public domain satellite imagery for mineral exploration: A review of Landsat-8 and Sentinel-2 applications. *Ore Geology Reviews* 2020, 117: 103332. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103332>
- Aguilar, H., Mora, R., Vargas, C. Atmospheric correction methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53): 1-21. 2014 [consulta 10-5-2021]. Disponible en: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/6609/6743>
- AIRBUS. TerraSAR-X Image Product Guide. 2015. Issue 2.1 [consulta 10-5-2021]. Disponible en: https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r459_9_20171004_tsxx-airbusds-ma-0009_tsx-productguide_i2.01.pdf
- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., González-Audicana, M. 2005. Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. *Revista de Teledetección*, 23: 27-42.
- Anderson, G., Berk, A., Acharya, P., Matthew, M., Bernstein, L., Chetwynd, J. et al. 2000. MODTRAN4: Radiative transfer modeling for remote sensing. Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery VI. 4049. International Society for Optics and Photonics: 176-184.
- ASGMI. Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos. Situación de la cartografía geológica y metodologías aplicadas en los países iberoamericanos. 2020.
- Anderson GP, Berk A, Acharya PK, Matthew MW, Bernstein LS, Chetwynd JH, et al. MODTRAN4: Radiative transfer modeling for remote sensing. Algorithms for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery VI. 4049. 2000. International Society for Optics and Photonics, pp. 176-184.
- Álvarez-Mozos, J., Casalí, J., González-Audicana, M. Teledetección radar como herramienta para la estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas. 2005. *Revista de Teledetección*, 23(1), 27-42.

- ARSET. Applied Remote Sensing Training. Procesamiento y Análisis de Imágenes SAR. Podest Er. 2022 [consulta 07-06-2022]. Disponible en: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/Session2-SAR-Spanish_0.pdf
- ASF. Alaska Satellite Facility. 2015. ASF Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products. ASF engineering [consulta 22-02-2023]. Disponible en: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads-2019/03/rtc_product_guide_v1.2.pdf
- ASF. Alaska Satellite Facility. 2022. ALOS PALSAR – About [consulta 04/06-2022]. Disponible en: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/alos-palsar-about/>
- ASF. Alaska Satellite Facility. 2022. ALOS PALSAR – Radiometric Terrain Correction. 2022 [consulta 05/06-2022]. Disponible en: <https://asf.alaska.edu/data-sets/derived-data-sets/alos-palsar-rtc/alos-palsar-radiometric-terrain-correction/>
- ASF. Alaska Satellite Facility. 2022. Disponible en: <https://asf.alaska.edu> [consulta 05-06-2022].
- ASGMI. Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos. 2020. Situación de la cartografía geológica y metodologías aplicadas en los países iberoamericanos.
- Aspden, J. A., McCourt, W. J. Mesozoic oceanic terrane in the central Andes of Colombia. 1986. *Geology*, 14(5), 415-418. 1986.
- Aspden, J. A., Bonilla, W., Duque, P. The El Oro metamorphic complex, Ecuador: geology and economic mineral deposits (No. 67). British Geological Survey. 1995.
- Baldock, J. Geología del Ecuador, 1– 70, Dirección General Geología y Minas, Quito, 1982.
- Béjar-Pizarro, M. et al. InSAR-based mapping to support decision-making after an earthquake. *Remote Sensing*, vol. 10, no 6, p. 899. 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10060899>
- Bernknopf, R., Brookshire, D., Soller, D., McKee, M., Sutter, J., Matti, J., Campbell, R. Societal value of geologic maps: U.S. Geological Survey Circular 1111, 53 p. 1993.
- Bosch, D., Gabriele, P., Lapierre, H., Malfere, J. L., Jaillard, E. Geodynamic significance of the Raspas Metamorphic Complex (SW Ecuador): geochemical and isotopic constraints. *Tectonophysics*, 2002, 345(1-4): 83-102.
- Bourgois, J., Toussaint, J. F., Gonzalez, H., Azema, J., Calle, B., Desmet, A., ... & Tournon, J. Geological history of the Cretaceous ophiolitic complexes of northwestern South America (Colombian Andes). 1997. *Tectonophysics*, 143(4), 307-327.

- Brusi, D., Linares, R., Pallí, Roqué, C. Lectura ambiental de cartografía geológica. 2000. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 8(3): 247-260.
- Byrnes, J., Ramsey, M., Crown, D. Surface unit characterization of the Mauna Ulu flow field, Kilauea Volcano, Hawaii, using integrated field and remote sensing analyses. J. Volcanol. Geotherm. Res. 2004, 135, 169–193.
- Calero, K. 2019. Bloque Amotape Tahuín [consulta 28-12-2022]. Disponible en: <https://www.scribd.com/document/412447229/Bloque-Amotape-Tahuin>
- CCRS. Programa GlobeSAR: Material educativo para teledetección mediante radares. Canada Centre for Remote Sensing CCRS, Natural Resources Canada, 2001. Disponible en <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/internat/glbsar2/indexe.html>.
- Chakouri, M., Lhissou, R., El Harti, A., Maimouni, S., Adiri, Z. Assessment of the image-based atmospheric correction of multispectral satellite images for geological mapping in arid and semi-arid regions, Remote Sensing Applications: Society and Environment. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100420>. 2020.
- Chuvieco, E. Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio. 1ra edición. 2002. Barcelona: Editorial Ariel S.A.
- Chuvieco, E. Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: tendencias en teledetección y su situación en la geografía española. Documents d'anàlisi geogràfica, 2007. (50), 75-85.
- Clark, Roger N., Roush, Ted L. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1984, vol. 89, no B7, p. 6329-6340.
- Claverol, Manuel Gutiérrez. Compendio de teledetección geológica. Universidad de Oviedo, 1993.
- Cobb, J. 2016. The value of geological maps and the need for digitally vectorized data. Digital Mapping Techniques '02 – Workshop Proceedings. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-370 [consulta 22-08-2023]. Disponible en: <https://pubs.usgs.gov/of/2002/of02-370/cobb.html>.
- Colesanti, C., & Wasowski, J. 2006. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. Engineering geology, 88(3-4), 173-199. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
- Collot, J. Y., Michaud, F., Alvarado, A., Marcaillou, B., Sosson, M., Ratzov, G., Migeon S., Calahorrano A., Pazmino, A. 2009. Visión general de la morfología submarina del

- margen convergente de Ecuador-Sur de Colombia: implicaciones sobre la transferencia de masa y la edad de la subducción de la Cordillera de Carnegie. Geología y geofísica marina y terrestre del Ecuador desde la costa continental hasta las islas Galápagos. Publicación CNDM-INOCAR-IRD, PSE001-09, Guayaquil, Ecuador: 47-74.
- Corrales, R. 2010. Caracterización de alternación hidrotermal y dinámica de cobertura del suelo mediante métodos de teledetección, en el Valle de Choluteca, Honduras. Tesis de Maestría, UNAH. Tegucigalpa. 113 pp
- Corrales, R, López, V. 2016. Cálculo de reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE. Ciencias Espaciales, vol. 9, no 1, p. 81-96.
- Dunkley, P., Gaibor, A. Geology of the Cordillera Occidental of Ecuador between 2–3° S. Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental. Programa de Información Cartográfica y Geológica, CODIGEM–BGS, Quito, Informe 2. 1997.
- Echeveste, H. J. Manual de levantamiento geológico. Series: Libros de Cátedra. 2018.
- ECOSFERA, 2017. Estudio de Impacto Ambiental y Plan de Manejo Ambiental. Dragado de los Muelles 1,2,3,4,5,6 Zona de Maniobra y Canal de Acceso de Puerto Bolívar. Disponible en: <https://maeeloro.files.wordpress.com/2017/06/estudio-de-impacto-ambiental-y-plan-de-manejo-ambiental-dragado-de-muelles-12345-y-6-zona-de-maniobra-y-canal-de-acceso.pdf>
- El Janati, M., Soulaïmani, A., Admou, H., Youbi, M., Hafid, A., He_eran, K. Application of ASTER remote sensing data to geological mapping of basement domains in arid regions: A case study from the Central Anti-Atlas, Iguerda inlier, Morocco. Arab. J. Geosci. 2014, 7, 2407–2422.
- ERSDAC. Earth Remote Sensing Data Analysis Center. ASTER User's Guide Part I: 104. 2001.
- ERSDAC. Aster reference Guide Version 1.0. Earth Remote Sensing Data Analysis Center, Japan. 2003.
- ERSDAC. Japan Space Systems. 2012. Earth Remote Sensing Division [consulta 03/10-2022]. Disponible en: <https://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/eng/index.E.html>
- ESA. European Space Agency. The changing Earth: New scientific challenges for ESA's Living Planet. ESA Bulletin (129): 10 p. 2007.

- ESA. European Space Agency. User guides – Sentinel-1 SAR – Level 1 [consulta 28-12-2022]. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/product-types-processing-levels/level-1>
- FAO (1990). Aplicación de la tecnología de percepción remota a las pesquerías marinas. Departamento de Pesca [consulta 06-07-2020]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/t0355s/T0355S00.HTM>
- Feininger, T. 1978. Geologic Map of Western El Oro Province. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador.
- Feininger, T., Bristow, C. Cretaceous and Paleogene geologic history of coastal Ecuador. *Geologische Rundschau*, 1980. 69(3), 849-874.
- Feininger, T., Silberman, M. L. K-Ar geochronology of basement rocks on the northern flank of the Huancabamba deflection, Ecuador (No. 82-206). 1982. US Geological Survey.
- Feininger, T. Allochthonous terranes in the Andes of Ecuador and northwestern Peru. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 1987, 24(2): 266-278.
- Fernández, P. Determinación de movimientos verticales del terreno mediante técnicas de interferometría radar DInSAR Tesis Doctoral, Universidad de Granada. 2009, p212. ISBN: 978-84-692-5962-0
- Fernández, T., Pérez-García, J. L., Gómez-López, J. M., Cardenal, J., Moya, F., Delgado, J. Multitemporal landslide inventory and activity analysis by means of aerial photogrammetry and LiDAR techniques in an area of Southern Spain, 2021. *Remote sensing*, 13(11), 2110.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. 2001. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 8-20.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. 2011. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49: 3460-3470.
- Filipponi, F. 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow. *Proceedings*. 18. 6201. 10.3390/ECRS-3-06201 [consulta 02/03/2023]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Sentinel-1-GRD-preprocessing-workflow_fig1_333695202
- Geosoluciones, 2000 [consulta 04/02/2020]. Disponible en: <https://www.geosoluciones.cl/documentos/ficha-imagenes-satelitales/imagenes.pdf>

- Gobierno Provincial Autónomo de El Oro. Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la provincia de El Oro, 2014. Machala.
- Gómez, C., Delacourt, C., Allemand, P., Ledru, P., Wackerle, R. 2005. Using ASTER remote sensing data set for geological mapping, in Namibia. *Phys. Chem. Earth*, 2005. 30, 97–108.
- Gutiérrez, M. 1993. Compendio de teledetección geológica. Oviedo: Servicio de Publicaciones.
- Gutiérrez, L., Cerezal, J., Losada, J. 2013. Construcción de obras y aprovechamientos hidráulicos en terrenos e islas volcánicas. *Ingeniería geológica y geotécnica*.
- Harris, J. 1991. Mapping of regional structure of eastern Nova Scotia using remotely sensed imagery: implications for regional tectonics and gold exploration. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1991, vol. 17, no 2, p. 122-135.
- Hernández, A., Moragues, J. 2002. Uso de la información espacial para cartografía, geología y producción minera. Argentina: Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).
- Hernández, A., García, D. 2014. Análisis de cambio en la cobertura espacial del manglar en el área de protección de flora y fauna Laguna de Términos. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Herrera, J. 2017. Introducción a la Minería (2ª Edición). Vol. III: La exploración e investigación minera.
- Hong, Y., Adler, R., Huffman, G. 2007. Use of satellite remote sensing data in the mapping of global landslide susceptibility, *Natural Hazards* 43: 23-44.
- Hunt, G., Ashley, R. 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*, 74(7), 1613-1629.
- Ihlen, V., Zanter, K. 2019. Landsat 8 data users handbook. US Geological Survey: Sioux Falls, SD, USA, 55.
- IIGE. Instituto de Investigación Geológico y Energético. 2017. Mapa Geológico del Ecuador, escala 1:1'000.000. 1 mapa.
- IIGE. Instituto de Investigación Geológico y Energético. 2019a. Hoja geológica Huaquillas, escala 1:100,000: Ecuador, 1 mapa.
- IIGE. Instituto de Investigación Geológico y Energético. 2019b. Hoja geológica Machala, escala 1:100.000. Ecuador. 1 mapa.

- IIGE. Instituto de Investigación Geológico y Energético. 2019c. Hoja geológica Santa Rosa, escala 1:100,000: Ecuador. 1 mapa.
- IGAC. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2013. Productos LDCM – Landsat 8: Bogotá, Centro de Investigación y Desarrollo - CIAF [consulta 04/11-2022]. Disponible en: <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Anuario. 2017.
- INAMHI. Boletín Agroclimático decadal. Quito. 2018.
- INAMHI. Visita al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 2019.
- INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. 2016. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLandsat/>
- INIGEMM. Instituto de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. 2013. Instructivo de corrección atmosférica. Ecuador.
- Jarvis A., Reuter H.I., Nelson A., Guevara E. 2008. "Hole-filled seamless SRTM data V4." International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Jensen, J. 1983. Biophysical remote sensing. *Annals of the Association of American Geographers*, 73(1), 111-132.
- John, T., Scherer, E., Schenk, V., Herms, P., Halama, R., Garbe-Schönberg, D. 2010. Subducted seamounts in an eclogite-facies ophiolite sequence: the Andean Raspas Complex, SW Ecuador. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2010. 159, 265-284.
- Karimpour, M., Mazhari, N., Shafaroudi, A. Discrimination of Different Erosion Levels of Porphyry Cu Deposits using ASTER Image Processing in Eastern Iran: A Case Study in the Maherabad, Shadan, and Chah Shaljami Areas. 2014. *Acta Geol. Sin.* 2014, 88, 1195–1213.
- Kennerley, J. B. Geology of the Loja Province, Southern Ecuador. Institute of Geological Sciences. 1973. Report 23: 1-34.
- Kissel, C., Laj, C., Surmont, J., Macedo-Sanchez, O., Mitouard, P. South American active margin, Andean deflections and crustal thickening. *Bulletin de la Société géologique de France*, 1992, vol. 163, no 4, p. 371-380.
- Kruse, F. A. Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO. In *Summaries of 13th JPL Airborne Geoscience Workshop*, Jet Propulsion Lab, 2004. Pasadena, CA: 1-10.

- Kurata, K., Yamaguchi, Y. Integration and Visualization of Mineralogical and Topographical Information Derived from ASTER and DEM Data. *Remote Sens.* 2019, 11, 162.
- Laubacher, G., ESPOL-ORSTOM. Aportes de la teledetección a la geología de la región Puyango-Celicaelf hidrocarbures équateur, 1994, 143.
- León, L., Martínez, J., Trujillo, R. Caracterización y propuesta técnica de la acuicultura en parroquias urbanas del sector Machala. Tesis. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil, Ecuador.
- Lillesand, T, Ralph, W., Jonathan, W. 2015. Remote Sensing and Image Interpretation. 7th Edition. Edited by Wiley. 7th ed. Vol. 7. United States of America, 2012. Disponible en: <https://doi.org/10.14358/pers.81.8.615>.
- Litherland, M., Aspden, J.A., Jemielita, R.A. The metamorphic belts of Ecuador. British Geological Survey, Overseas Mem, 1994. 11: 147 p. 2 maps, Keyworth, UK.
- Liu, C. C., Sousa Jr, M. D. A., Gopinath, T. R. Regional structural analysis by remote sensing for mineral exploration, Paraíba state, Northeast Brazil. *Geocarto International*, 15(1), 70-77. 2000.
- Longhi, I., Sgavetti, M., Chiari, R., & Mazzoli, C. Spectral analysis and classification of metamorphic rocks from laboratory reflectance spectra in the 0.4-2.5 μ m interval: A tool for hyperspectral data interpretation. 2001. *International Journal of Remote Sensing*, 22(18), 3763-3782.
- Lopinto, E. An introduction to the Synthetic Aperture Radar. Agencia Espacial Italiana ASI: 528. 2010.
- MAATE. Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. 2019. Mapa de Vegetación del Ecuador Continental
- MAGAP-SIGTIERRAS. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2015. Escala 1:25.000. Quito.
- Monti Guarnieri, A., 2002. Unpublished university lecture notes on Radar Theory and Technique, Politecnico di Milano, Italy.
- Massonnet D., Feigl K. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. 1998. *Reviews of Geophysics* 36(4): 441-500.
- MappingGIS. 2019. Disponible en: <https://mappinggis.com-2019/05/combinaciones-de-bandas-en-imagenes-de-satelite-Landsat-y-sentinel/>

- Marchionni, D., Cavayas, F. La Teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural. Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1. 2014. GEOACTA, 62-89, pag 62-89.
- Mars, J. C., Hammarstrom, J. M., Robinson, G. R., Ludington, S., Zurcher, L., Folger, H., ..., Kress, T. New method to integrate remotely sensed hydrothermal alteration mapping into quantitative mineral resource assessments. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (pp. 4493-4496). IEEE. 2017.
- Martha, T., Kerle, N., van Westen, C. J., Kumar, K. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods, 2010. *Geomorphology* 116: 24-36.
- Martinis, S., Twele, A., Strobl, C., Kersten, J., Stein, E. A multi-scale flood monitoring system based on fully automatic MODIS and TerraSAR-X processing chains. 2013. *Remote Sensing* 5(11): 5598-5619.
- Marquetti, C., Marín, G., Kaku, M., Kohno, I.. Procesamiento y análisis de imágenes Aster para el estudio metalogenético de Malimán, San Juan. 2005. PROYECTO GEOSAT-AR, 81
- Massonnet, D., Feigl, K.L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's Surface. 1998. *Reviews of Geophysics* 36: 441-500.
- Masuelli, S. Procesamiento básico de imágenes SAR. Informe del trabajo de la beca SI-CONAE. 2003.
- Mayorga, T. 2013. Determinación de la deformación del terreno por movimientos en masa usando interferometría SAR (Radar de Apertura Sintética). Disponible en: Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich":
- MDA. 2013. Disponible en: <https://mda.space/en/constellation-mission>
- Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M., Barth, A., Jezek, J., Naba, S. Automated regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data, Burkina Faso, West Africa. *Remote Sens. Environ.* 2018, 204, 964–978.
- Meyer, F. 2019a. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, data access, and basic processing techniques. *Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, 21-64.
- Meyer, F. 2019b. The Synthetic Aperture Radar (SAR) Handbook: Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access, and Basic Processing Techniques. SERVIR Global Science Coordination Office, p. 21.

- Mitouard, P., Kissel, C., Laj, C. Post-Oligocene rotations in southern Ecuador and northern Peru and the formation of the Huancabamba deflection in the Andean Cordillera. 1990. *Earth and Planetary Science Letters*, 98(3-4), 329-339.
- MontevideoLibre. (2007). "Open software, open nets, open minds." Disponible en: http://montevideolibre.org/manuales:libros:wndw:capitulo_2:onda_de_radio
- Moragoda, N., Cohen, S., Gardner, J., Muñoz, D., Narayanan, A., Moftakhari, H., & Pavelsky, T. M. Modeling and analysis of sediment trapping efficiency of large dams using remote sensing. 2023. *Water Resources Research*, 59(6), e2022WR033296.
- Mourier T. 1988. La transition entre Andes marginales et Andes cordilléraines à ophiolites. Évolution sédimentaire, magmatique et structurale du relai de Huancabamba (30- 8 0 S. Nord Pérou Sud Équateur). Tesis Doc. Ciencias, Univ. Paris XI. 275 p. Orsay.
- NASA. ASTER, 2004. Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.
- NASA, 2019. The SAR Handbook. SERVIR Global Program Manager.
- NASA. 2022. Landsat Science [consulta 28/09-2022]. Disponible en: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>
- Ninomiya Yoshiki. 2001. Spectral Indices for Lithologic Mapping with ASTER Thermal Infrared Data Applying to a Part of Beishan Mountains, Gansu, China. Institute of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Sydney, Australia.
- Ninomiya Yoshiki- 2002. Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data International Society for Optical Engineering SPIE 4710: 191-202.
- Ninomiya Yoshiki. 2005. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Science direct*: 13.
- Ninomiya, Y., Fu, B., Cudahy, T. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sens. Environ.* 2005, 99, 127-139.
- Njue, L. M. 2010. Geological field mapping. A paper presented at Short Course V on Exploration for Geothermal Resources, organized by United Nations University-Geothermal Training Programme, Geothermal Development Company and KenGen, at Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya [consulta 28/12-2022]. Disponible en: <https://orkustofnun.is/gogn/unu-gtp-sc/UNU-GTP-SC-11-04.pdf>

- Olmedo, M. T. C. 2006. Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. Cuadernos Geográficos.
- Omran, A., Hahn, M., Hochschild, V., El-Reyes, A. Lithological Mapping of Dahab Basin, South Sinai, Egypt, using ASTER Data. Photogramm. Fernerkund. Geoinform. 2012, 6, 711–726.
- OpenCV. The OpenCV Reference Manual. Release 2.4.9.0. 2nd ed. April 2014. Disponible en: <https://github.com/opencv/opencv>
- Oyarzun, R. 2011. Introducción a la geología de minas. Madrid, España: Ediciones GEMM.
- Paladines, A. 1989. Zonificación geotectónica y metalogenia del Ecuador. Mañana Editores.
- Paladines A., Rosero G. 1996. Zonificación Mineralogénica del Ecuador. Quito.
- Pascale, G. 2021. Comment on “Crustal faults in the Chilean Andes: geological constraints and seismic potential” by, Andean Geology 46 (1): 32-65. Andean Geology. 48(1): 175-183.
- PCI Geomatics. 2022a. CATALYST. LINE: Lineament Extraction [consulta 12-12-2022]. Disponible en: https://catalyst.earth/catalyst-system-files/help/references/pciFunction_r/easi/E_line.htm
- PCI Geomatics. 2022b. Training Guide Geomatica [consulta 13-12-2022]. Disponible en: <https://www.pcigeomatics.com/pdf/TrainingGuide-Geomatica-1.pdf>
- Pennington, W. Subduction of the Eastern Panama Basin and Seismotectonic of Northwestern South America, 1981. Journal Geophysic Research. 86, No. B11, pp. 10753-10770
- Rajesh, H. Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping-An overview. 2004. Journal of mineralogical and Petrological Sciences, 99(3), 83-103.
- Ramadan, T. and Onsi, H. Use of ERS-2 SAR and LANDSAT TM Images for Geological Mapping and Mineral Exploration of Sol Hamid Area, South Eastern Desert, Egypt, 2003.
- Ramli, M. F., Yusof, N., Yusoff, M. K., Juahir, H., & Shafri, H. Z. M. Lineament mapping and its application in landslide hazard assessment: a review. 2010. Bulletin of engineering Geology and the Environment, 69(2), 215-233.
- Rasilla, D., Conde, F. Preprocesamiento de imágenes de satélite: Correcciones. 2023. [consulta 14-10-2023]. Disponible en: <https://personales.unican.es/rasillad/docencia/g174/preprocesamiento/correccion.html>

- Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module software. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53): 1-21 [consulta 10-05-2021]. Disponible en: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/6609/6743>
- Red Geomatica. 2022. Capítulo I: Introducción a la Cartografía Temática [consulta 28-12-2022]. Disponible en: http://redgeomatica.rediris.es/carto2/arbolT/cartoT/Tcap1/1_10.html
- Reyes Rivera, L., Caldas Vidal, J. 1987. Geología de los cuadrángulos de: Las Playas 9-c, La Tina 9-d, Las Lomas 10-c, Ayabaca 10-d, San Antonio 10-e, Chulucanas 11-c, Morropón 11-d, Huancabamba 11-e, Olmos 12-d, Pomahuanca 12-e [Boletín A 39].
- Rosen P. A., Hensley S., Joughin Ian R., Li Fuk K., Madsen Soren N., Rodríguez E., Goldstein Richard M. 2000. "Synthetic Aperture Radar Interferometry." *Proceedings of the IEEE* 88(3): 333-382.
- Rowan, L., Mars, J. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using ASTER data. *Remote Sens. Environ.* 2003, 84, 350–366.
- Sabins, F., 1978. *Remote Sensing: principles and interpretation*. USA. W.H. Freeman and Company, 1a. ed., 426 pp.
- Sabins, F. 1997. *Remote Sensing — Principles and Interpretation*, 3rd edn., W.H. Freeman, New York, NY., 494 pp.
- Sabins, F. 1999. Remote sensing for mineral exploration. *Ore geology reviews*, vol. 14, no 3-4, p. 157-183.
- Salui, C. Methodological validation for automated lineament extraction by LINE method in PCI Geomatica and MATLAB based Hough transformation. 2018. *Journal of the Geological Society of India*, 92: 321-328.
- Sánchez, J., Palacios, O., Feininger, T., Carlotto, V. Quispesivana Quispe, L. J. 2006. Puesta en evidencia de granitoides triásicos en los Amotapes-Tahuin: deflexión de Huancabamba. *Congreso Peruano de Geología*, 13, Lima, Perú, 17-20.
- SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency. 2008. *Synthetic Aperture Radar and SARscape*.
- SEGEMAR. Servicio Geológico Minero Argentino. *Secretos de la Tierra*. Servicio Geológico Minero Argentino. Museo Participativo Minero. 2007.
- SEGEMAR. 2023 [consulta 02-02-2023]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>

- SIGMUR. SIG y Teledetección. Universidad de Murcia. 2006. [consulta 06-06-2019]
Disponible en: <https://www.um.es/geograf/sig/teledet/fundamento.html> y
<http://www.um.es/geograf/sigmur/index.html>
- Singhroy, V. 1995. SAR integrated techniques for geohazard assessment. *Adv. Space Res.* 15: 67-78.
- SIN, Sistema Nacional de Información. 2015. Obtenido de Plan Desarrollo Ordenamiento Territorial. Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de El Oro. Ecuador. Disponible en: https://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/0760000180001_PDYOT-PROVINCIA%20EL%20ORO-14-08-2015_14-08-2015_18-31-46.pdf
- Skolnik, M. I. 1989. Radar handbook/editor in chief, Merrill I. Skolnik, ed. Disponible en: <https://www.geo.uzh.ch/microsite/rsl-documents/research/SARlab/GMTILiterature/PDF/Skolnik90.pdf>
- Song C, Woodcock CE, Seto KC, Lenney MP, Macomber SA. Classification and change detection using Landsat TM data: ¿When and how to correct atmospheric effects? *Remote sensing of Environment*, 2001, 75: 230-244.
- SRGIS Geología y Geomática Ltda. Teledetección. 2010.
- Suarez-Burgoa, L. 2017. Mathematization of geology. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (41): 30-38.
- Tangestani, M., Ja_ari, L., Vincent, R., Sridhar, B. Spectral characterization and ASTER-based lithological mapping of an ophiolite complex: A case study from Neyriz ophiolite, SW Iran. *Remote Sens. Environ.* 2011, 115, 2243–2254.
- Tayebi, M., Tangestani, M., Roosta, H. Mapping salt diapirs and salt diapir-a_ected areas using MLP neural network model and ASTER data. *Int. J. Dig. Earth* 2013, 6, 143–157.
- Thomas, A., Radzuma, T., Mukosi, N. Usefulness of Sentinel-2 satellite data to aid in geoscientific mapping work: a case study of Giyani Greenstone Belt area. 2022. *Episodes Journal of International Geoscience*.
- Tituaña Jami, J. Desarrollo de un método para la clasificación automatizada de imágenes Landsat 8 mediante Redes Neuronales Artificiales. 63 hojas. Quito, 2018: EPN. Repositorio digital. Escuela Politécnica Nacional. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19806>

- Thurmond, A. K., Abdelsalam, M. G., Thurmond, J. B. Optical-radar-DEM remote sensing data integration for geological mapping in the Afar Depression, Ethiopia. 2006. *Journal of African Earth Sciences*, 44(2), 119-134.
- UNIPYTHON. La Transformada de Línea de Hough. 2020 [consulta 07-10-2020]. Disponible en: <https://unipython.com/la-transformada-linea-hough/>
- USGS. United States Geological Survey. 2019 [consulta 06-06-2019]. Disponible en: <https://landsat.usgs.gov/>
- USGS. United States Geological Survey. 2021 [consulta 13-10-2018]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- Varela, A., Ron, S. (2018). Geography and climate of Ecuador. BIOWEB. Pontifical Catholic University of Ecuador. Disponible en: <https://bioweb.bio/geoclima/>
- Vargas, L., Veloz, J., Larreta, E., Bonifaz C. Superficie y accesibilidad a las áreas verdes en la Parroquia Puerto Bolívar de la ciudad de Machala, Provincia El Oro, Ecuador, 2014. *Revista Científica Ciencias Naturales y Ambientales*, 8(1), 29-36.
- Vergara, M. Manual de Fotogeología. Servicio de Publicaciones de la Junta de Energía Nuclear: 16-17. España, 1988.
- Villalta, M., Viña, A., Larreta, E., Romero, P., Mulas, M. 2022. Lineament Extraction from Digital Terrain Derivate Model: A Case Study in the Girón–Santa Isabel Basin, South Ecuador. *Remote Sensing*, 14(21), 5400.
- Wahi, M., Taj-eddine, K., Laftouhi, N. 2013. ASTER VNIR & SWIR band enhancement for lithological mapping-a case study of the Azegour Area (Western High Atlas, Morocco). *ASTER*, 3(12), 33-45
- Watts, D., Harris, N. Mapping granite and gneiss in domes along the North Himalayan antiform with ASTER SWIR band ratios. *Geol. Soc. Am. Bull.* 2005, 117, 879–886.
- Winckell, A., Zebrowski, C., Sourdat, M. 1997. Los paisajes naturales del Ecuador. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 2 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4 (Geografía Física), 417 p.
- Yamaguchi, Y. 1987. Possible techniques for lithologic discrimination using the short-wavelength-infrared bands of the Japanese ERS-1. *Remote Sensing of Environment*, 23(1), 117-129.
- Yamaguchi, Y., Naito, C. Spectral indices for lithologic discrimination and mapping by using the ASTER SWIR bands. *Int. J. Remote Sens.* 2003, 24, 4311–4323.

- Yánez Cevallos, M. E. 2016. Caracterización e interpretación geológico-estructural de las secuencias licotectónicas de la Cordillera Real entre las longitudes 78° 34'y 78° 30'O y las latitudes 1° 40'y 1° 50'S, al Este de Chambo, Provincia de Chimborazo. Bachelor's thesis, Quito.
- Yépez B., 2015. Análisis gráfico lineal y reinterpretación geométrica de la morfología y tectónica del sur de Ecuador. www.viaminera.com/uploads/1/2/5/9/125973241/yepez_sapele_v2.pdf [consulta 28/11-2022].