

Cartografía de minerales de alteración en la Alta Guajira, Península de La Guajira,
Colombia, por medio de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2.

Alejandro Mayorga Amaya

Carlos Felipe Ardila Torres

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Geología
Facultad de Ingenierías Físico Químicas
Bucaramanga

2022

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

1

Cartografía de minerales de alteración en la Alta Guajira, Península de La Guajira,
Colombia, por medio de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2.

Alejandro Mayorga Amaya, Carlos Felipe Ardila Torres

Trabajo de Grado para Optar el título de Geólogo

Director de proyecto

Marco Antonio Nieto Patarroyo

Magister en Geofísica y MBA

Codirector del proyecto

Dilan Arturo Martínez Sánchez

Magister en Geología

Universidad Industrial de Santander
Escuela de Geología
Facultad de Ingenierías Físico Químicas
Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Dedico el éxito en este proyecto a mis padres Yasmin y Gustavo que me apoyaron incondicionalmente en todo momento a lo largo de mi etapa universitaria, doy gracias por su amor incondicional que me ayudó a superar todos los retos que se presentaron gracias a sus consejos y sabiduría.

A mi hermano César que siempre se preocupó por mí y que con sus regaños intentó guiarme y ayudarme en todo lo posible, gracias por ser un gran ejemplo para mi futuro desarrollo como profesional.

También a mis compañeros José, David, Juliana, Sebas, Diana, Chapita y Valentina, los cuales siempre me brindaron su ayuda desinteresada, se preocuparon por mí y me enseñaron los verdaderos valores de la amistad.

Por último, a mis amigos Aguilar y César con los cuales compartí lindos momentos en mi época universitaria, gracias por siempre poner una sonrisa en mi rostro.

Alejandro

Dedicatoria

Dedico el esfuerzo y logro de este proyecto especialmente a mis padres Carlos y Sonia, sin ellos no estaría en el lugar que estoy, siempre me han brindado su apoyo y amor, creyendo en cada una de mis capacidades.

A mi hermana Vivian quien es un ejemplo de Disciplina y orden.

A mis amigos los cuales alguna vez me explicaron y fueron más de una vez un profesor, que además de enseñanzas me ofrecieron vivencias y recuerdos inolvidables.

A la persona que me ha apoyado los últimos meses, la cual tiene una palabra de motivación y un buen abrazo que aportar.

También me lo dedico a mí a mis esfuerzos y luchas, que a pesar de estos siempre pude seguir adelante

Felipe

Agradecimientos

Agradecemos a Dios por permitirnos completar satisfactoriamente esta etapa y por tantas bendiciones que nos ha brindado a lo largo de nuestra vida universitaria.

A nuestro director Marco Nieto por darnos la oportunidad de participar en este proyecto y por siempre dedicar una parte de su tiempo para guiarnos a lo largo de la investigación.

A nuestro codirector Dilan Martínez por sus constantes guías y correcciones, las cuales siempre fueron muy oportunas y lograron que el proyecto se desarrollara de la mejor manera posible.

Por último, a nuestra compañera Diana Aristizábal, que siempre nos ayudó de manera desinteresada y con su apoyo y sus conocimientos tuvo un gran aporte en este proyecto.

Tabla de Contenido

Resumen.....	12
Abstract.....	14
Introducción.....	16
Planteamiento del problema y justificación.....	17
1. Localización.....	18
2. Objetivos.....	20
2.1 Objetivo general.....	20
2.2 Objetivos específicos.....	20
3. Metodología.....	21
3.1 Definición del tema.....	21
3.2 Preprocesamiento.....	21
3.3 Procesamiento y análisis.....	22
3.4 Síntesis de resultados.....	24
4. Antecedentes.....	25
4.1 Marco Geológico.....	29
4.2 Marco teórico.....	36
4.2.1 Alteraciones minerales.....	36
4.2.2 Teledetección.....	38

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

	6
4.2.3 Sensores remotos	40
4.2.4 Satélite Sentinel	40
4.2.5 Radar de apertura sintética (SAR)	41
4.2.6 Componentes principales de un Radar de apertura Sintético	42
4.2.7 Imágenes SAR	43
4.2.8 Interferometría	44
4.2.9 Minimum Noise Fraction (MNF)	45
4.2.10 Spectral Angle Mapper (SAM).....	45
4.2.11 Firmas espectrales.....	46
5. Resultados y discusión.....	52
5.1 Respuestas de los métodos MNF y SAM	52
5.1.1 Minimum Noise Fraction.....	52
5.1.2 Spectral Angle Mapper: grupo de las arcillas	53
5.1.3 Comparación del grupo de las arcillas con el mapa geológico.....	56
5.1.4 Comparación de los resultados del grupo de las arcillas con estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010).....	59
5.1.5 Spectral Angle Mapper: grupo de los óxidos.....	60
5.1.6 Comparación del grupo de los óxidos con el mapa geológico	64
5.1.7 Comparación de los resultados del grupo de los óxidos con estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010).....	66

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

	7
5.2 Modelo de interferometría para identificación de fallas	67
5.2.1 Fallas identificadas en la interferometría de radar	69
5.3 Asociación entre alteraciones minerales y eventos magmáticos	70
5.4 Anomalías minerales a partir de SWIR	73
5.4.1 Índices de Ninomiya: índices de vegetación.....	73
5.4.2 Comparación de los índices de vegetación con Superficie cubierta por Bosque Natural de la Región 2018 del IGAC	75
5.4.3 Índices de Ninomiya: índices de minerales alterados que contienen OH.....	76
5.4.4 Índices de Ninomiya: minerales que contienen OH, comparación con el mapa geológico	77
Conclusiones	81
Referencias Bibliográficas	84
Apéndices.....	88

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de localización generado por los autores.....	18
Figura 2 Diagrama de flujo de la metodología empleada en el proyecto	21
Figura 3 Elementos tectónicos principales de la Península de la Guajira	31
Figura 4 Mapa Geológico de la Península de la Guajira	34
Figura 5 Modelo de zonas de alteración hidrotermal asociadas a depósitos de pórfido de cobre. De Lowell y Guilbert (1970), Fig 3.....	37
Figura 6 SegemAR. [Sensores remotos].....	39
Figura 7 Imagen ilustrativa de la toma de datos por parte de los satélites SAR.....	44
Figura 8 Diagrama de Firmas espectrales de Jarosita, Hematita y Goethita en la región VNIR.	48
Figura 9 Diagrama de algunas firmas espectrales de minerales arcillosos en la región SWIR.	49
Figura 10 Diagrama de firmas espectrales en la región TIR.	50
Figura 11 Mapa del Minium Noise Fraction	52
Figura 12 Mapa Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas.....	54
Figura 13 Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).	56
Figura 14 Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).....	60
Figura 15 Mapa Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos	62
Figura 16 Mapa ideal de la estabilidad de las alteraciones de la pirita.....	63

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

9

Figura 17 Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS 2008).....	64
Figura 18 Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).....	67
Figura 19 Mapa generado referente a la interferometría de radar SAR.....	68
Figura 20 Análisis e identificación de fallas realizados a la interferometría de radar SAR	69
Figura 21 Minerales generados por alteración en La Alta Guajira.....	71
Figura 22 Minerales generados por Meteorización en la Alta Guajira.....	72
Figura 23 Mapa de los índices de Ninomiya referente a los índices de vegetación	73
Figura 24 Mapa comparativo de Índices de Ninomiya: Índices de Vegetación - Superficie Cubierta por Bosque Natural de la Región IDEAM (2018)	75
Figura 25 Mapa de los índices de Ninomiya referente a los índices de los minerales que contienen OH.....	77
Figura 26 Mapa comparativo entre la respuesta de los índices de Ninomiya de los índices de los minerales que contienen OH y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).	78
Figura 27 Leyenda de Mapa Geológico de la zona, tomado de INGEOMINAS (2008).	79

Lista de Tablas

Tabla 1. Características de las bandas del satélite Sentinel-2,.....	41
Tabla 2. Resumen de los datos obtenidos en el mapa SAM del grupo de las arcillas.	58
Tabla 3. Resumen de los datos obtenidos en el mapa SAM del grupo de los óxidos.....	65

Lista de Apéndices

Apéndices A. Mapa ampliado comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).	88
Apéndices B. Mapa ampliado comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).	89
Apéndices C. Leyenda ampliada de Mapa Geológico de la zona, tomado de INGEOMINAS (2008).	90
Apéndices D. Mapa comparativo ampliado de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).	91
Apéndices E. Mapa comparativo ampliado de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).	92

Resumen

Título: Cartografía de minerales de alteración en la Alta Guajira, Península de La Guajira, Colombia, por medio de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2.

Autor: Alejandro Mayorga Amaya (1), Carlos Felipe Ardila Torres (2)

Palabras Clave: Alta Guajira, Imágenes satelitales, Sentinel-2, Cartografía de minerales de alteración, Spectral Angle Mapper (SAM) y Minimum Noise Fraction (MNF).

Descripción:

En el presente documento, se busca complementar los estudios geológicos realizados con anterioridad en la Alta Guajira, con el objetivo de generar mapas de alteraciones minerales con imágenes satelitales Sentinel-2 utilizando los métodos *Spectral Angle Mapper* (SAM), *Minimum Noise Fraction* (MNF) y anomalías minerales a partir de SWIR utilizando el software ENVI®, adicionalmente, generar una interferometría de radar mediante el software Sentinel-1 Toolbox (SNAP) con el fin de analizar las fallas de la zona.

Mediante la aplicación del método *Spectral Angle Mapper* con el fin de identificar minerales de alteración como caolinita, pirofilita, illita, clorita, montmorillonita, goethita, jarosita y hematita mediante sus firmas espectrales, se identificaron litologías como la Cuarzodiorita de Parashi, la Formación Jarara y las Riodacitas de Ipapure las cuales representan condiciones mineralógicas favorables para su depositación. Por medio de la generación de la interferometría de radar se pudieron identificar fallas importantes en la zona,

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

13

como la Falla de Oca, la Falla de Cuisa y la Falla de Humitarra, por último, mediante la matemática de banda descrita por Ninomiya, se identificaron zonas con concentraciones de minerales que contienen OH y se resaltaron zonas con vegetación abundante con el fin de excluirlas de la investigación y evitar ruido en los resultados obtenidos.

Finalmente, se definieron como minerales de alteración aquellos presentes en macizos rocosos, indicando que estos se formaron por acción de los eventos magmáticos o la alteración de litologías preexistentes, los cuales según los resultados obtenidos son la illita, pirofilita y hematita. Por otro lado, se definieron como minerales generados por acción de la meteorización la clorita, caolinita, montmorillonita, goethita y jarosita, debido a que estos se encuentran ligados a zonas de poca altura (valles) y zonas de falla.

* Trabajo de Grado

** Universidad Industrial de Santander. Geología. Director: Marco Antonio Nieto Patarroyo. Magister en geofísica y MBA. Codirector: Dilan Arturo Martínez Sánchez. Magister en Geología

Abstract

Title: Mapping of alteration minerals in Alta Guajira, La Guajira Peninsula, Colombia, using Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite images.

Author(s): Alejandro Mayorga Amaya (1), Carlos Felipe Ardila Torres (2)

Keywords: Alta Guajira, Satellite images, Sentinel-2, Alteration mineral mapping, Spectral Angle Mapper (SAM) and Minimum Noise Fraction (MNF).

Description:

In this work, we seek to complement the geological studies previously carried out in Alta Guajira, with the aim of generating maps of mineral alterations with Sentinel-2 satellite images using the Spectral Angle Mapper (SAM), Minimum Noise Fraction (MNF) methods. and mineral anomalies from SWIR using the ENVI® software, additionally, generate radar interferometry using the Sentinel-1 Toolbox (SNAP) software in order to analyze the faults in the area.

Through the application of the Spectral Angle Mapper method in order to identify alteration minerals such as kaolinite, pyrophyllite, illite, chlorite, montmorillonite, goethite, jarosite and hematite through their spectral signatures, lithologies such as the Parashi Quartzdiorite, the Jarara Formation and the Riodacites of Ipapure represented favorable mineralogical conditions for their deposition. Through the generation of a radar interferometry, important faults were identified in the area, such as the Oca Fault, the Cuisa

Fault and the Humitarra Fault, finally, by means of the band mathematics described by Ninomiya, zones with concentrations of minerals containing OH were identified and areas with abundant vegetation were highlighted in order to exclude them from the investigation and avoid noise in the results obtained.

Finally, alteration minerals were defined as those present in rock masses, indicating that these were formed by the action of magmatic events or the alteration of pre-existing lithologies, which according to the results obtained are illite, pyrophyllite and hematite. On the other hand, chlorite, kaolinite, montmorillonite, goethite and jarosite were defined as minerals generated by the action of weathering, because they are linked to low-lying areas (valleys) and fault zones.

* Degree work

** Universidad Industrial de Santander. School of Geology. Director: Marco Antonio Nieto Patarroyo. MSc in geophysics and MBA. Codirector: Dilan Arturo Martínez Sánchez. MSc in Geology.

Introducción

En los últimos años la identificación y discriminación de minerales a partir del procesamiento digital de imágenes multispectrales e híperespectrales se ha convertido en un tema básico de la geología económica (Bernal y Ramírez, 2010). Partiendo de esto, la teledetección se ha convertido en una herramienta fundamental para la exploración de yacimientos minerales debido a las facilidades que presenta, ya que esta puede realizarse de manera remota para facilitar el análisis en áreas de difícil acceso e incluso los bajos costos que este método representa. Las aplicaciones de los sensores remotos e imágenes satelitales son ampliamente utilizadas en la cartografía geológica, identificación de yacimientos minerales y zonas de alteración en diferentes depósitos minerales. (Rajendran y Nasir, 2017).

La Alta Guajira es una zona particularmente árida y con escasa vegetación, lo que permite utilizar de manera óptima todo el rango espectral de las imágenes ópticas multispectrales e híperespectrales para la identificación de minerales y características geológicas en los suelos (Bernal y Ramírez, 2010), favoreciendo el análisis de imágenes en la zona al reducir el genera ruido por efecto de la vegetación. Finalmente, el gran potencial minero que posee la región hace que el área de estudio seleccionada sea un lugar óptimo para hacer este tipo de análisis satelitales.

Teniendo en cuenta lo anterior, y considerando que la cartografía geológica en áreas desérticas, montañosas o densamente vegetadas a veces se enfrenta a muchas limitaciones, últimamente muchos de los métodos de detección remota utilizan en imágenes ASTER o LANDSAT para facilitar esa tarea (Fal, Maanan, Baidder y Rhinane, 2018), asimismo, hay

que resaltar que el uso de imágenes multiespectrales de Sentinel-2 en el mapeo geológico ha demostrado que la alta resolución espectral de las bandas VNIR y SWIR crea una sinergia con la alta resolución espacial para un mapeo litológico óptimo (Fal, Maanan, Baidder y Rhinane, 2018), por tanto, el objetivo de la investigación propuesta es generar mapas de alteraciones minerales con imágenes satelitales utilizando los métodos *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Minimum Noise Fraction* (MNF).

Planteamiento del problema y justificación

Con este trabajo se busca aportar información adicional a la existente sobre la geología en la Península de la Alta Guajira, ya que la implementación de nuevas técnicas de cartografía puede complementar las investigaciones realizadas con anterioridad, debido a que la realización presencial de estas es complicada, ya que existen áreas específicas de la región las cuales son de difícil acceso, esto sumado a los numerosos resguardos indígenas presentes en la zona, lo cual dificulta posibles investigaciones.

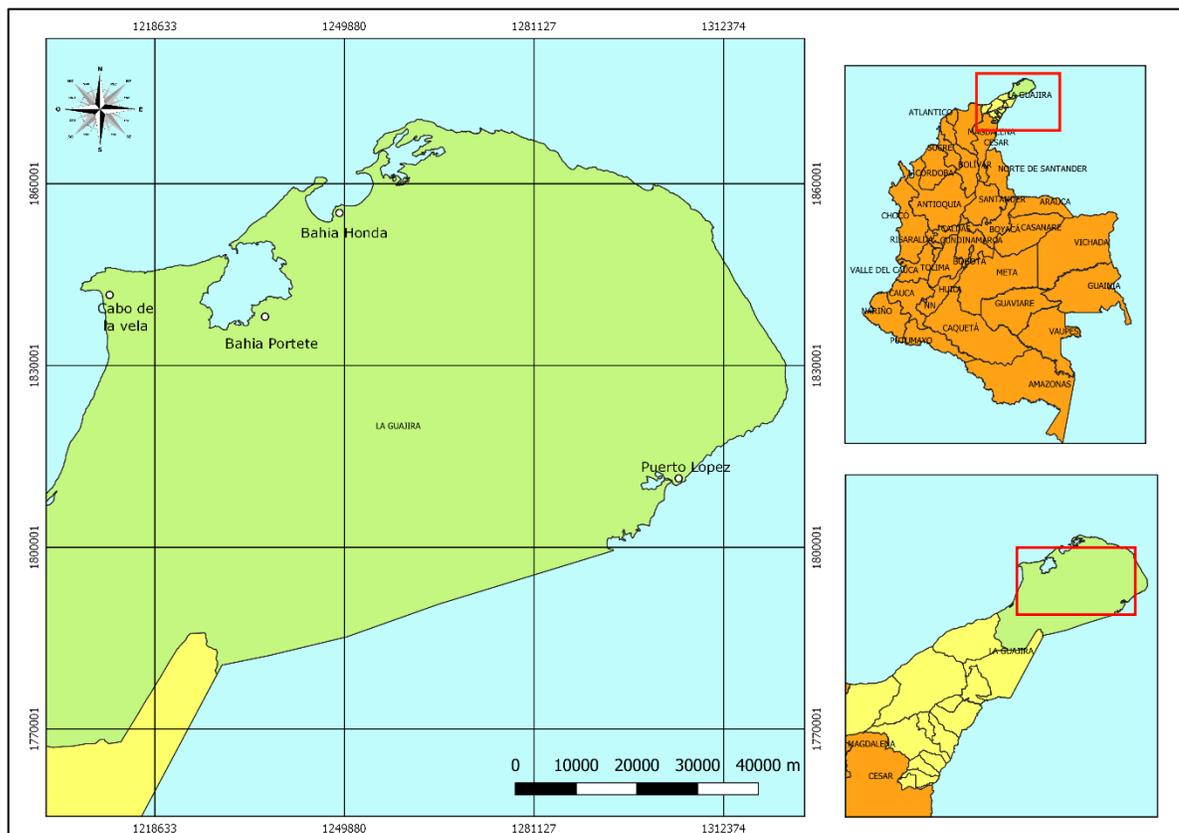
Teniendo en cuenta lo anterior, con el desarrollo de este trabajo se busca generar un análisis cartográfico de las de alteraciones minerales presentes en la zona, los cuales serán realizados a partir de imágenes tomadas del satélite Sentinel-2, utilizando métodos como el *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Minimum Noise Fraction* (MNF), para una posterior comparación con el mapa geológico de la zona y estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010), para contrastar los resultados obtenidos y, por último, identificar si hay una posible asociación entre las alteraciones minerales identificadas y los cuerpos ígneos de la zona.

1. Localización

El trabajo de investigación se desarrolla en la Alta Guajira, sector de la península de la Guajira, la cual corresponde al segmento más al noroeste de Suramérica. Según Burgl *et al.* (1960), la península tiene una extensión N-E de 120 km y N-S de más de 80 km. Cabe resaltar que esta región constituye la margen norte de la placa Sur Americana y forma parte de una zona en la que se produce una compleja interacción entre las placas Caribe, Suramericana y Nazca (López y Zuluaga, 2012).

Figura 1

Mapa de localización generado por los autores



CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

19

Nota. El mapa representa la ubicación del proyecto de tesis “Cartografía de minerales de alteración en la Alta Guajira, Península de La Guajira, Colombia, por medio de imágenes satelitales Sentinel-1 y Sentinel-2”.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Generar mapas de alteraciones minerales con imágenes satelitales utilizando los métodos *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Minimum Noise Fraction* (MNF) para la zona de la Alta Guajira, Península de la Guajira, Colombia.

2.2 Objetivos específicos

-Comparar las respuestas de los métodos SAM y MNF con respecto a la geología de la zona de estudio.

-Generar un modelo de interferometría de radar para realizar la identificación de las fallas presentes en la zona de estudio a partir de imágenes de la plataforma satelital Sentinel-1.

-Identificar si existe asociación entre las alteraciones minerales y los eventos magmáticos que generaron los cuerpos ígneos de la zona.

-Identificar anomalías minerales a partir de coeficientes de bandas e índices de Ninomiya (SWIR).

3. Metodología

Para la realización del proyecto y cumplimiento de los objetivos propuestos se desarrollaron en distintas fases (figura 2).

Figura 2

Diagrama de flujo de la metodología empleada en el proyecto



3.1 Definición del tema

Al definir la generación de mapas de alteración como el eje central de la investigación, se planteó una revisión de estudios previos sobre los métodos de teledetección propuestos para así analizar sus posibles aplicaciones en el desarrollo del proyecto, en esta fase también se planteó la búsqueda de un lugar idóneo para la aplicación de estos, así como la generación de un cronograma para el cumplimiento de los plazos establecidos.

3.2 Preprocesamiento

En esta etapa se buscaron y seleccionaron las imágenes crudas de la zona tomadas por satélite definido (Sentinel-2) para la generación de los mapas de alteraciones, posteriormente se aplicó a estas el preprocesamiento necesario para la realización los métodos propuestos en la investigación como la corrección radiométrica, corrección atmosférica y la generación de máscaras para excluir de la imagen pixeles con información que podría generar ruido en los resultados (vegetación, agua, nubes y nieve) procedimientos llevados a cabo en el software

ENVI®. En esta etapa se realizó también la búsqueda de las imágenes de radar del satélite Sentinel-1 de la zona.

3.3 Procesamiento y análisis

A partir de las imágenes preprocesadas en la fase anterior, se realizaron múltiples métodos de análisis siguiendo las siguientes actividades para el cumplimiento de los objetivos:

Respuestas de los métodos SAM y MNF:

Mediante la utilización del software ENVI®, se aplicó la clasificación supervisada denominada *Spectral Angle Mapper*, la cual empleó firmas espectrales estandarizadas publicadas por el USGS, contenidas en la biblioteca espectral del programa empleado.

Se aplicó el método una vez fueron eliminados todos los píxeles con datos de vegetación, nubes y cuerpos de agua para evitar datos falsos en el resultado, el cual arrojó las zonas de concentración de los minerales seleccionados: caolinita, pirofilita, illita, clorita, montmorillonita, goethita, jarosita y hematita.

En esta etapa de la investigación también se dio la generación del proceso *Minimum Noise Fraction* para segregar el ruido de los datos y reducir los requerimientos de hardware inherentes al procesamiento el cual es descrito por Green (1988) y Boardman y Kruse (1994).

Modelo de interferometría para identificación de fallas:

Se generó una interferometría de radar con el objetivo de identificar fallas en la zona de estudio, ya que estas tienen un impacto en la generación de minerales alteración y meteorización, esta fue creada en base a 2 imágenes de radar, las cuales fueron correlacionadas previamente y fueron aplicadas las siguientes correcciones:

Tops Deburst: Esta corrección se utiliza para unir todas las ráfagas de una franja en una sola imagen.

Topographic phase removal: Para enfatizar las firmas de fase relacionadas con la deformación, las fases topográficas generalmente se eliminan utilizando un DEM conocido.

Multi looking y Phase filtering: la fase interferométrica puede corromperse por el ruido de decorrelaciones temporales, decorrelaciones geométricas, dispersiones de volumen y errores de procesos. Para poder analizar correctamente las firmas de fase en el interferograma, se aumentará la relación señal/ruido aplicando técnicas de *Multi looking y phase filtering*.

Geocoding: Para que los datos sean útiles, la imagen de fase interferométrica debe proyectarse en un sistema de coordenadas geográficas mediante un paso de geocodificación asistido por DEM.

Asociación entre alteraciones minerales y eventos magmáticos:

En esta etapa de la investigación, se analizaron los datos obtenidos por el estudio de las firmas espectrales y la ubicación de los paquetes mineralizados, los cuales fueron divididos en 2 grupos para analizar su relación con los eventos magmáticos.

Se tomaron como minerales de alteración aquellos minerales del estudio los cuales su respuesta estuviera ligada mayormente a macizos rocosos, siendo estos generados directamente por actividad hidrotermal, por otra parte, los minerales clasificados como generados por meteorización no se encuentran en los macizos rocosos, estos se encuentran en valles, zonas de poca altitud o zonas de falla y se realizaron mapas individuales para exponer la distribución espacial de ambos grupos.

Anomalías minerales a partir de SWIR:

En esta etapa se dio la aplicación de los índices de Ninomiya para la determinación de vegetación (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada o NDVI) para la identificación de cobertura vegetal presente en la zona y así apartar estas zonas de la investigación debido a que la cobertura vegetal genera resultados erróneos en la aplicación de los procesos.

Asimismo, se utilizaron los índices de Ninomiya para la determinación de óxidos en la zona de estudios y ver la respuesta de los píxeles de la imagen al método propuesto, esto con el fin de identificar mediante este proceso de matemática de bandas, zonas con altas concentraciones de minerales alterados que contienen OH, elementos presentes en algunas formulas químicas de los minerales seleccionados en el estudio.

3.4 Síntesis de resultados

Finalmente, tras la generación de los mapas propuestos a lo largo de la investigación, se realizó la integración sobre los resultados obtenidos y su análisis para ser plasmados en el documento. Los mapas producidos fueron comparados con múltiples autores (IGAC (2018),

INGEOMINAS (2008), Bernal y Ramirez (2010)) para dar lugar a una discusión alrededor de los datos obtenidos para finalmente, plasmar la información generada en nuevos mapas y fructificar las conclusiones del estudio.

4. Antecedentes

Para la correcta ejecución de la investigación, se consultaron diferentes textos de estudios previos con el objetivo de complementar el entendimiento sobre la geología del área y los métodos de teledetección utilizados en el trabajo, los principales estudios consultados fueron:

Título del estudio: Identificación de minerales a partir del procesamiento digital de imágenes ASTER.

Autores: Alejandro Bernal Valencia y Mauricio Ramírez Daza. (2010)

Descripción: En el estudio se identificaron zonas de minerales presentes en el departamento de la Guajira, esto, a partir del tratamiento de cinco imágenes extraídas del satélite ASTER mediante softwares como ERDAS y ArcGIS, aplicando la correlación de mapeo espectral (SCM) para así discriminar 28 minerales objetivo de exploración de diferentes elementos metálicos y sales de los grupos II, III, IV, V, VI y VI presentes en la región.

Aporte: Siendo el artículo mencionado similar a la investigación propuesta, este significa una fuente importante de información para la realización del proyecto, ya que este maneja un

método presente en la investigación (SCM), aplicado en un área compartida con el proyecto (La Alta Guajira), el cual identifica esta como un lugar idóneo para la aplicación de este tipo de proyectos cartográficos aplicados de manera remota debido a la escasa vegetación presente en la zona.

Título del estudio: Neis de Macuira: evolución tectónica de las rocas metamórficas paleozoicas de la alta guajira, Colombia

Autores: Julián López y Carlos Zuluaga. (2012)

Descripción: En este artículo los autores describieron el Neis de Macuira, centrándose en la evolución tectónica, caracterizada por diferentes fases deformativas pre-, sin- y post-migmatíticas que podrían relacionarse con diferentes episodios tectónicos: el primero relacionado con la colisión de Laurasia y Gondwana (Orogenia Alleghaniana - Paleozoico Tardío) y el segundo relacionado con la evolución de la Placa Caribe (Orogenia Andina - Meso a Cenozoico), los autores también realizaron un análisis a las litologías allí presentes las cuales fueron generadas por eventos magmáticos como consecuencia a estos procesos tectónicos, encontrando neises, anfibolitas, esquistos, mármoles, y migmatitas, a los cuales se le aplicaron posteriormente análisis geoquímicos para esclarecer los posibles orígenes de estos y la interacción de los protolitos presentes en la zona para la generación de estas.

Aporte: El amplio análisis dado a las litologías presentes en la Alta Guajira y al desarrollo del magmatismo que se generó en la parte más al norte de la península, el cual generó fuertes

alteraciones en las rocas preexistentes en la zona, por tanto, este análisis significa una gran fuente de información para el entendimiento del marco geológico de la zona, así como un punto de comparación con autoridad para las correlaciones necesarias para el desarrollo del libro y la identificación de posibles minerales de alteración.

Título del estudio: Geología de la Península de la Guajira

Autor: Hans Burgl. (1960)

Descripción: En este artículo, el autor hace una descripción detallada de todas las litologías presentes en las serranías de la Península de la Guajira, así como las estructuras presentes, eventos magmáticos y la evolución tectónica de la zona.

Aporte: Este artículo aporta información detallada para la comprensión de la evolución geológica de la península, presentando también la tabla cronoestratigráfica de esta, respaldando su información con tablas, diagramas, mapas de localización de las litologías y descripciones a fondo de todos los tipos de roca allí presentes.

Título del estudio: Remote sensing for mineral exploration.

Autor: Floyd Sabins. (1999)

Descripción: El artículo presenta la importancia que ha tenido en los últimos años el tratamiento de imágenes de satélite para mapear la geología, las fallas y fracturas que podrían llegar a localizar los depósitos de minerales, el autor también hace mucho énfasis en cómo se podrían reconocer rocas alteradas hidrotermalmente por sus firmas espectrales, lo cual es una gran ayuda a la hora de identificar de manera remota posibles yacimientos hidrotermales, lo cual, facilita la exploración de posibles depósitos económicamente interesantes, solo con la información de las alteraciones encontradas. Por último, resalta como imágenes de satélite *Landsat Thematic Mapper TM* se utilizan ampliamente para interpretar tanto estructuras geológicas como las alteraciones hidrotermales, resaltando como las imágenes procesadas digitalmente pueden identificar dos ensamblajes de minerales de alteración hidrotermal: minerales de hierro y arcillas más alunita.

Aporte: El principal aporte del artículo escrito por Sabins, es el énfasis que este le da al mapeo de alteraciones minerales mediante imágenes de satélite, reconociendo estas como una herramienta fundamental para la exploración de depósitos económicamente importantes, como los presentados en Chile y Nevada. También hay que resaltar en este escrito, la investigación de las diferentes firmas espectrales de estas alteraciones, lo cual facilita su identificación al aplicar diferentes tratamientos a las imágenes satelitales.

Título del estudio: The contribution of Sentinel-2 satellite images for geological mapping in the south of Tafilalet basin (Eastern Anti-Atlas, Morocco).

Autores: Said Fal, Mehdi Maanan, Lahssen Baidder, Hassan Rhinan.

Descripción: El artículo se centra realizar en una clasificación litológica utilizando imágenes multispectrales extraídas del satélite Sentinel-2 en el sur de la cuenca del Tafiulet. Las principales mejoras utilizadas para imágenes de combinación RGB fueron el *Optimal Index Factor* (OIF) y *Minimum Noise Fraction* (MNF). Los clasificadores *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Maximum Likelihood Classifier* (MLC) fueron utilizados para lograr una clasificación más precisa para el mapeo de litofacies. También se utilizaron combinaciones de falso color para seleccionar posibles regiones de interés. Los resultados obtenidos mostraron una clara discriminación de las diferentes unidades litológicas en el área de estudio.

Aporte: En el artículo se pueden ver aplicados métodos de clasificación propuestos en el proyecto de investigación (SAM y MNF), en imágenes extraídas del mismo satélite (Sentinel-2), lo cual da una guía de como la aplicación de estos puede arrojar una muy buena respuesta en los mapas generados para la identificación de grupos minerales.

4.1 Marco Geológico

En la configuración geológica de la península de la Guajira se reconocen 3 bloques tectono-estratigraficos, separados por tres sistemas de fallas principales: Falla de Oca; Falla de Cuisa-Paraguaná (Falla la Guajira-Paraguaná, según Bonini, 1984) y Falla de Cuisa-Simarúa según INGEOMINAS (1986). Este conjunto de bloques o microplacas como también son denominadas, limitadas por fallas de rumbo en la Alta Guajira, son el producto de la interacción de las placas ya mencionadas, mediante un específico proceso donde ocurre

una partición de la deformación, ya que los bloques poseen desplazamientos relativos que por otra parte son evidencia de los efectos del movimiento convergente de la placa Caribe y la margen norte de la Placa Suramericana (Kellogg y Bonini, 1982; Kellogg, 1984; Pindell y Ericsson, 1984; Taboada *et al.*, 2000; Gomez *et al.*, 2007; Lopez *et al.*, 2011a, b; Mora *et al.*, 2011).

Esta compleja interacción, se da gracias a unos patrones de convergencia específicos como lo es la convergencia oblicua entre la Placa Caribe y la margen norte de la Placa Suramericana (Kennan y Pindell, 2009). Algo particular de esta convergencia, es el hecho de que al norte de Colombia da origen a un evento tectónico compresivo de carácter regional, que genera a su vez deformación al interior de la Placa Suramericana Kellogg, 1984; Caro y Sparatt, 2003; Kellogg *et al.*, 2005; Montes *et al.*, 2010) (figura 3).

Una de las fallas que limitan estos bloques, la Falla de Cuisa, pone en contacto rocas metamórficas Paleozoicas del Neis de Macuira con rocas sedimentarias Mesozoicas (Grupo Cocinas) y rocas metamórficas Meso proterozoicas a Neoproterozoicas del Neis de Jojoncito (López y Zuluaga, 2012) (figura 3). La falla de Cuisa se ha interpretado como una falla de rumbo, con desplazamiento lateral de 15 km a 25 km (Raasveldt, 1956; Alberding, 1957; MacDonald, 1964; Álvarez, 1967; Krause, 1971; Gómez, 2001). Cabe resaltar que esta falla presenta una cinemática dextral con una componente en buzamiento, donde el bloque sur de la falla es levantado (Renz, 1960; Rollins, 1965; Álvarez, 1967). Por otra parte, según Macellari (1995), esta falla de rumbo se ha definido como activa desde el Eoceno Tardío. Por otro lado también se ha establecida como un sistema de fallas tipo *wrench* desde el Oligoceno Superior hasta épocas muy recientes (Hosie, 1994). La Falla Simarua la cual

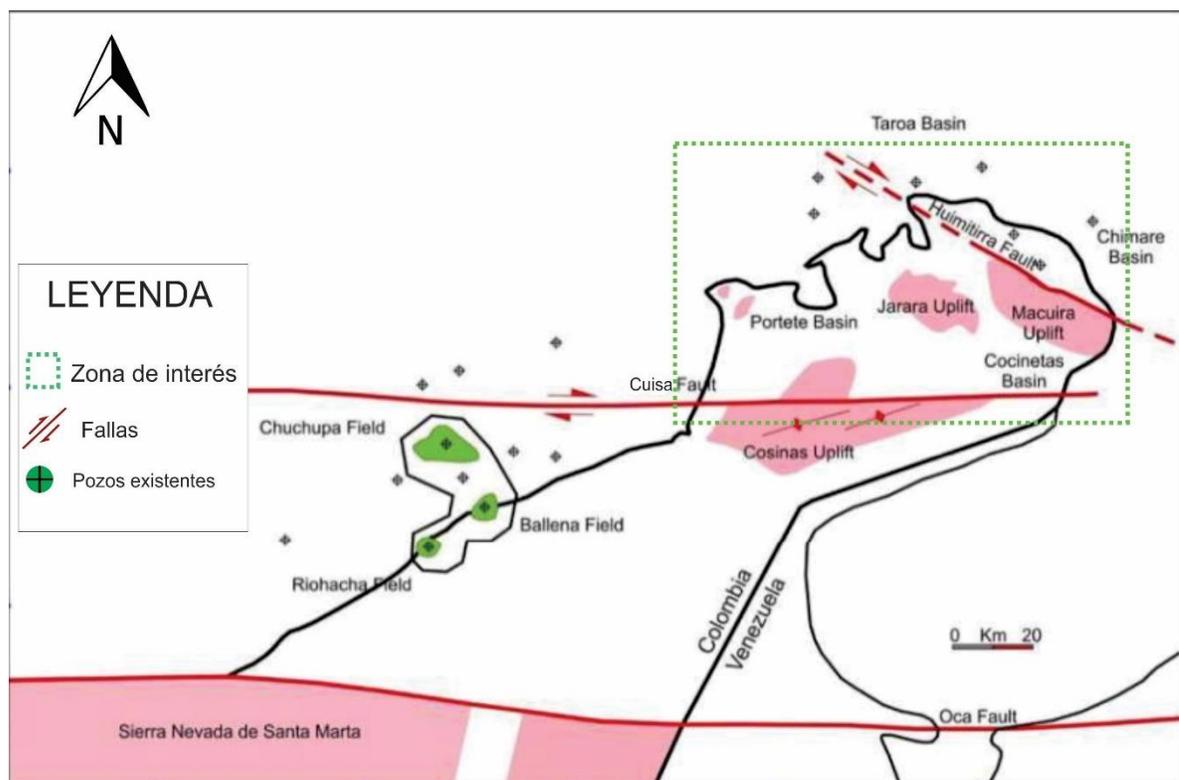
CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

31

también posee un papel muy importante en la tectónica de bloques, posee un azimut de 60° y se extiende por aproximadamente 26 km en la Serranía de Simarua en donde marca el contacto entre rocas meta sedimentarias de los Esquisto del Jarara en la orientación NW con rocas metamórficas del Neis de Macuira al SE (Álvarez, 1967).

Figura 3

Elementos tectónicos principales de la Península de la Guajira



Nota. El mapa ilustra 2 de los sistemas de fallas importantes en la zona, los cuales son la Falla de Cuisa y la Falla de Huimitarra, al igual en este grafico se puede observar 3 de los macizos que se encuentran en la zona de interés, estos son específicamente, La Serranía de Macuira, La Serranía de Jarara y La serranía de Cocinas, tomado de Hocol (1993) (Citado por Aguilera, 2011).

En cuanto a la morfología de la zona se y reconocen 3 macizos montañosos que se levantan en forma de bloques o de domos sobre las planicies costeras que pueden alcanzar alturas hasta de 900 m (Burgl *et al.*, 1960).

El primero de ellos es la Serranía de Macuira. Burgl *et al.*, (1960), postula que esta serranía se encuentra en la parte oriental de la península y se extiende en dirección NW-SE además de esto alcanza su máxima altura en los cerros de Palua, de Jaurama y de Jiborne; esta asimismo se encuentra constituida en su núcleo por una composición granítica, rodeada por neises y esquistos cristalinos y semicristalinos. En su extremo oriental se halla una región extensa ocupada por Girón y el Cretáceo.

Por otra parte, de la Serranía de Jarara se localiza al noreste del centro de la península y al occidente de la Serranía de Macuira (Burgl *et al.*, 1960). La serranía de Jarara se extiende morfológicamente en dirección NW-SE, y culmina en los cerros del Ruma y del Jijoi, compuesta por neises y esquistos cristalinos y semicristalinos, donde la estribación septentrional de la serranía definida como Parashi (Burgl *et al.*, 1960).

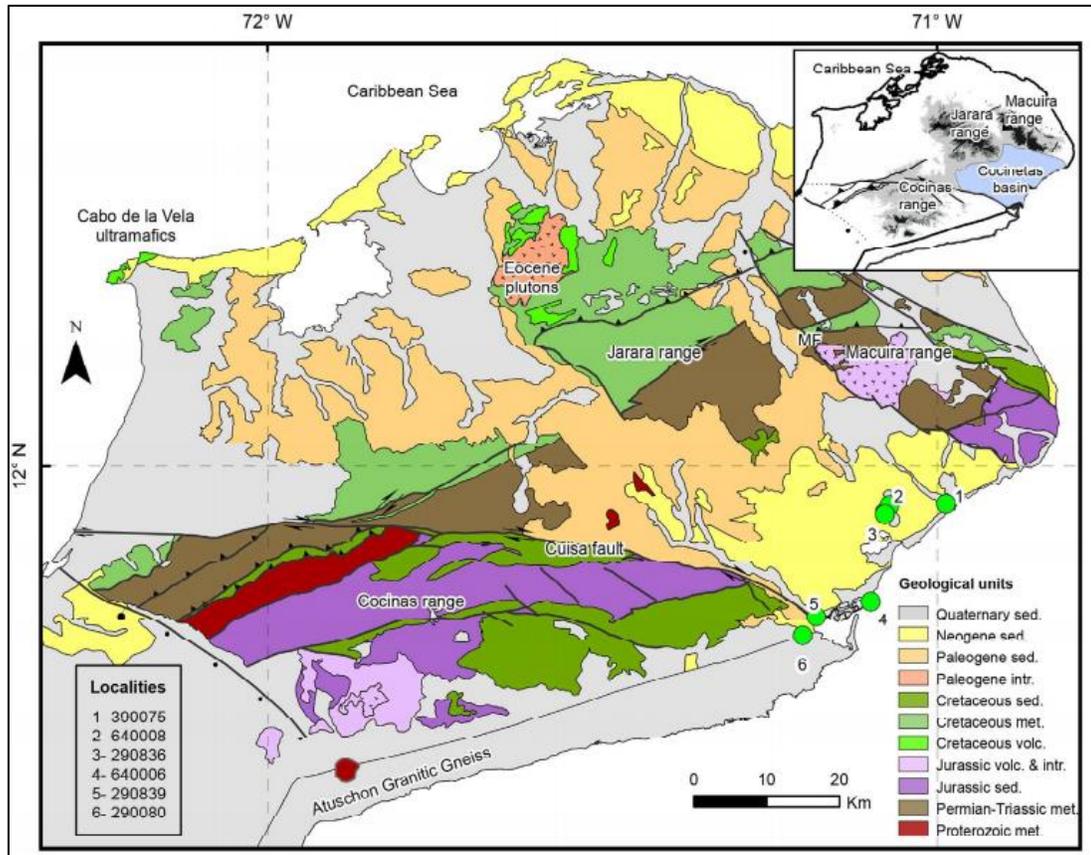
La Serranía de Carpintero se desarrolla en el extremo noroeste de la península y se halla cerca al Cabo de la Vela. Como afirma Burgl *et al.*, (1960), la Serranía consta de areniscas semimetamórficas y en su parte meridional, de esquistos cristalinos.

Burgl *et al.*, (1960), también menciona que los mayores macizos de la península, las serranías de Macuira, Jarara y de Cocinas, se encuentran separadas por dos fosas tectónicas

o grabenes de épocas Oligocenas, que se prolongan en dirección NW- SE, los grabenes corresponden a la fosa de Sanache y la fosa Camama, la primera se localiza entre las serranías de Cocinas y Jarara, en cuanto a la segunda se ubica entre las Serrania Jarara y Macuira (Burgl *et al.*, 1960) (figura 4). De acuerdo con Burgl *et al.*, (1960), estos grabenes son el producto de movimientos tectónicos que se desarrollaron durante el Eoceno y Oligoceno, determinando en primer lugar, la morfología actual de la península . Siguiendo con la evolución morfológica se destaca que, a pesar de encontrarse por encima del nivel del mar, en el Neogeno, la península se hundió en el mar en el Oligoceno Superior, con excepción de las centrales de la Macuira y de Jarara (Burgl *et al.*, 1960).

Figura 4

Mapa Geológico de la Península de la Guajira



Nota. En el presente mapa se representan unidades cronoestratigráficas con algunas localidades y las mayores fallas encontradas en la zona, tomado de Pérez y Consuegra (2018) modificado de Gómez et al.,(2015); (Irving, 1972).

En cuanto a las rocas que afloran en la Península de la Guajira, existe una gran variedad de litologías y composiciones, con diferencias en sus edades como enfatiza Burgl *et al.* (1960). En el texto de Burgl *et al.* (1960), agrupan en cuatro las unidades y formaciones que se presentan en esta Península, siendo la edad el factor distintivo, sin embargo, en la zona de estudio (Alta Guajira) solo afloran 2 de los 4 expuestos por Burgl *et al.* (1960) los cuales son:

El grupo Mesozoico, que comprende los sedimentos continentales y depósitos volcánicos de la Formación Girón y los marinos del Suprajurásico y del Cretáceo; El grupo Cenozoico, que comprende sedimentos del Oligoceno, Mioceno, Plioceno y cuaternario (Burgl *et al.*, 1960).

Las rocas de edad Jurásica están establecidas principalmente en el Grupo Cocinas, el cual se encuentra constituido por conglomerados, arenitas, calizas, argilitas, limolitas y lutitas (Renza, 1956; MacDonald, 1964; Radelli, 1960). A diferencia de las anteriores las rocas del Cretácico de la Alta Guajira se pueden distinguir 2 tipos, la primera ubicada al norte de la Falla Simarua la cual está representada por unidades metamórficas, mientras que la segunda localizada al sur se caracteriza por rocas sedimentarias que localmente sufrieron y fueron afectadas por un metamorfismo dinámico (López y Zuluaga, 2012). Las unidades metamórficas que se incorporan en edades cretácicas, como lo es Esquistos de Jarara, Conjunto metamórfico Etpana y metamorfitas asociadas, están constituidas principalmente por filitas, esquistos, cuarcitas, serpentinas, mármoles, metarenitas, arcoscicas, metaconglomerados, y metagabros (Radelli, 1960; MacDonald, 1964; Lockwood, 1965; Álvarez, 1967; Maya, 2001; Rodríguez y Londoño, 2002; Zuluaga *et al.*, 2009) a diferencia de las anteriores las unidades sedimentarias con metamorfismo dinámico (Complejo Estructural de Alas y Formación Paráuinkrein) contienen areniscas, conglomerados, calizas y arcillolitas con grado variable de cataclasis (Álvarez, 1967; Rollins, 1960; Rollins, 1965; Renz, 1956; Zuluaga *et al.*, 2009).

En cuanto el rango sedimentario del Cretácico se basa en conglomerados y brechas sedimentarias, calizas, arenitas y sales calcáreas, margas, arenitas y lodolitas foliadas en contactos agradacionales y frecuentes variaciones laterales, toda esta variedad de litologías se encuentran en formaciones Poschachi, Palanz, Moina, Yuruma Superior y La Luna (López y Zuluaga, 2012).

Teniendo en cuenta a Lockwood (1965) el Paleógeno sedimentario se encuentra constituido por areniscas y rocas calcáreas con abundante fauna fósil. En cuanto a las rocas ígneas presentes representan dos fases de magmatismo, una durante el Jurásico expuesta por las formaciones Granodiorita de Ipapure, Riodacita de Ipapure en el Cerro de la teta, Tonalita de Cocinas y Granodiorita de Siapana. Y la otra fase de magmatismo durante el terciario en la Cuarzo diorita de Parashi.

4.2 Marco teórico

4.2.1 Alteraciones minerales

Alonso (2013), afirma que una alteración es una modificación de las características de los materiales, de su composición o de sus propiedades, normalmente por exposición al ambiente.

Una alteración es un proceso (hidratación, oxidación, etc.) generalmente tardío y superficial, que transforma un mineral en otro (otros). Los tipos de procesos de alteración son múltiples y complejos, varían dependiendo el tipo material y tienen lugar por cambios

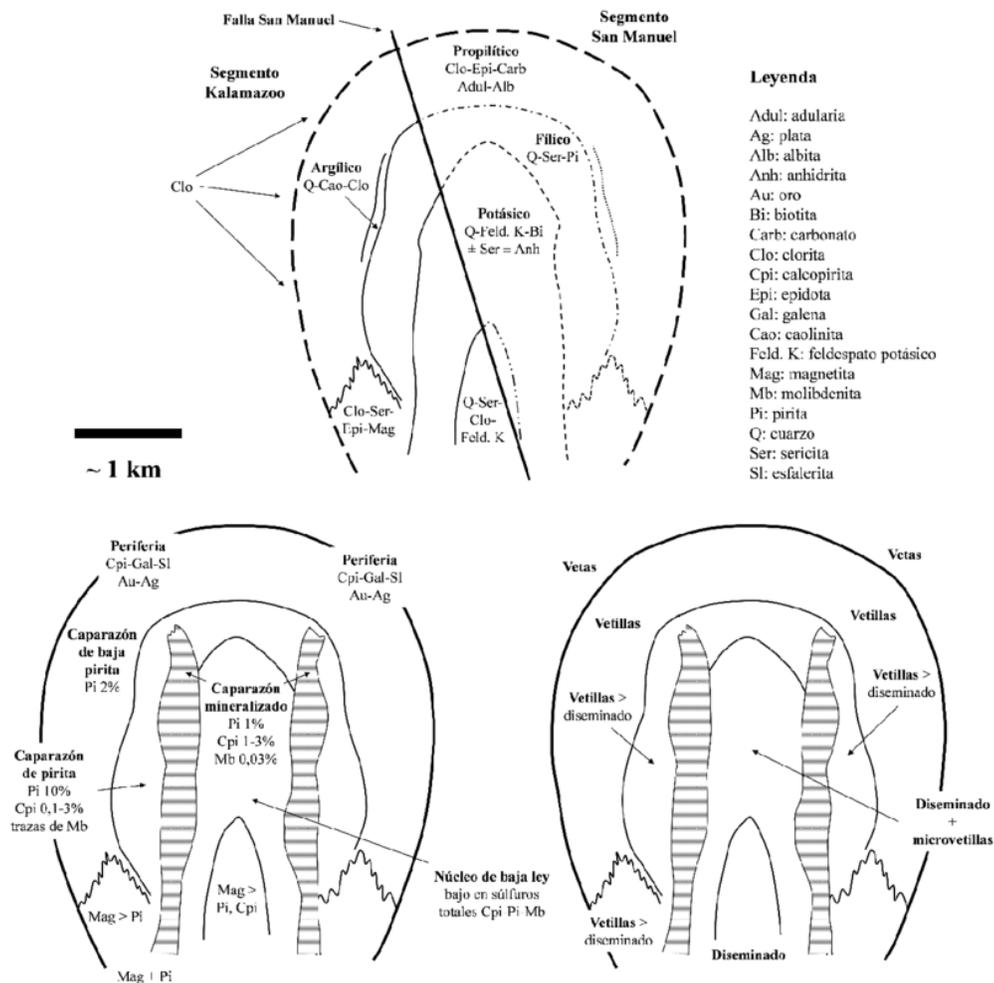
CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

temperatura, cambios químicos, exposición atmosférica con abundancia de agua y oxígeno, cambios de pH, etc. (Alonso, 2013).

Lowell y Gullibert (1970) desarrollan un modelo de alteración hidrotermal, específicamente de un depósito de cobre porfírico, en este se puede evidenciar las diferentes etapas de alteración y en qué orden se pueden encontrar (figura 5).

Figura 5

Modelo de zonas de alteración hidrotermal asociadas a depósitos de pórfido de cobre tomado de Lowell y Guilbert (1970), Fig 3.



4.2.2 Teledetección

Como señala Binti (2017), la teledetección es una ciencia que se encarga de la obtención de información, sobre un objeto determinado, sin entrar en contacto con el mismo, es decir de forma remota, esta información es recogida mediante la radiación electromagnética reflejada por el objeto en la superficie terrestre, toda esta información es recogida por un sensor remoto.

Binti (2017) señala algunas ventajas de esta ciencia, las cuales según el autor son las siguientes:

- Permite analizar zonas que no se pueden monitorear de forma constante.
- Ahorro en estudio de áreas determinadas, ya que el costo de implementación es menor, en comparación con otros métodos.
- Cobertura global y periódica de la superficie terrestre.
- Información sobre regiones no visibles del espectro.
- Además de esto ayuda a evaluar diferentes cambios en el área de estudio como lo son: cambios urbanísticos, cambios climáticos, cambios en la cartografía, cambios en bosques.

Para llevar a cabo esta ciencia, es necesario contar con un sistema de teledetección, el cual consta de los siguientes elementos, según Binti (2017):

Fuente de Energía: es el emisor de la radiación electromagnética, la cual llega a la superficie terrestre para ser detectada por el sensor remoto. En sistemas pasivos, esta fuente de energía es el sol.

Atmósfera: es el medio por el cual transmite la radiación electromagnética de la fuente de energía.

Sensores remotos: se encargan de recibir la información de la superficie terrestre y enviarla al sistema de recepción y proceso.

Sistema de recepción y proceso: el sistema se encarga de recibir la información del sensor y guardarla en un formato adecuado para su posterior interpretación.

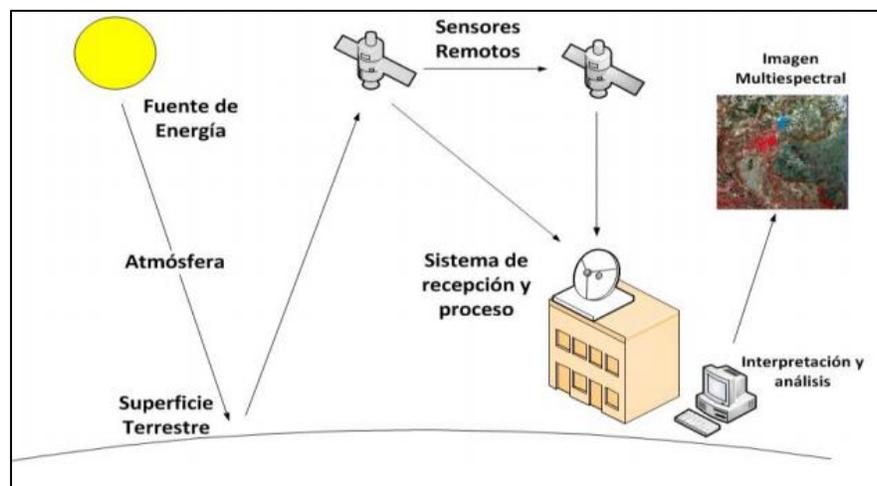
Interpretación de datos: es donde se clasifica y analiza la información contenida en la imagen:

Resultado: Se obtiene la imagen (multiespectral o pancromática) de la zona a estudiar.

Superficie terrestre: está formada por diversos componentes (agua, suelo, vegetación, etc.) y es la que recibe de manera directa la radiación electromagnética emitida por la fuente de energía.

Figura 6

SegemAR. [Sensores remotos].



Nota. El grafico simboliza todo el procesamiento llevado a cabo para la generación de una imagen multiespectral tomado de SEGEMAR (s.f.).

4.2.3 Sensores remotos

Los sensores remotos a su vez sin divididos en tres tipos, con respecto a su resolución espacial, estos son:

- Baja resolución espacial
- Media resolución espacial
- Alta resolución espacial

En este proyecto manejamos imágenes que se derivan de sensores remotos de alta resolución, como lo es Sentinel-2.

4.2.4 Satélite Sentinel

Es una nueva flota de satélites diseñada específicamente para proporcionar los abundantes datos e imágenes de los cuales se nutre el programa Copernicus, de la Comisión Europea (ESA, 2015). De acuerdo con Borjas (2017) estos satélites han despertado un gran interés en la comunidad científica debido a sus múltiples aplicaciones, ya que según la ESA (2015), onsta con una alta resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica, adicionando que posee un alto campo de visión que abarca gran parte de la superficie terrestre.

Esta herramienta ayudará a predecir la producción de las cosechas, y las diferentes aplicaciones de la vegetación en la Tierra, además que podrá mapear el estado y los cambios de la superficie terrestre, alertando de cualquier tipo de contaminación en lagos o imágenes de inundaciones (ESA, 2015).

Tabla 1

Características de las bandas del satélite Sentinel-2,

Nro.	Nombre de banda	Longitud de onda (nm)	Ancho de Onda (nm)	Resolución (m)
1	<i>Coastal aerosol</i>	443.9	27	60
2	<i>Blue</i>	496.6	98	10
3	<i>Green</i>	560	45	10
4	<i>Red</i>	664.5	38	10
5	<i>Vegetation Red Edge</i>	703.9	19	20
6	<i>Vegetation Red Edge</i>	740.2	18	20
7	<i>Vegetation Red Edge</i>	782	28	20
8	<i>NIR</i>	835.1	145	10
9	<i>Water vapour</i>	945	26	60
10	<i>SWIR-cIRRUS</i>	1373.5	75	60
11	<i>SWIR</i>	1613.7	143	20
12	<i>SWIR</i>	2202.4	242	20

Nota: la información de la tabla fue tomada de <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>

4.2.5 Radar de apertura sintética (SAR)

De acuerdo con Martínez (2019), un Radar de Apertura Sintética (SAR) es aquel que envía pulsos electromagnéticos a la tierra con el objetivo de grabar su retorno una vez reflejado por la superficie y obtener así imágenes del área que ilumina. Martínez (2019), indica que estos

sensores activos a diferencia de otros no necesitan la energía solar para su funcionamiento, por esto puede operar tanto de día como de noche, esta autora también afirma que la característica distintiva del SAR frente a otros sistemas o sensores de microondas es la consecución de altas resoluciones en la dirección del movimiento del sensor, mediante la síntesis de una antena de grandes dimensiones a partir de una antena real más pequeña, es por esta característica que se le da origen al nombre “Radar de apertura sintética”, ya que realiza un procesado adecuado de los pulsos recibidos, dando como resultando imágenes de alta resolución en dos dimensiones.

4.2.6 Componentes principales de un Radar de apertura Sintético

Teniendo en cuenta lo expuesto por Martínez (2019), un SAR consta fundamentalmente de un transmisor, un receptor, una antena, un sistema para almacenar los datos y un sistema para procesarlos. Martínez (2019), también aclara que el transmisor genera una sucesión de pulsos en los cuales se transportan microondas a intervalos regulares, estos a su vez son enfocados por la antena en un haz el cual ilumina la superficie lateral y perpendicularmente al movimiento de la plataforma. La antena recibe una porción de la energía transmitida que ha sido reflejada por los diferentes objetos encontrados dentro del haz iluminado, midiendo a su vez el retardo del tiempo entre la transmisión de un pulso y la recepción del “eco”, esto con el fin de determinar la distancia del radar y por lo tanto la ubicación de los diferentes objetos distribuidos en el terreno (Martínez, 2019).

4.2.7 Imágenes SAR

Martínez (2019) afirma que las imágenes SAR nos proporcionan un mapa de reflectividad del área iluminada, además que la intensidad de la señal reflejada permite discriminar entre diferentes objetos del terreno, de esta manera aquellos objetos que devuelven más señal al radar se identificarán como puntos brillantes en la imagen y las superficies más lisas o planas, que devuelven menos señal, se identificarán como zonas oscuras.

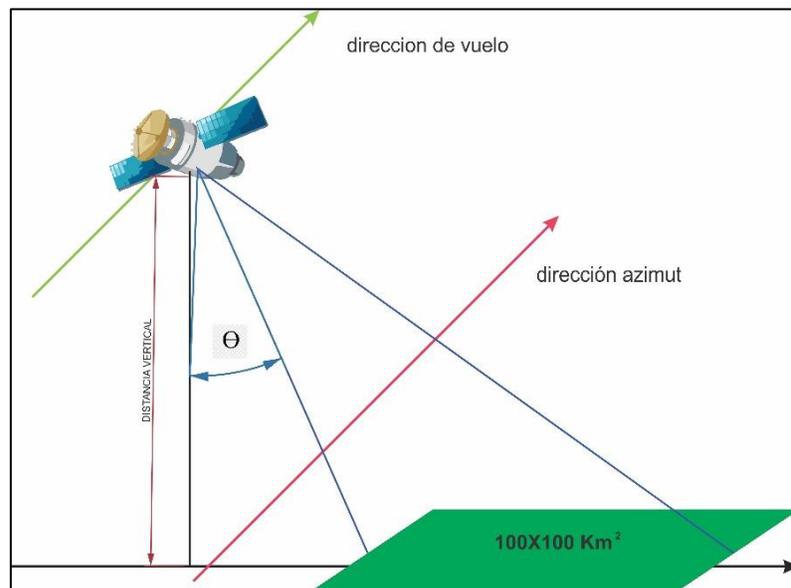
Para llegar al resultado de una Imagen SAR es necesario explicar cómo funcionan este sistema y como realiza en especial la toma de datos (figura 7). Este sistema según Agudo *et al.* (2003), mide distancias y fases en una dirección particular la cual es denominada *LOS* que significa *Line Of Sight*, que es la línea que une el satélite con el punto tierra que se quiere observar, esta dirección en especial se mide con cierto Angulo de incidencia respecto a la vertical (θ) (figura 7), gracias a esto el sistema puede medir deformaciones en la respectiva dirección *LOS* y además como lo indican estos autores se puede pasar de la dirección ya mencionada a movimientos verticales con una simple transformación geométrica, por tanto el resultado de este barrido es una imagen “compleja” que deriva una imagen de fase y otra de amplitud. Agudo *et al.* (2003) también afirma que la imagen de amplitud da información sobre la potencia de la señal por cierto terreno y por tanto diferentes tipos de superficie responde de manera distinta (figura 7). Por el contrario, la imagen de fase contiene dos componentes diferentes el *Phase shift* que se produce a lo largo de la interacción de la señal radar con el blanco, y la segunda que es la fase geométrica, la cual relaciona el doble camino entre la antena y el blanco, y se representa de la siguiente forma:

$$\varphi_{geom} = \frac{4\pi \cdot R}{\lambda}$$

Donde R es la distancia antena-blanco y λ la longitud de la onda portadora

Figura 7

Imagen ilustrativa de la toma de datos por parte de los satélites SAR



Nota. la imagen fue modificada de Agudo et al. (2003)

4.2.8 Interferometría

La interferometría diferencial, es una técnica de teledetección aplicada en la generación de modelos numéricos del terreno (MNTs) y la monitorización de deformaciones de superficie (Biescas *et al.*, 2018). El centro de estudio, de la interferometría, es la información proporcionada por las imágenes de fase complejas SAR (Hanssen, 2001). La interferometría es utilizada para la cuantificación de deformaciones ocurridas en la superficie terrestre, mediante la obtención de la altura del suelo a partir de dos imágenes SAR, obtenidas desde puntos próximos con cierto intervalo temporal de separación (Jiménez, 2012)

4.2.9 Minimum Noise Fraction (MNF)

Esta transformación determina la dimensionalidad de la imagen, segrega el ruido de los datos y reduce los requerimientos de hardware inherentes al proceso (Green *et al.*, 1988; Boardman y Kruse, 1994)- Esta técnica precisa la coherencia espacial en las imágenes propias y asimismo define el *cut-off* entre la “señal” y “ruido”, permitiendo realizar análisis específicos y precisos (L3harris, s.f.).

El MNF se puede llevar a cabo de dos métodos, los cuales son el lineal o el directo, en el presente estudio se ejecutó de la segunda manera, la cual consiste en determinar en las imágenes las bandas coherentes, por lo que se observa las imágenes y sus valores propios, asimismo se ejecuta una transformación inversa, utilizando un subconjunto espectral en donde se encuentren solo las bandas “buenas” o suavizando las bandas que contienen el ruido.

4.2.10 Spectral Angle Mapper (SAM)

Según Fredes (2009), es un método automatizado, utilizado para la comparación de firmas espectrales de la imagen con firmas ya registradas. Fredes (2009), también afirma que es necesario convertir los datos de la imagen a reflexión aparente para que la clasificación (SAM) sea efectiva, estos algoritmos determinan la similitud entre las dos firmas espectrales calculando el ángulo espectral entre ellos, manejándolos y definiéndolos como unidades vectoriales en el espacio espectral con dimensionalidad espectral igual al número de bandas.

Esta técnica es un método de comparación automático entre los espectros de cada píxel de la escena o imagen a estudiar con respecto a un conjunto de espectros de referencia (Kruse *et al.*, 1993). Citando a Pérez *et al.* (2010), el algoritmo básico permite tratar los espectros como vectores en un espacio n-dimensional, en donde es el número de bandas incluidas en la clasificación. Asimismo, Pérez *et al.* (2010) sostiene que esta comparación se realiza en términos de la diferencia angular entre los vectores de la imagen y la referencia, La diferencia puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n t_i^2 \cdot \sum_{i=1}^n r_i^2}} \right)$$

Ecuación utilizada para la generación del Espectral Angle Mapper (SAM).

Tomado de Pérez *et al.* (2010).

En donde t es el espectro de estudio y r el espectro de referencia, el numero n representa el número de bandas estudiadas y α es el ángulo entre vectores (Pérez *et al.*, 2010).

4.2.11 Firmas espectrales

Según Gupta (2018) la firma espectral o curva de respuesta espectral, es la interacción o relación entre la intensidad de la radiación electromagnética y la longitud de onda. Por tanto, una respuesta o un patrón en la curva espectral seria distintivo para identificar un objeto del otro. La identificación de ciertos objetos en el aspecto de la teledetección se encuentra definido bajo ciertos comportamientos espectrales.

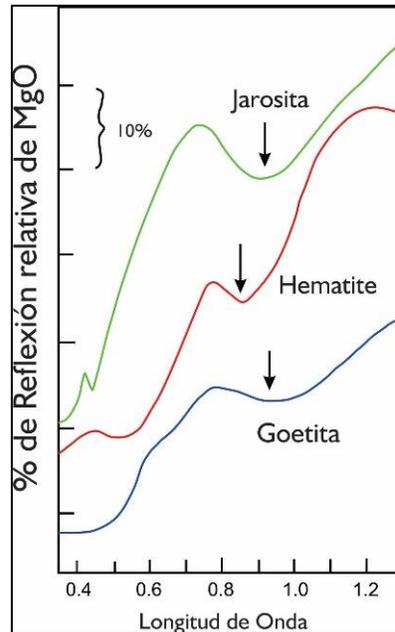
Uno de estos es la absorción selectiva, es aquella donde las bandas de las ondas se absorben de una manera selectiva y a su vez el carácter espectral se caracteriza por una reflexión relativamente débil. La segunda es la Reflexión selectiva la cual hace referencia a que cierta longitud de onda se refleja fuertemente, lo que conlleva a una reflexión selectiva que causa la separación un haz monocromático. Y finalmente la tercera es la Emisión selectiva, es un criterio determinativo debido a que algunos objetos pueden presentar una emisión selectiva más alta o baja en una longitud de onda en concreto (Gupta,2018).

Gracias a la composición y estructura química de ciertos minerales se pueden diferenciar y definir en algunas regiones del espectro electromagnético, el cual a su vez se puede dividir en 3 partes: VNIR (figura 8), SWIR (figura 9) y TIR (figura 10).

La región del VNIR (*Visible and Near-Infrared*) (0.4 – 1.0 μm) es caracterizada por ser dominada por procesos electrónicos en metales de transición como lo son Fe, Mn, Cu, Ni, Cr etc. Algo a resaltar de esta región es el papel del hierro, ya que es el componente más importante además de poseer propiedades espectrales en la región VNIR (Gupta,2018)

Figura 8

Diagrama de Firmas espectrales de Jarosita, Hematita y Goethita en la región VNIR.

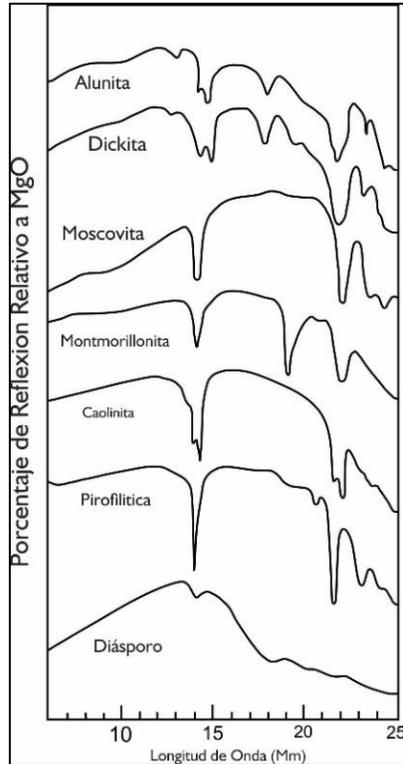


Nota. El grafico representa el porcentaje de reflexión relativa de MgO vs la Longitud de onda característica de cada mineral Modificado de Gupta (2018)

De acuerdo con Gupta (2018) la región SWIR es marcada por características espectrales de hidroxilos y carbonatos, los cuales se encuentran comúnmente en la corteza terrestre. El Ion hidroxilo es un componente fundamental para minerales formadores de roca como lo son las arcillas, las micas, la clorita y demás, este ion presenta una banda de absorción aproximadamente de 2,74-2,77 μm . En cuanto a los Carbonatos que se hallan en forma de Calcita, Magnesita, Dolomita y siderita, su banda de absorción importante en la región SWIR ocurre a 1.9, 2.35 y 2.55 μm .

Figura 9

Diagrama de algunas firmas espectrales de minerales arcillosos en la región SWIR.

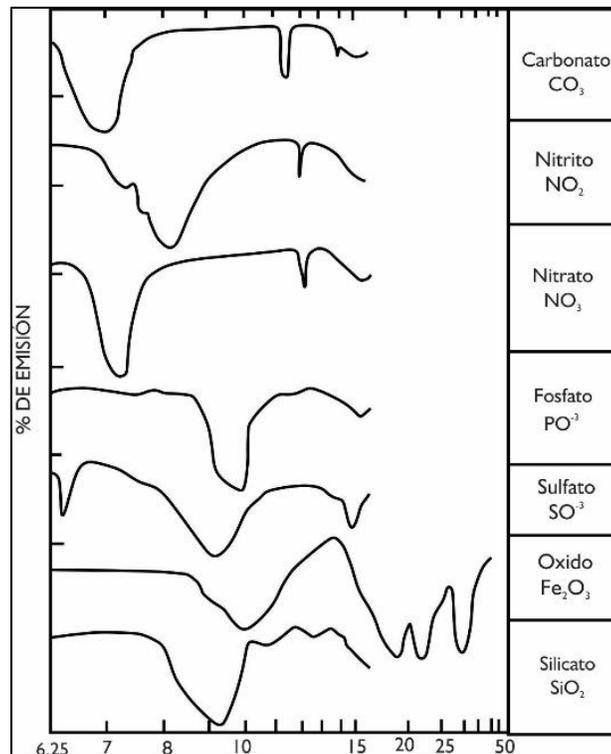


Nota. El presente gráfico, es la visualización del porcentaje de Reflexión Relativo de MgO VS la longitud de Onda de ciertos minerales arcillosos, los cuales son fundamentales en el presente estudio Modificado de Gupta (2018)

En cuanto a la región TIR se caracteriza por manifestar propiedades espectrales de muchos grupos minerales formadores de roca (Silicatos, Carbonatos, Óxidos, Fosfatos, Sulfatos, Nitratos, Nitritos etc.) y también presentan características de vibración de algunos grupos aniónicos (Gupta, 2018)

Figura 10

Diagrama de firmas espectrales en la región TIR.



Nota. El diagrama es posible observar diferentes firmas espectrales de diferentes compuestos, en este caso el que se tendrá en cuenta para el estudio en proceso es el de Óxidos. Modificado de Gupta (2018).

4.2.12 Índices de Ninomiya

Los índices de Ninomiya son utilizados para la identificación y definición de zonas mineralizadas o áreas alteradas a través de estudios satelitales, además de esto Ninomiya abarca el NDVI el cual es el índice de vegetación utilizado para discernir zonas de alta vegetación, de zonas en las cuales las rocas se encuentren expuestas y reducir el ruido y las malas interpretaciones de la teledetección.

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) es definido a través de la siguiente formula (Ninomiya, 2003)

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}$$

En donde el NIR hace referencia al infrarrojo cercano que se encuentra en la banda 3 y el “red” o rojo que da lugar en la banda 2, lo que busca esta formula es resaltar las zonas que tienen alta vegetación, a través de sus valores ya que poseen un cambio drástico entre la banda 3 y banda 2. Ya destacadas estas zonas es más fácil discernir entre cuales son las áreas que poseen roca o suelo descubierto para llevar a cabo en ellas el respectivo análisis.

Otro índice que se utilizo fue el Índice de minerales que poseían OH o el OHI, este se define de la siguiente manera (Ninomiya,2003)

$$OHI = \frac{banda_4 \times banda_7}{banda_6 \times banda_7}$$

Al igual que la anterior este índice destacara los valores que en estas bandas sean altos, en este caso los valores de los minerales que contienen OH y se podrán definir que áreas o cuerpos poseen alteración.

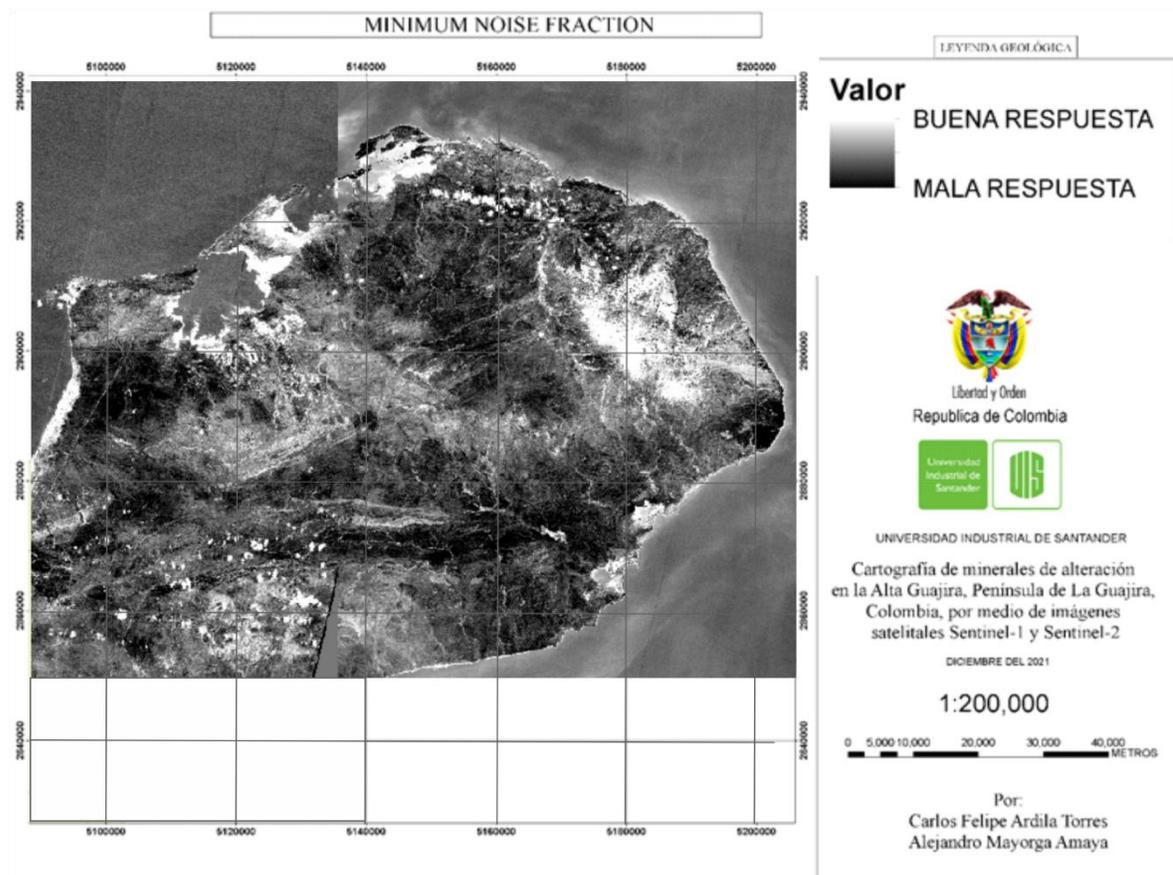
5. Resultados y discusión

5.1 Respuestas de los métodos MNF y SAM

5.1.1 Minimum Noise Fraction

Figura 11

Mapa del Minium Noise Fraction



Se realizó el método de MNF (figura 11), debido a que se identificó como una herramienta útil para reducir la cantidad de ruido contenida por la imagen, esto se consigue gracias a múltiples cálculos matemáticos realizados por el software, los cuales son representados en una matriz de correlación, a este proceso se le conoce como *noise whitening*.

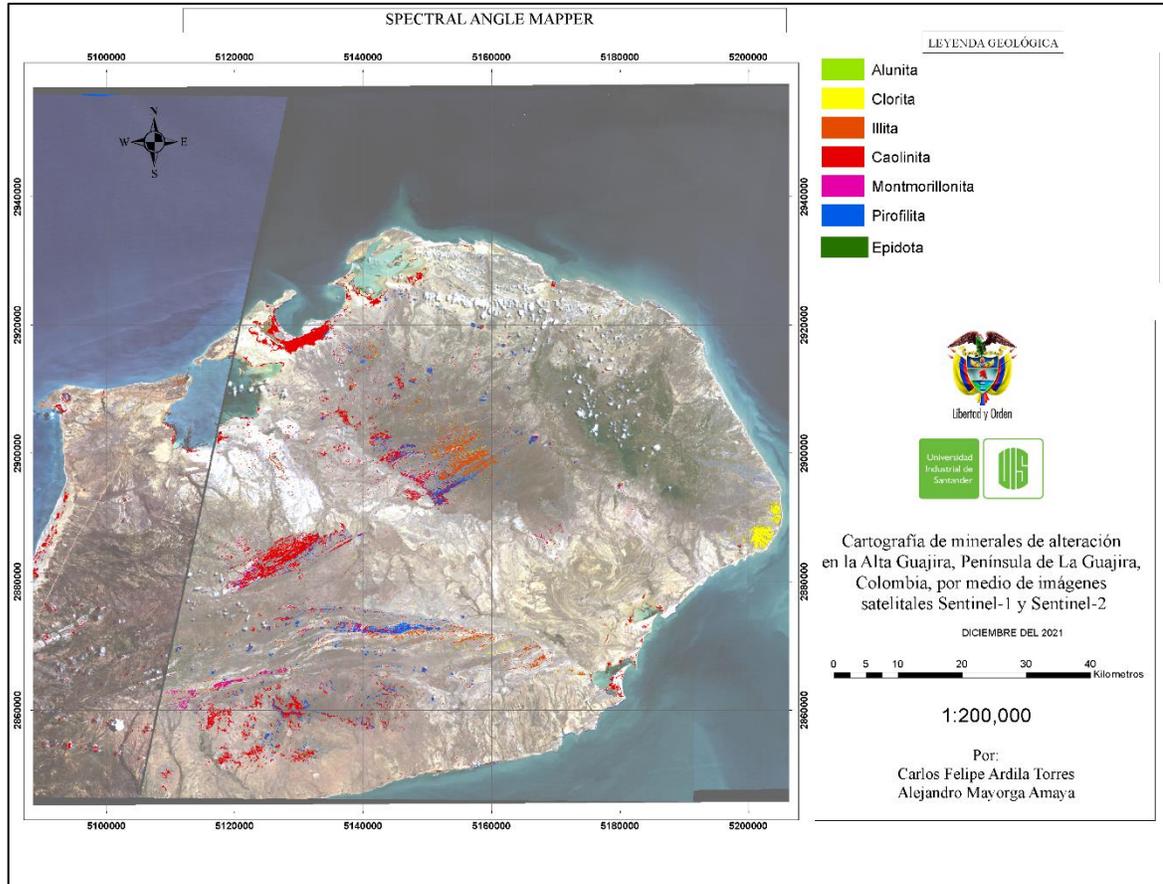
También es importante resaltar en este proceso, que, al ser efectuado, ayuda a que los procesos que sean generados posteriormente tengan un menor tiempo de ejecución, debido a que este disminuye la cantidad de datos que el software debe manejar y tratar.

5.1.2 Spectral Angle Mapper: grupo de las arcillas

Se realizó el procesamiento de las imágenes mediante el método *Spectral Angle Mapper*, el cual se caracteriza por ser un método supervisado de clasificación, el cual utiliza firmas espectrales estandarizadas (extraídas de la biblioteca espectral del USGS) y las compara con los índices espectrales presentes en la imagen (figura 12) , por tanto, se generó una biblioteca de firmas espectrales de diferentes minerales arcillosos asociados a minerales de alteración y estos fueron sus resultados:

Figura 12

Mapa Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas



- Alunita ($KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$).

Mineral perteneciente al grupo de los sulfatos, el cual se caracteriza por ser un sulfato hidratado de aluminio y potasio. No se evidenció mayor presencia del mineral en la zona de estudio.

- Caolinita ($Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$).

Mineral perteneciente al grupo de los silicatos, muy relacionado a otros minerales como feldespato, cuarzo y calcita. Es el mineral arcilloso con mayor aparición en el análisis

generado, mostrando respuesta al método en zonas como Bahía Honda al norte de la península, la serranía de Jarara y la serranía La Teta.

- Clorita $((\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}; (\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6)$.

Mineral perteneciente a los filosilicatos (aluminosilicatos), con altas concentraciones de hierro y manganeso. Se registra una fuerte respuesta de este mineral en la zona conocida como punta espada, al este de la península.

- Epidota $(\text{Ca}_2\text{Fe}_{3+\text{Al}_2}(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH}))$.

Mineral perteneciente al grupo de los silicatos, rico en calcio, aluminio y hierro. Como la alunita, la epidota no muestra grandes concentraciones en la zona de estudio.

- Illita $((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$.

Mineral perteneciente al grupo de los filosilicatos, bastante similar a la moscovita. En el estudio, su aparición se vio ligada a la serranía de Jarara, ubicada ligeramente al Noreste de la península.

- Montmorillonita $((\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$.

Mineral perteneciente al grupo de los filosilicatos, rico en magnesio y aluminio. Presente entre las serranías de Cocinas y La Teta, ubicándose hacia el suroeste de la península.

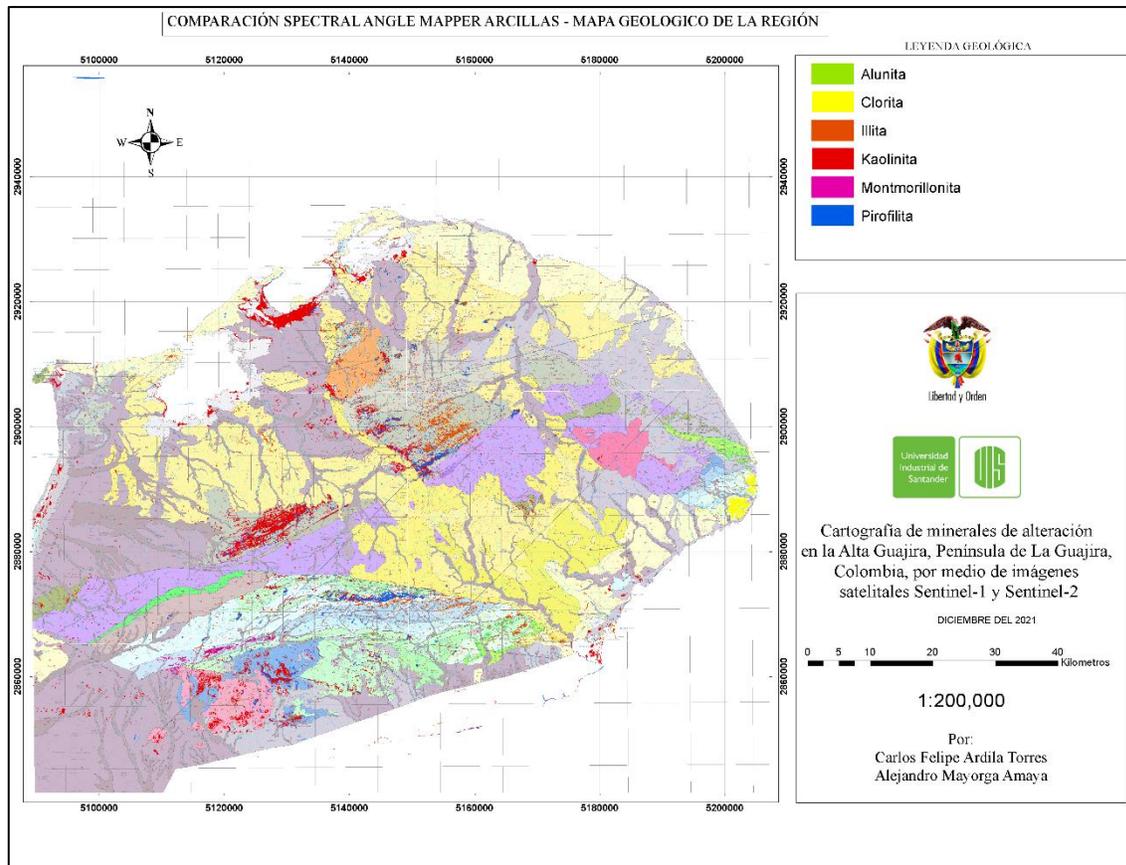
- Pirofilita $(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$.

Mineral perteneciente al grupo de los silicatos, caracterizado por ser un silicato de aluminio hidratado. Este se encuentra mayormente en la serranía de Jarara y en la zona perteneciente a la serranía cocinas hacia el centro de la península, muy cerca a la Falla de Cuisa, la falla de mayor tamaño de la zona analizada.

5.1.3 Comparación del grupo de las arcillas con el mapa geológico

Figura 13

Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).



- Caolinita ($Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$).

Mostró respuesta al método en zonas como Bahía Honda posiblemente por aporte mineral del stock del Eoceno conocido como la Cuarzodiorita de Parashi, también en la serranía de Jarara, en la cual se ve asociada a la Formación Jarara, la cual está conformada por filitas, esquistos cloríticos y calizas poco metamorfoseadas del Cretácico Superior, por último, se

ve asociada a la serranía la teta, más específicamente al cuerpo de las Riodacitas de Ipapure, conformada por dacitas-riolitas de grano fino del Jurásico Inferior, debido a que estas riolitas son ricas en feldespato potásico (INGEOMINAS, 2008).

- Clorita $((\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}; (\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{OH})_6)$.

Se registra respuesta de la firma de este mineral en la zona conocida como punta espada, al este de la península, una posible explicación a esta concentración podría ser el aporte del complejo metamórfico conocido como el Grupo Macuira, el cual consta de anfibolitas, neises cuarzo feldespáticos y esquistos micáceos (INGEOMINAS, 2008).

- Illita $((\text{K}, \text{H}_3\text{O})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10})$.

En el estudio, su aparición se vio ligada a la serranía de Jarara, ligada a las filitas y esquistos cloríticos presentes en la Formación Jarara (INGEOMINAS, 2008) ya que esta este mineral caracteriza por formarse por alteración de moscovita y feldespato, también se encuentra presente, pero en menor medida en la serranía de cocinas.

- Montmorillonita $((\text{Na}, \text{Ca})_{0,3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O})$.

Presente entre las serranías de Cocinas y La Teta, la respuesta a la firma de la montmorillonita se dio en la Formación Cheterlo, las cuales están caracterizadas como arcillolitas rojas y verdes a areniscas(INGEOMINAS, 2008), y la aparición de este mineral en este tipo de roca puede verse por la alteración de minerales ferromagnesianos y feldespatos.

- Pirofilita $(\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2)$.

Su respuesta se encuentra mayormente focalizada en la serranía de Jarara, probablemente asociada a los eventos magmáticos del Cretácico en la península, los cuales dieron origen a la Formación Jarara. El mineral también se presenta en la zona de la serranía cocinas, ligado

a la Formación Rancho Grande, ya que el cemento de esta se encuentra mayormente compuesto de este mineral o incluso formar parte de la matriz gracias a un medio de un transporte más cercano (Azancot, 2008).

Tabla 2

Resumen de los datos obtenidos en el mapa SAM del grupo de las arcillas organizados en orden de aparición (mayor aparición a menor aparición)

Nombre del mineral	Formula química	Litología asociada	Zona de aparición
Caolinita	$(Al_2 Si_2 O_5(OH)_4)$.	Cuarzodiorita de Parashi, Formación Jarara y Riodacitas de Ipapure.	Bahía Honda al norte de la península, la serranía de Jarara y la serranía La Teta.
Pirofilita	$(Al_2 Si_4 O_{10}(OH)_2)$.	Formación Jarara y Formación Rancho Grande	Serranía Cocinas
Illita	$((K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4 O_{10})$.	Formación Jarara	Serranía de Jarara
Clorita	$((Mg, Fe)_3(Si, Al)_4 O_{10}; (OH)_2 \cdot (Mg, Fe)_3(OH)_6)$.	Grupo Macuira	Punta espada
Montmorillonita	$((Na, Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2 Si_4 O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$.	Formación Cheterlo	Serranías de Cocinas y La Teta
Pirofilita	$(Al_2 Si_4 O_{10}(OH)_2)$.	Formación Jarara y Formación Rancho Grande	Serranía Cocinas
Alunita	$(KA_13(SO_4)_2(OH)_6)$.	No se evidenciaron concentraciones importantes del mineral en la zona de estudio.	No se evidenciaron concentraciones importantes del mineral en la zona de estudio.

Epidota	$(Ca_2Fe_3+Al_2)(Si_2O_7)(SiO_4)O(OH)$.	No se evidenciaron concentraciones importantes del mineral en la zona de estudio.	No se evidenciaron concentraciones importantes del mineral en la zona de estudio.
---------	--	---	---

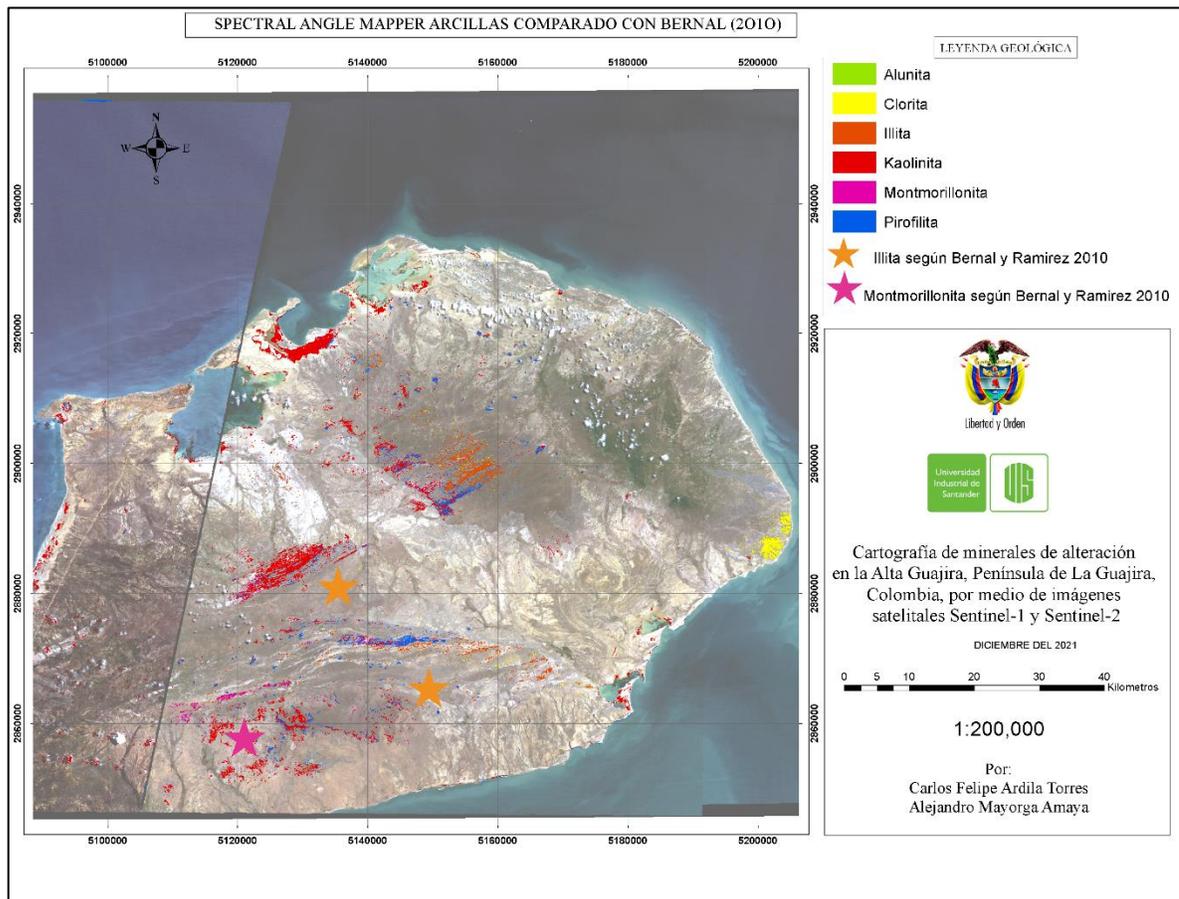
Nota. Tabla generada por los autores con el fin de resumir los resultados obtenidos en la investigación.

5.1.4 Comparación de los resultados del grupo de las arcillas con estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010).

Los resultados del estudio de Bernal Ramírez (2010) destacan 2 minerales del grupo de las arcillas: la illita y la montmorillonita (figura 14) , según sus análisis “la illita se localiza sobre las rocas de los grupos yaruma y bahía honda en las serranías de Cocinas y Simarúa, respectivamente”, lo cual sería concordante con respuestas generadas en el estudio, ya que la illita posee una respuesta a los métodos aplicados cerca al grupo yaruma, de la serranía de cocinas. En el caso de la montmorillonita, su aparición es descrita como “la mayor densidad de ocurrencia se localiza sobre las rocas del grupo Macuira en el occidente de la Serranía Cocinas” (Bernal y Ramírez, 2010), siendo también compatible la ubicación geográfica dada por Bernal y Ramírez (2010), con la respuesta del SAM expuesta previamente.

Figura 14

Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).



5.1.5 Spectral Angle Mapper: grupo de los óxidos.

Se realizó un nuevo estudio de *Spectral Angle Mapper*, pero en esta oportunidad, enfocado a ubicar en la imagen, los pixeles con índices espéctales similares a óxidos (figura 15):

- Hematita (Fe_2O_3)

Mineral perteneciente al grupo de los óxidos, se caracteriza por la representación mineral del óxido férrico. Al analizar los resultados del SAM aplicado, la aparición de este mineral

se evidencia en la serranía de Jarara, y en menor medida, a la intrusión magmática del eoceno conocida como la Cuarzodiorita de Parashi (ubicada al norte de la serranía de Jarara).

- Jarosita ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$).

Mineral perteneciente al grupo de los sulfatos, caracterizado por ser un sulfato de hierro y potasio con hidroxilos. Su aparición en la zona analizada se ve focalizada en las zonas de bahía honda y bahía hondita, localizadas en el norte de la zona de estudio, también se evidencia su aparición en la cuenca de cocinetas (ubicada al sureste de la península).

- Goetita ($\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$).

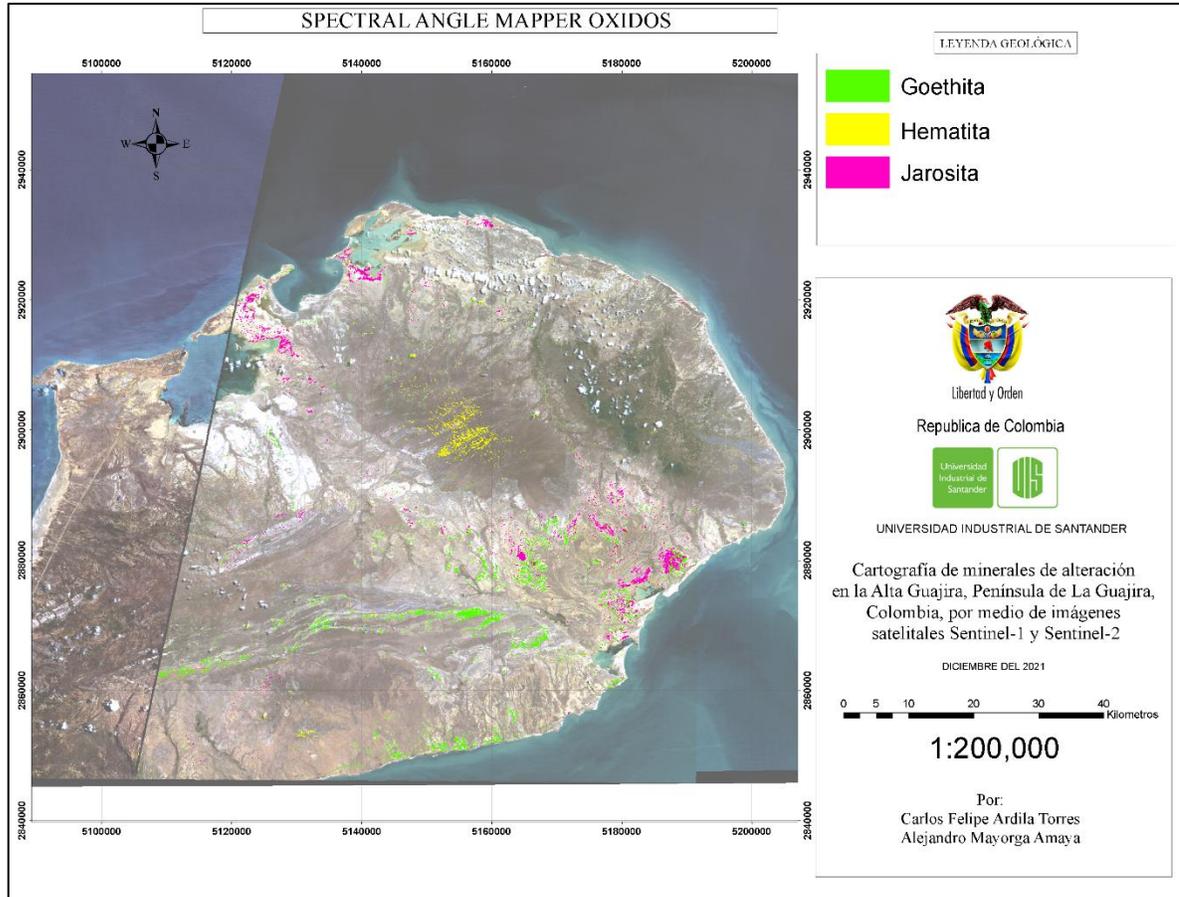
Mineral perteneciente al grupo de los hidróxidos, siendo este la representación mineral del hidróxido de hierro, fue el mineral con mayor respuesta en el SAM generado a los óxidos, este hace aparición en la Cuenca de Cocinetas, en zonas de la serranía de cocinas cercanas a la Falla de Cuisa y al sur de la península, en la fracción de la península perteneciente a Venezuela.

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA, PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

62

Figura 15

Mapa Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos



Se dio este enfoque debido a que los minerales seleccionados (jarosita y hematita) caracterizan el desarrollo de la oxidación de minerales como la pirita, la cual es estable en condiciones de pH bajos, pero a medida que se obtienen valores más altos empieza a tener un proceso de alteración a jarosita, si las condiciones de pH ascienden y las condiciones del ambiente son favorables, esta jarosita puede alterar a goethita, también fue seleccionada la hematita debido a que esta representa la alteración de minerales con composiciones afines, pero en ambientes de pH más elevados (figura 16).

Figura 16

Mapa ideal de la estabilidad de las alteraciones de la pirita

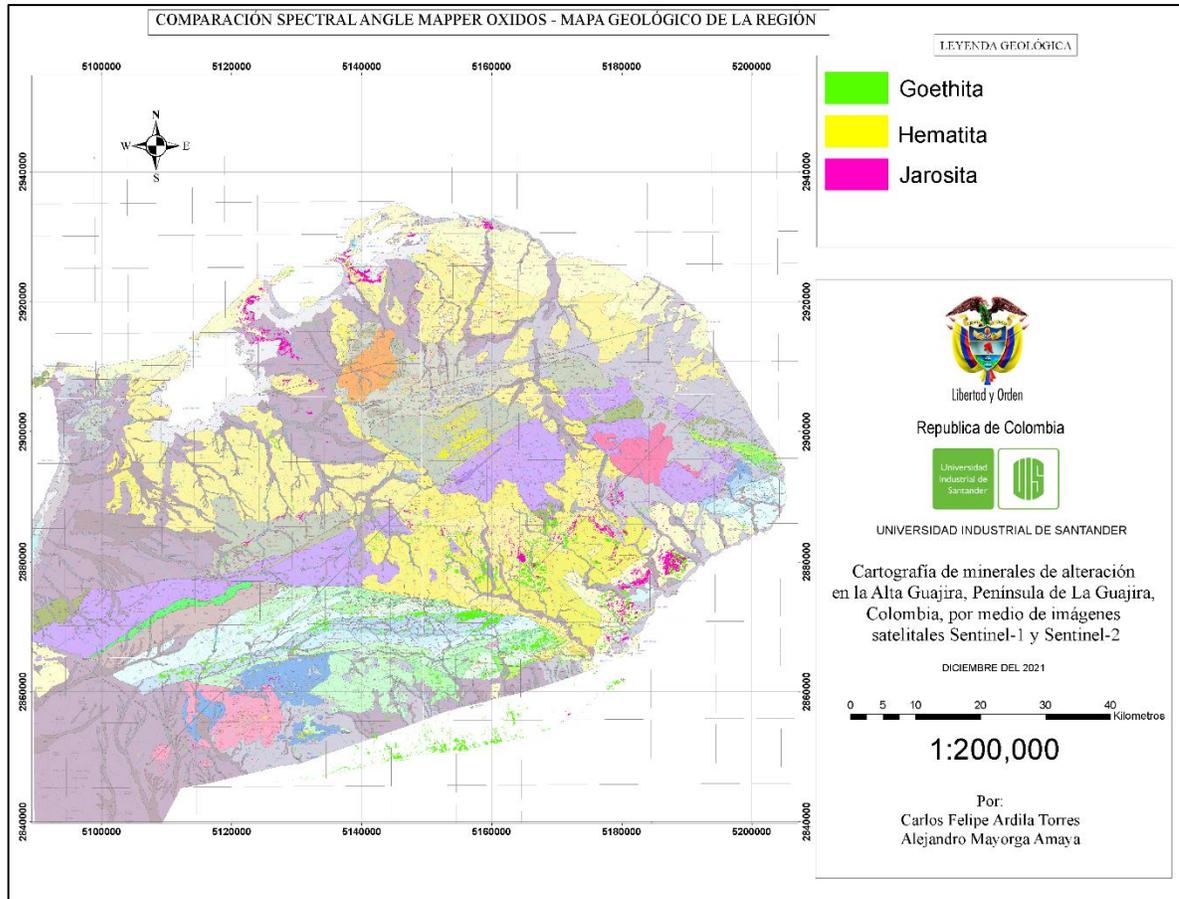


Nota: Mapa figurativo que representa la distribución ideal de las posibles alteraciones de la pirita y la hematita según las condiciones de pH tomado de Bedell (2020).

5.1.6 Comparación del grupo de los óxidos con el mapa geológico

Figura 17

Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS 2008).



- Hematita (Fe_2O_3)

Tras comparar los resultados del SAM con las planchas geológicas, se evidenció que la aparición de este mineral típico de ambientes reductores está ligada a la serranía de Jarara, y en menor medida, a la intrusión magmática del Eoceno conocida como la Cuarzodiorita de Parashi, en ambos casos su formación pudo tener las mismas condiciones: metamorfismo de

contacto, hidrotermalismo, también pudo presentarse como mineral accesorio de las rocas ígneas o meteorización de rocas ricas en hierro.

- Jarosita ($\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$).

Su aparición en la zona analizada se ve focalizada en las zonas de bahía honda y bahía hondita, también se evidencia su aparición en la cuenca de cocinetas, este mineral secundario se caracteriza por formarse en ambientes ácidos y áridos (Gázquez et al., 2014), por tanto, su formación se vería favorecida en la península, esta se pudo dar por la oxidación del hierro presente en los cuerpos como la Cuarzodiorita de Parashi hacia el norte y la serranía de Macuira al sureste.

- Goetita ($\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$).

Este mineral es el que mejor respuesta al método exhibe, lo cual era de esperar, debido a que es un mineral bastante común en la corteza terrestre (Villacís et al., 2015), el cual se forma por la meteorización de minerales ricos en hierro, es típico de ambientes oxidantes y es común verlo en litologías sedimentarias, tanto así, que en los resultados del estudio se vio una respuesta importante en las litologías sedimentarias del Paleógeno y Neógeno al norte de la Falla de Cuisa y en las litologías sedimentarias del Cretácico y Jurásico al sur de la misma.

Tabla 3

Resumen de los datos obtenidos en el mapa SAM del grupo de los óxidos organizados en orden de aparición (mayor aparición a menor aparición).

Nombre del mineral	Formula química	Litología asociada	Zona de aparición
--------------------	-----------------	--------------------	-------------------

Goethita	$(\alpha\text{-Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH}))$.	Litologías sedimentarias del Cretácico, Jurásico Paleógeno y Neógeno cercanos a la Falla de Cuisa	Zonas cercanas a la Falla de Cuisa
Jarosita	(Fe_2O_3)	Cuarzodiorita de Parashi, Formación Jarara	Bahía Honda, Bahía Hondita, y la cuenca de cocinetas
Hematita	$(\text{KFe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6)$.	Formación Jarara y la Cuarzodiorita de Parashi	Serranía de Jarara

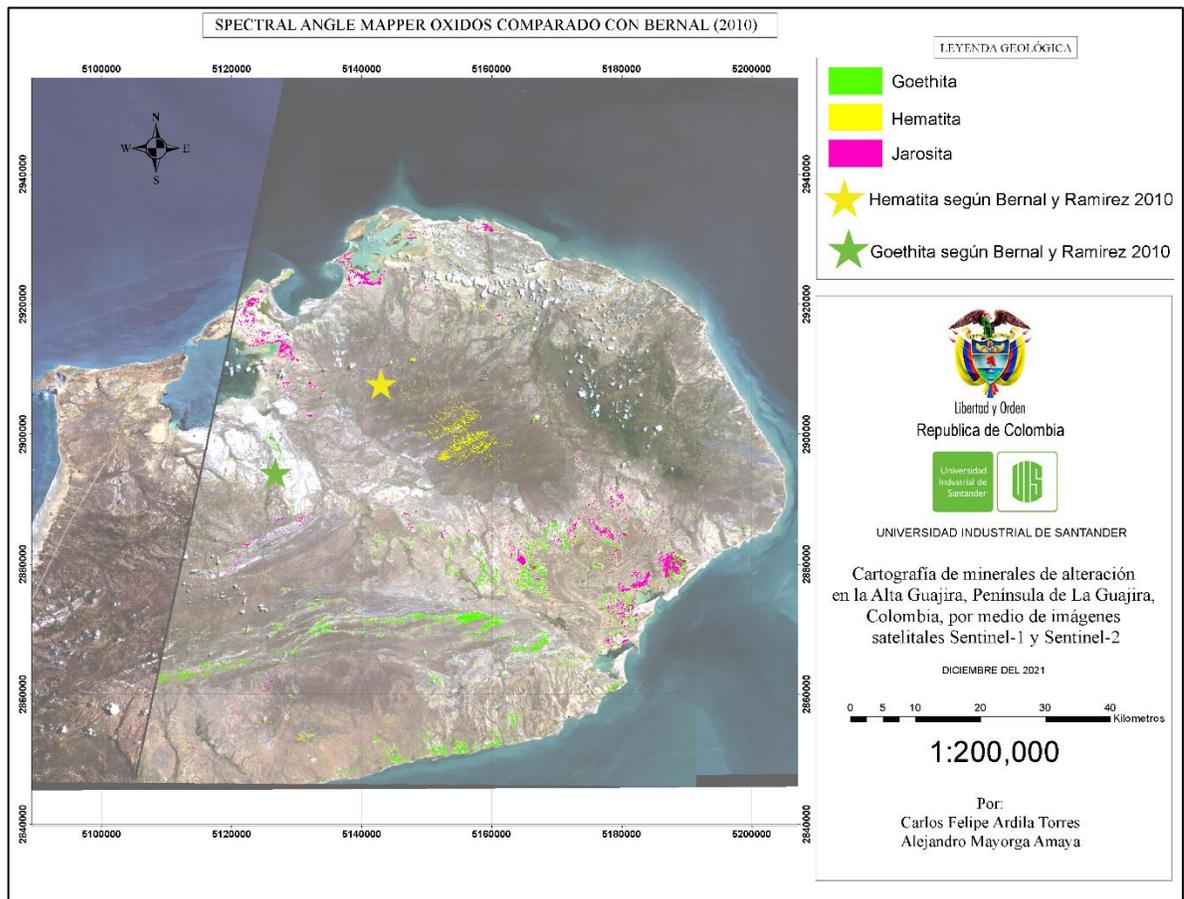
Nota. Tabla generada por los autores con el fin de resumir los resultados obtenidos en la investigación.

5.1.7 Comparación de los resultados del grupo de los óxidos con estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010)

En su estudio Bernal y Ramírez (2010) proponen: “la mayor densidad de ocurrencias de hematita se localiza al suroeste de la Cuarzodiorita de Parashi y las metasedimentitas de la Formación Etpana, en las inmediaciones de la serranía Jarara.” descripción que coincide con la respuesta de las firmas espectrales de esta, dado que, en el estudio la hematita se encuentra relacionada con la serranía de Jarara y el cuerpo intrusivo del Eoceno, lugares que coinciden con la ubicación dada por Bernal (figura 18) . En este estudio también se menciona: “la concentración de goethita se localiza en los depósitos aluviales del flanco norte de la Serranía de Simarúa” (Bernal y Ramírez, 2010), descripción que coincide geográficamente con una leve respuesta de la goethita.

Figura 18

Mapa comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).

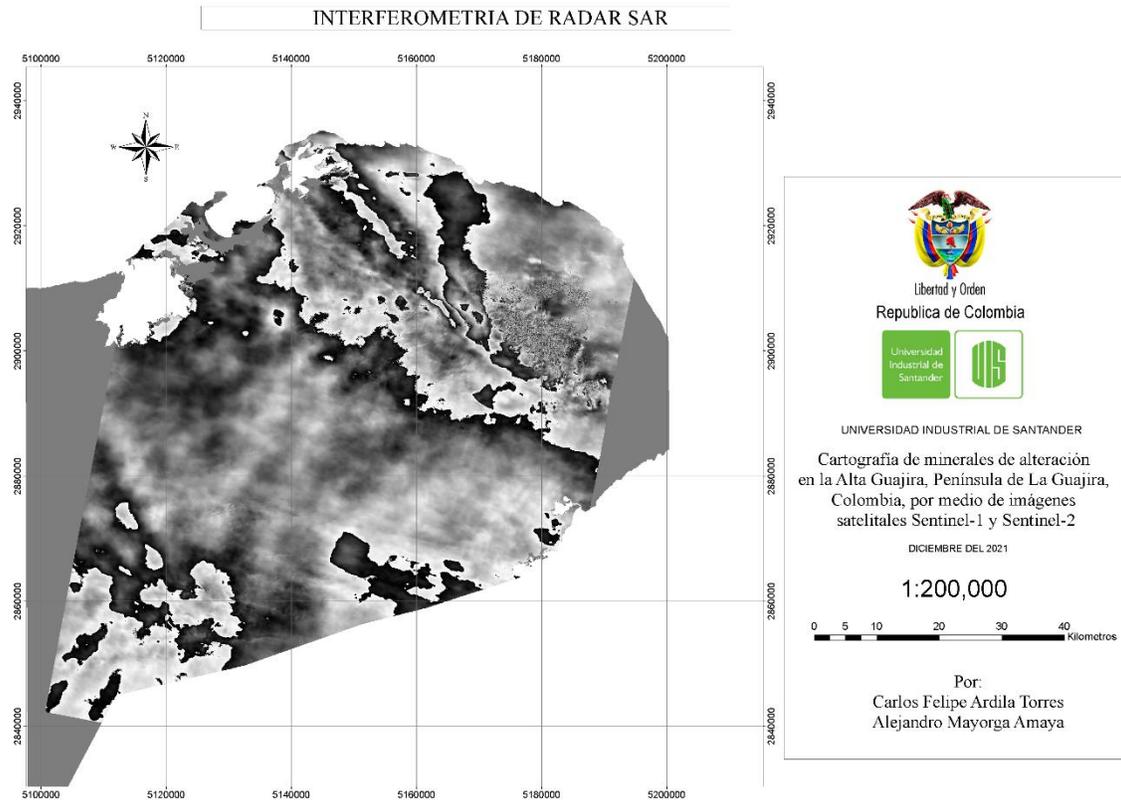


5.2 Modelo de interferometría para identificación de fallas

Mediante el tratamiento de dos imágenes de radar de apertura sintética, extraídas del satélite Sentinel-1 se generó una interferometría de radar (figura 19), buscando así la identificación de las diferentes fallas presentes en la zona teniendo en cuenta las superficies de desplazamiento en los bloques generado por esfuerzos tectónicos presentes en la corteza.

Figura 19

Mapa generado referente a la interferometría de radar SAR

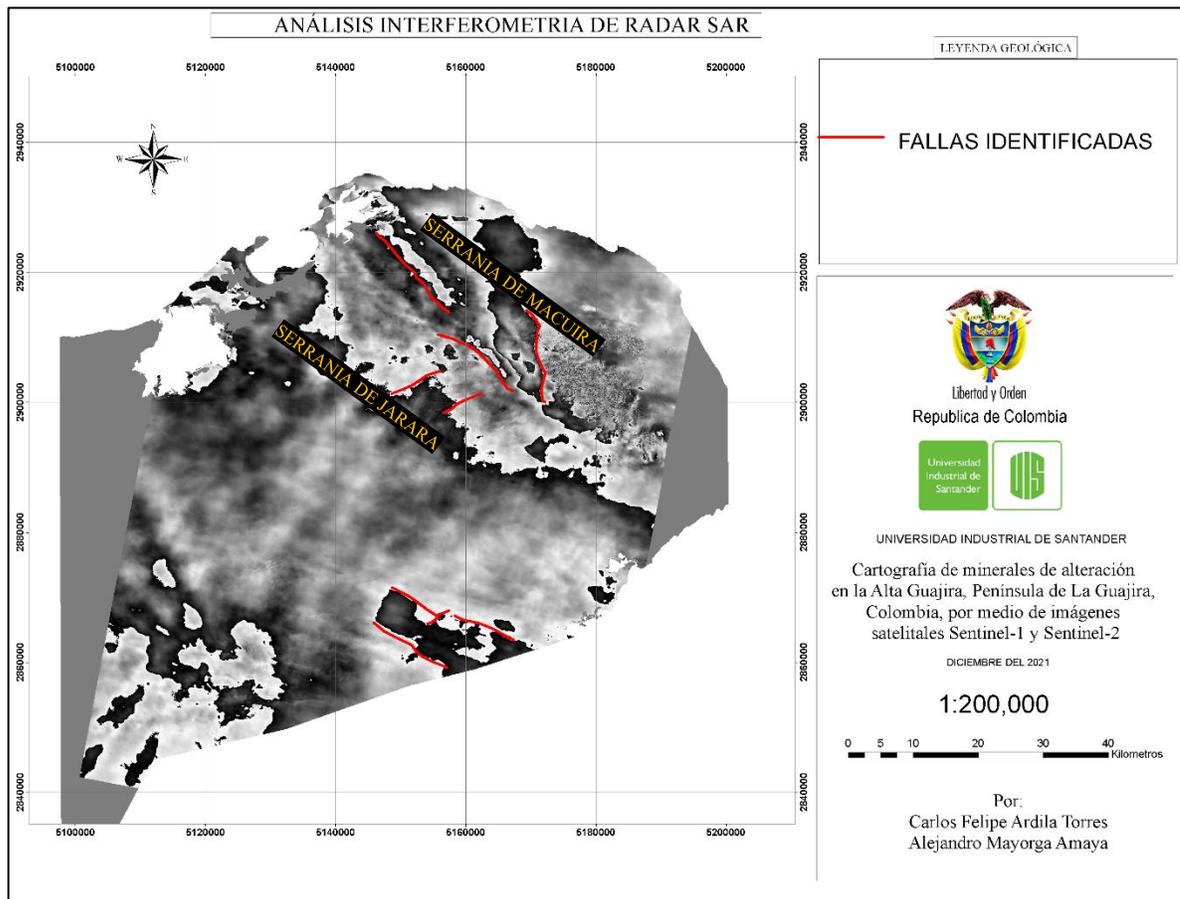


Este producto (figura 19) fue generado mediante el software *Sentinel-1 Toolbox* (SNAP), al resultado se le aplicaron correcciones como: la eliminación de la fase topográfica, *deburst*, *multi-looking*, *phase filtering* y *range-doppler terrain correction*, esto, con el fin de lograr una mejor interpretación de los datos obtenidos y evitar el ruido generado al correlacionar las dos imágenes de radar e imperfecciones de la interferometría generada.

5.2.1 Fallas identificadas en la interferometría de radar

Figura 20

Análisis e identificación de fallas realizados a la interferometría de radar SAR



- Fallas al norte:

A partir del análisis realizado, se pudo identificar un fallamiento evidente hacia el norte, que atraviesa la península de la alta guajira en sentido sureste o noroeste (figura 20), esta falla es reconocida por demás autores como la Falla Huimitarra, la cual en el grafico expuesto en la sección de marco Geológico por Aguilera (2011) es una falla de comportamiento Destral que delimita la Serranía de Macuira.

- Fallas en la Serranía de Jarara:

En las inmediaciones de la Serranía de Jarara se identificaron algunos lineamientos (figura 20), los cuales, al compararlos con la revisión bibliográfica, se definió su origen al levantamiento y acomodación de las serranías Macuira, Jarara y Cocinas que gracias a eventos orogénicos tuvo lugar en el Cenozoico (Vargas *et al.*,2012)

- Fallas al sur:

Por medio del análisis se identificó hacia el sur un fallamiento (figura 20), el cual es producto de la Falla de Cuisa, la cual junto a la Falla de Oca son fallas de tipo transcurrente según Nilsen & Sylvester (1999), de componente dextral y dirección este-oeste.

5.3 Asociación entre alteraciones minerales y eventos magmáticos

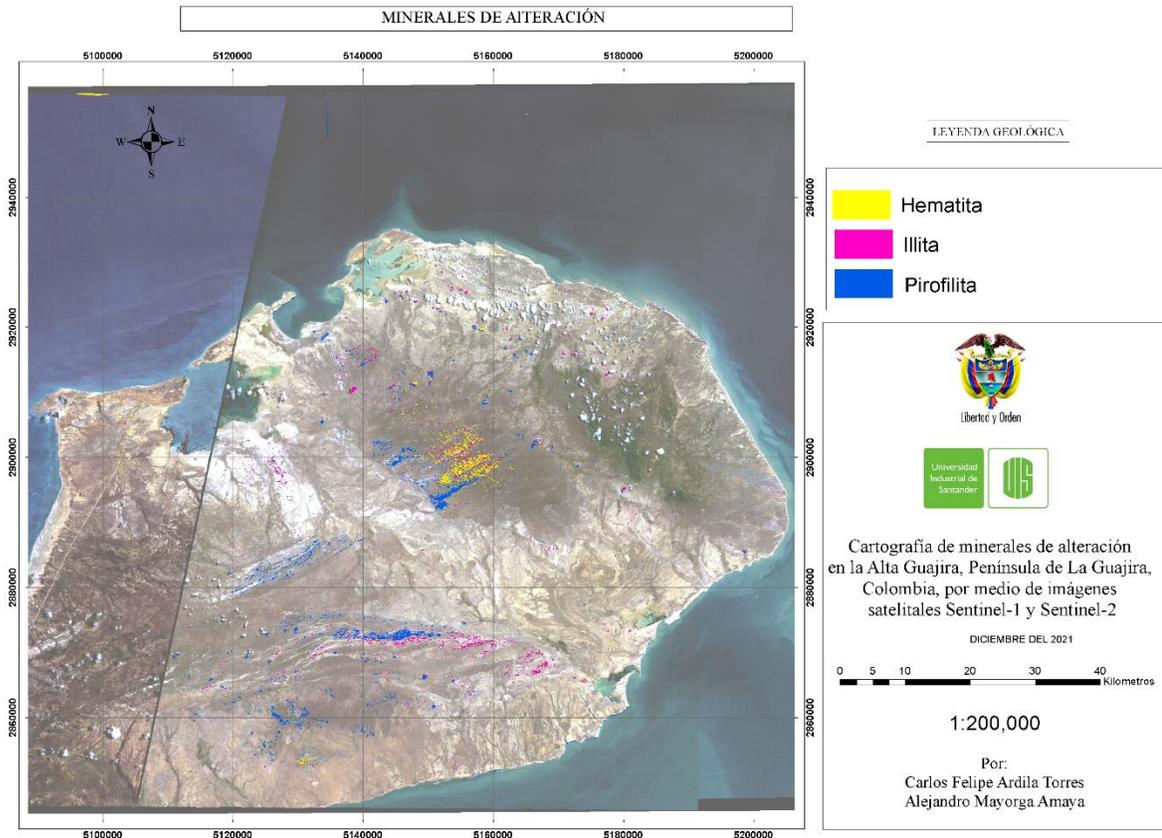
En base a los resultados previos obtenidos y la bibliografía consultada de Sabins (1999), se decidió la separación de 2 grupos minerales según su origen.

5.3.1 Minerales de alteración en La Alta Guajira

Tomando en cuenta lo expuesto por Sabins (1999), se tomaron los minerales de alteración como aquellos minerales del estudio los cuales su respuesta estuviera ligada mayormente a macizos rocosos, ya que estos son considerados como los minerales generados directamente por actividad hidrotermal, ya sea directamente generada por esta o por alteración de litologías preexistentes en la zona.

Figura 21

Minerales generados por alteración en La Alta Guajira



En el mapa de minerales de alteración de la Península de la Guajira (figura 21) se pueden ver las respuestas de los minerales: hematita, pirofilita e illita, los cuales tienen respuestas similares, relacionadas principalmente a los macizos de la Serranía de Jarara y la Serranía de Cocinas, siendo así, clasificados como minerales de alteración.

5.3.2 Minerales generados por meteorización en La Alta Guajira

A diferencia de los minerales de alteración, los minerales clasificados como generados por meteorización no se encuentran en los macizos rocosos, estos se encuentran en valles,

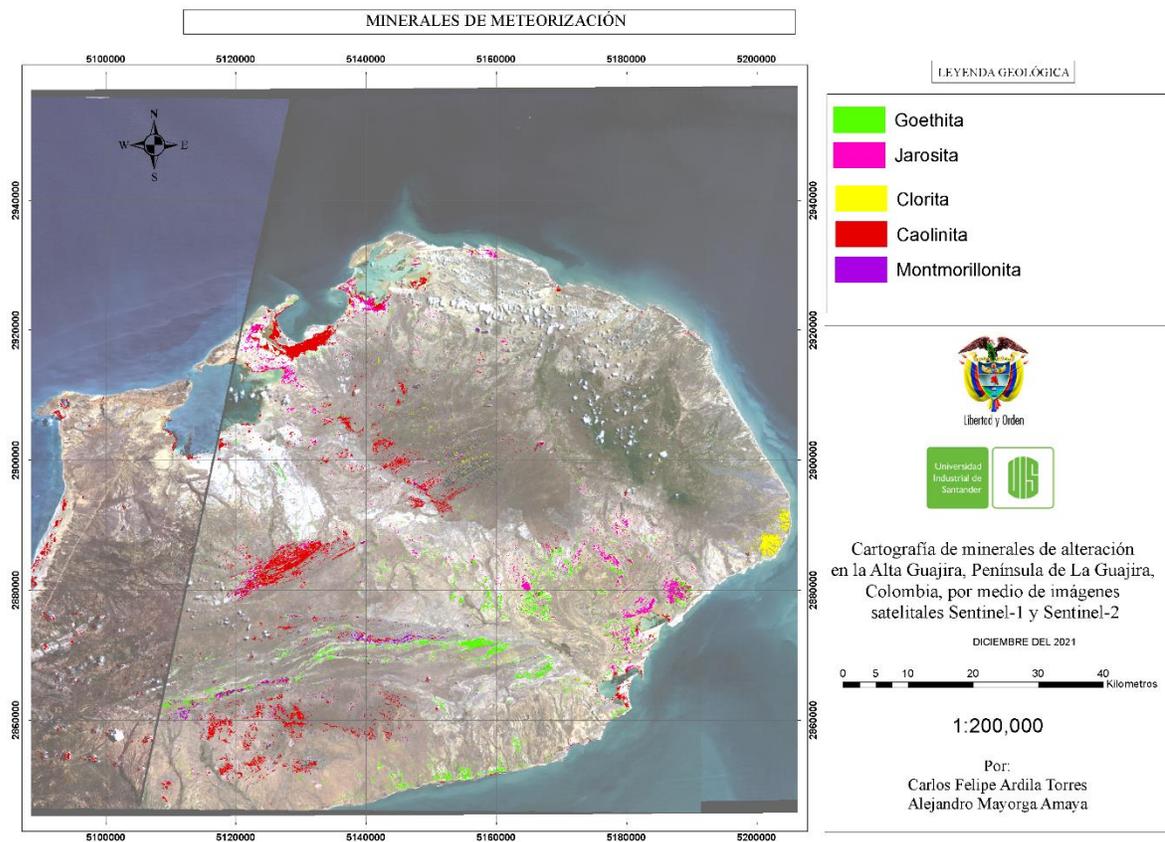
CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA, PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

72

zonas de poca altitud o zonas de falla, por lo cual su origen está ligado a las alteraciones, ya que estas facilitarían las condiciones mineralógicas para la formación de este tipo de minerales, pero estos no se depositaron en la ubicación geográfica en la cual estas tuvieron lugar.

Figura 22

Minerales generados por Meteorización en la Alta Guajira



En el mapa de minerales formados por meteorización (figura 22) se pueden apreciar las respuestas de la jarosita, caolinita, clorita, goethita y montmorillonita, las cuales, fueron clasificados en esta categoría debido a que su aparición no está tan ligada a los macizos principales, sino a zonas de menos altura aledaños a ellos.

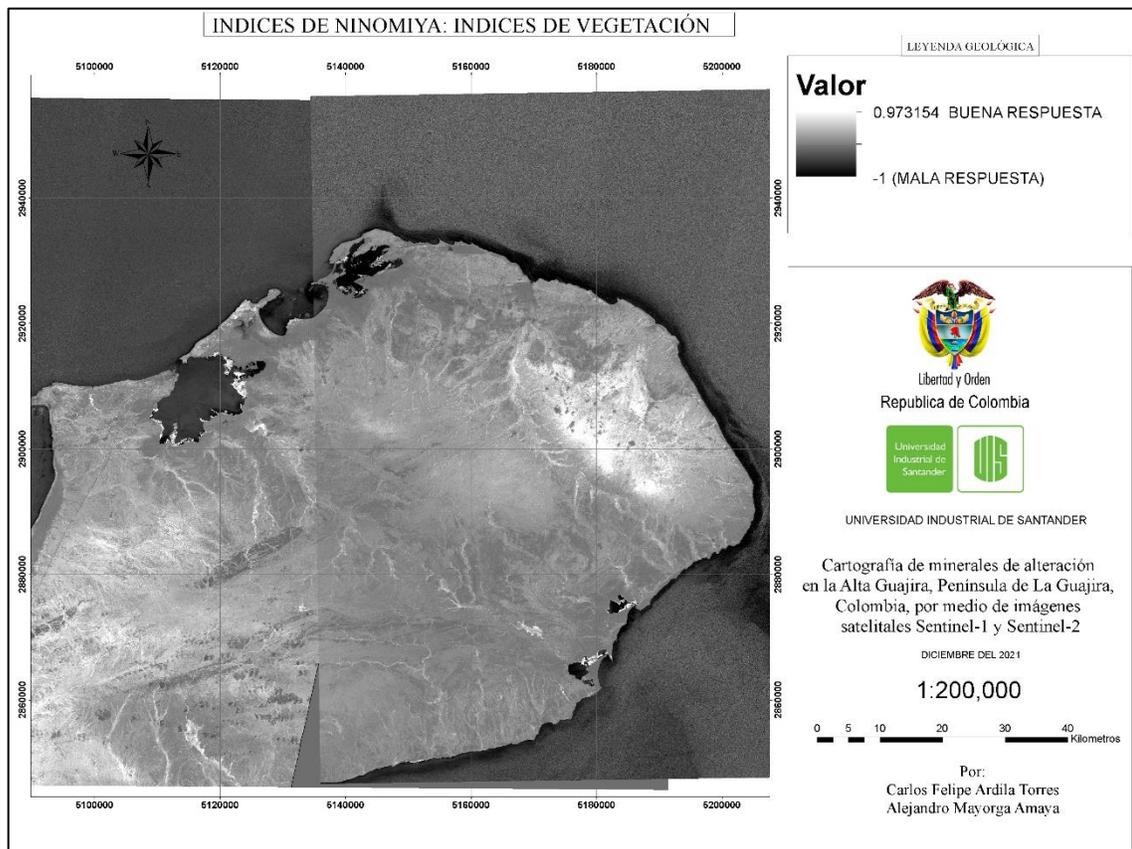
5.4 Anomalías minerales a partir de SWIR

5.4.1 Índices de Ninomiya: índices de vegetación

Se generó este índice de bandas (figura 21) con el fin identificar las zonas presentes en el área de estudio en las cuales se presente vegetación, esto, debido a que los sectores donde existe alta densidad de flora se excluyen a la hora de aplicar los métodos de teledetección propuestos, ya que estos originarán ruido o datos falsos que podrían alterar los resultados esperados, por tanto, es necesario para la investigación la discriminación de los píxeles con este tipo de información.

Figura 23

Mapa de los índices de Ninomiya referente a los índices de vegetación



CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

74

Nota, El mapa ilustra las zonas que poseen más o menos vegetación, las cuales las primeras están relacionadas a las coloraciones blancas y las segundas a coloraciones más oscuras.

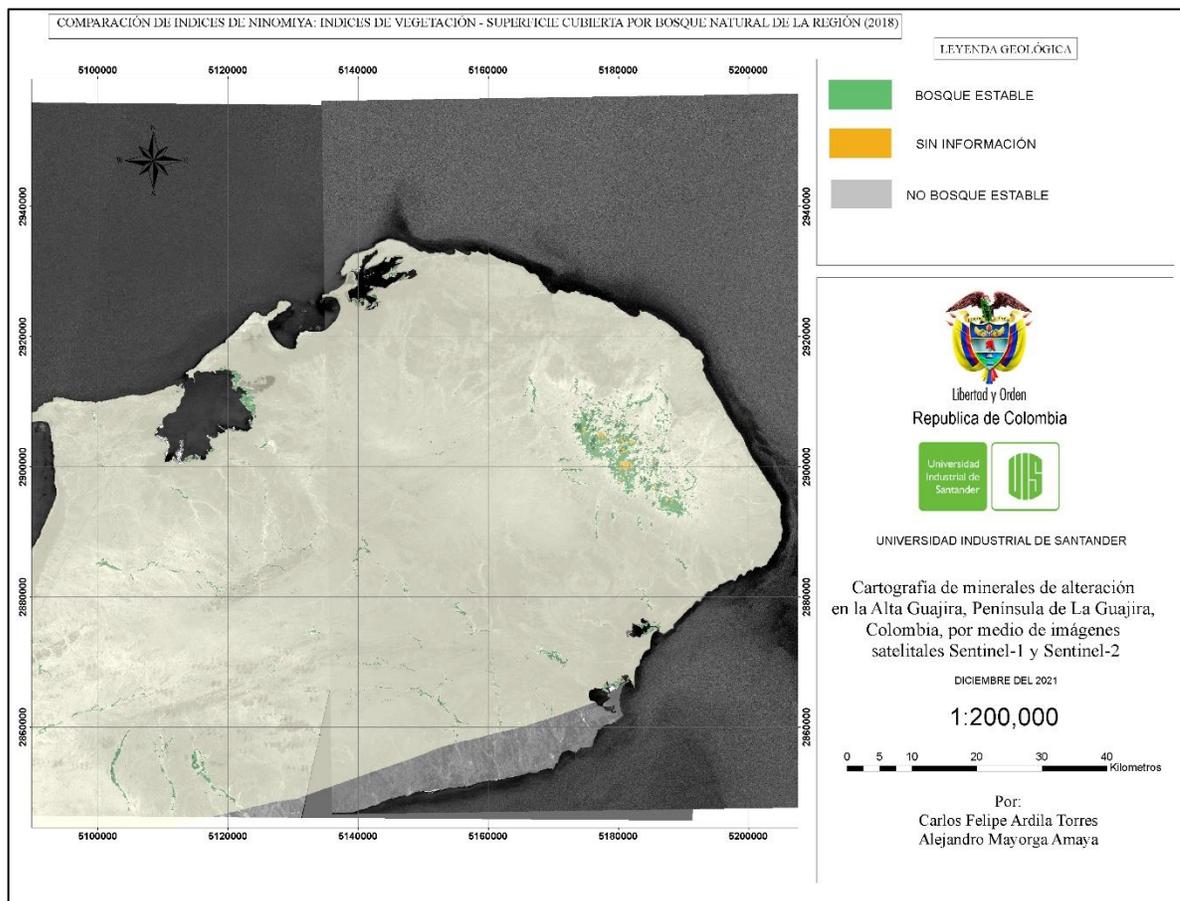
Al realizar el análisis del mapa generado (figura 21), se evidencia que la zona seleccionada es idónea para la ejecución de investigaciones de esta índole, ya que, al analizar la respuesta del método, se evidencia que la zona es notablemente árida, factor que no permite el crecimiento de la vegetación en gran parte de la zona de estudio, lo cual facilita los procesamientos y evita la pérdida de información al excluir datos de vegetación por sus índices espectrales.

5.4.2 Comparación de los índices de vegetación con Superficie cubierta por Bosque

Natural de la Región 2018 del IGAC

Figura 24

Mapa comparativo de Índices de Ninomiya: Índices de Vegetación - Superficie Cubierta por Bosque Natural de la Región IDEAM (2018)



En el mapa generado (figura 22) se evidencian ciertas zonas de respuesta importante, destacando la situada al noreste de la península de la Guajira, conocida como la Serranía de Macuira. En esta zona, según el Atlas ambiental del departamento de la Guajira se desarrollan vegetación de tipo bosque denso alto de tierra firme y bosque denso bajo de tierra firme, a

diferencia de las vegetaciones cercanas a esta que poseen arbustal abierto debido a intervención antrópica.

Otra zona por destacar es un pequeño sector entre la bahía Portete y bahía Honda, donde se distinguen zonas de arbustal denso según la clasificación del Atlas ambiental del departamento de la Guajira, que también presenta una respuesta favorable al índice, y, por tanto, una región en la cual se deben excluir estos tipos de píxeles para evitar afectaciones a los resultados de los procesos posteriores.

Esto se puede confirmar al realizar una comparación entre los resultados obtenidos y el mapa de Superficie Cubierta por Bosque Natural del IGAC (2018) (figura 22) el cual resalta las zonas mencionadas anteriormente, especialmente el área de la Serranía de Macuira donde se ve una concentración de Bosque estable, lo cual ratifica el hecho de excluir las respuestas que se generen a través del procesamiento en este perímetro.

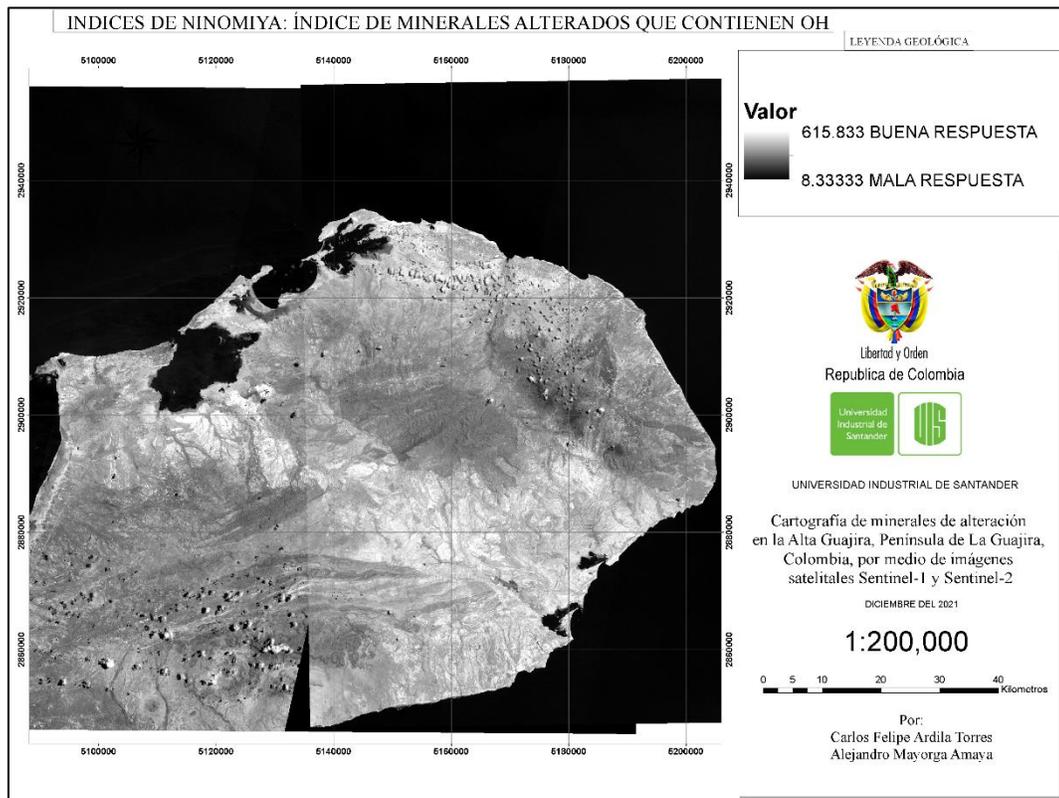
5.4.3 Índices de Ninomiya: índices de minerales alterados que contienen OH

Se generó este índice de bandas (figura 23) para identificar zonas donde se registre una buena respuesta a las firmas de minerales que contengan OH, esto debido a que en los otros métodos propuestos, los estudios fueron realizados alrededor de minerales con fórmulas químicas afines a estos elementos y es más probable encontrarlos en las regiones donde se demuestre una buena respuesta por parte de la matemática de bandas generada.

Figura 25

Mapa de los índices de Ninomiya referente a los índices de los minerales que contienen

OH



5.4.4 Índices de Ninomiya: minerales que contienen OH, comparación con el mapa geológico

En el resultado del procesamiento realizado (figura 24) se observan zonas con muy buena respuesta a las firmas de minerales que contienen OH, ubicadas mayormente entre las serranías existentes en la zona, las cuales son conocidas por tener múltiples eventos ígneo-metamórficos.

Los eventos magmáticos presentados en estas serranías enriquecieron la zona en minerales clave para que, múltiples factores como la meteorización, erosión, clima, etc. Pudiera dar

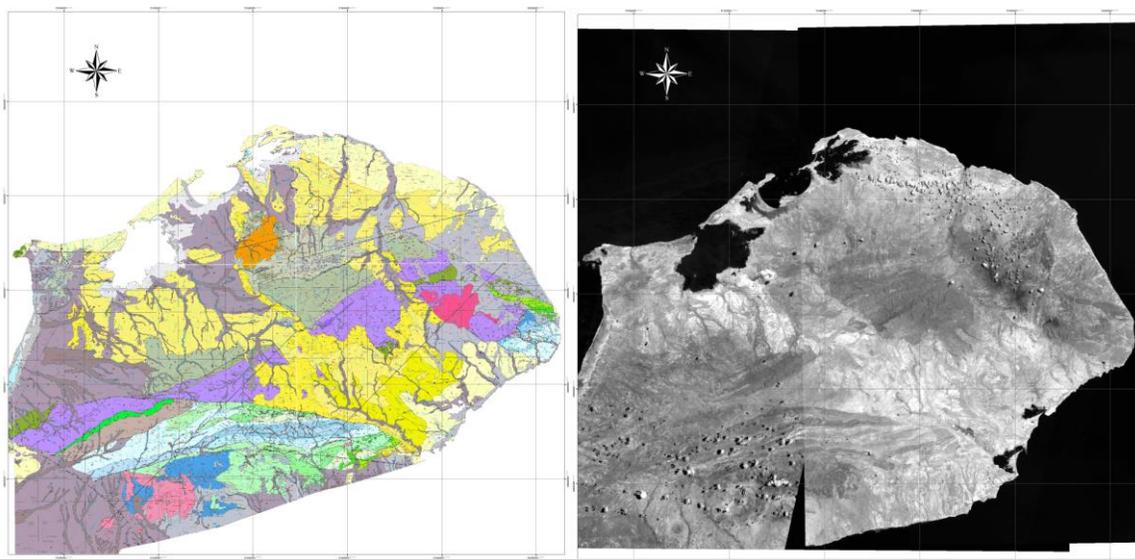
CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

78

paso a la alteración de estos nuevos minerales formados en estos eventos, y así formar los minerales con buena respuesta a la matemática de banda generada para estos índices espectrales.

Figura 26

Mapa comparativo entre la respuesta de los índices de Ninomiya de los índices de los minerales que contienen OH y el mapa geológico de la península. Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).



CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

80

Nota: Leyenda de la zona en la cual se evidencia, las distintas formaciones y por tanto edades presentes en el área de estudio, tomado de INGEOMINAS (2008)

Conclusiones

Los mapas elaborados en el presente estudio permitieron la identificación de concentraciones de algunos tipos de minerales de alteración presentes en diferentes zonas de la Alta Guajira, zona perteneciente a la península de la Guajira.

Se generaron un total de 5 mapas para el análisis completo de la zona, los cuales fueron desde mapas con procesos de matemática de bandas descritos por Ninomiya, hasta la caracterización de acumulaciones de minerales de alteración basándose en sus firmas espectrales, gracias a procesos como el *Spectral Angle Mapper*.

Los minerales del estudio evidenciaron diferentes respuestas a los métodos propuestos, la respuesta más fuerte fue la evidenciada por la caolinita, la cual se presentó en gran parte de la zona de estudio, mayormente relacionado al aporte mineral de unidades como la Cuarzodiorita de Parashi, la Formación Jarara o las Riodacitas de Ipapure, el segundo mineral con más aparición fue la illita, relacionada a la serranía de Jarara y la Formación Jarara, el tercer mineral con mayor aparición fue la pirofilita, la cual aparece en la zona de serranía de Jarara y más hacia el sur en la Formación rancho grande, como cemento de las rocas sedimentarias de la zona, también, en menor medida casos como el de la montmorillonita que estuvo mayormente relacionada a la serranía de cocinas y la teta, más hacia el suroeste de la península, y por último, los casos de la epidota o la alunita, que no tuvieron concentraciones importantes.

Por parte del grupo de los óxidos se evidenció una fuerte respuesta de la goethita, presente en las litologías sedimentarias del Paleógeno y Neógeno al norte de la Falla de Cuisa y en las litologías sedimentarias del Cretácico y Jurásico al sur de la misma, el segundo mineral con mayor aparición fue la jarosita, cuya presencia se dio en zonas como bahía honda, bahía hondita o en la cuenca de cocinetas, esto favorecido por la oxidación del hierro presente en los cuerpos como la Cuarzodiorita de Parashi hacia el norte y la serranía de Macuira al sureste, finalmente, la respuesta más baja fue la de la hematita, manifestándose en la zona de la serranía de Jarara y en la zona de intrusión magmática del Eoceno conocida como la Cuarzodiorita de Parashi, en ambos casos con concentraciones muy bajas.

Al comparar los resultados obtenidos con estudios actualizados (Bernal y Ramírez, 2010), se pudo comprobar que la mayor parte de la información obtenida en los procesos generados en la investigación fue concordante en la mayoría de los resultados. De su comparación con las planchas del mapa geológico (INGEOMINAS, 2008) se evidenció que las litologías presentes en las zonas donde se registró una respuesta de los minerales seleccionados van acorde a los tipos de roca y ambientes en las que estas podrían estar presentes.

A partir de los mapas generados por la matemática de bandas descrita por Ninomiya (2004) de NDVI se identificaron dos zonas con concentraciones importantes de vegetación: La Serranía de Macuira y un sector entre la bahía Portete y bahía Honda. También se analizaron los índices de minerales que contienen OH, se observaron zonas con muy buena respuesta ubicadas mayormente entre las serranías existentes en la zona, las cuales son conocidas por tener múltiples eventos ígneo-metamórficos.

A partir del análisis producido en la investigación se pudo comprobar que los eventos ígneos ocurridos en la península provocaron un impacto en la generación de minerales de alteración. Según el estudio, se destacan los cuerpos de: la Cuarzodiorita de Parashi, las Riodacitas de Ipapure, la Formación Etpana, la Formación Jarara y el Grupo Macuira, aportando estas las condiciones mineralógicas necesarias para la formación de minerales como la illita, la pirofilita y la hematita, los cuales fueron identificados como minerales de alteración, debido a que la respuesta al método de estos, se encuentra presente en las rocas generadas por estos eventos o en rocas alteradas preexistentes.

Por otra parte, los minerales como la clorita, el caolín, la montmorillonita, la goethita y la jarosita fueron clasificados como minerales generados por eventos de meteorización, debido a que la aparición de estos en los mapas del estudio se vio más relacionada a zonas de poca altitud presentes entre los macizos (valles), propio de los minerales generados por este tipo de procesos geológicos. La depositación y acumulación de estos minerales también se vio ligada a procesos tectónicos, debido a que se evidencian concentraciones significativas de estos paquetes minerales en fallas de la zona.

Por último, con la finalidad de complementar la información obtenida en la investigación, se analizó la interferometría de radar SAR generada en el trabajo, en la cual se pudieron identificar múltiples lineamientos y fallas presentes en la zona como la Falla de Cuisa, la Falla de Oca y la Falla Huimitarra.

Referencias Bibliográficas

Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., & Herrera, G. (2005). ¿Cómo medir deformaciones del terreno con teledetección radar?. España. https://www.isprs.org/proceedings/2005/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/T27.pdf

Azancot, Manuel & Urbani, Franco. (2008). Petrología de los cuerpos ígneo-metamórficos de la Península de la Guajira, isla de Toas y archipiélago de Los Monjes, estado Zulia y Dependencias Federales.

Bedell, R., Crósta, A. P., & Grunsky, E. (2020). Remote Sensing and Spectral Geology. Remote Sensing and Spectral Geology. Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/rev.16>

Bernal, A., & Ramirez, M. (2010). Identificación de minerales a partir del procesamiento digital de imágenes ASTER. Aplicaciones del programa satelital colombiano de observación de la tierra, 44(6), 105–115.

Burgl, H. (1960). Geología de la península de La Guajira. Boletín Geológico, 6(1-3), 117-163.

Gázquez, F., Rull, F., Calaforra, J. M., Venegas, G., Manrique, J. A., Sanz, A., Medina, J., Catalá-Espí, A., Sansano, A., Navarro, R., Forti, P., de Waele, J., & Martínez-Frías, J.

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

85

(2014). Mineralogical and geochemical characterization of hydrated minerals from subterranean environments: Implications for planetary exploration. *Estudios Geológicos*, 70(2). <https://doi.org/10.3989/egeol.41688.314>

Gupta, K., Mukhopadhyay, A., Giri, S., Chanda, A., Datta Majumdar, S., Samanta, S., Hazra, S. (2018). An index for discrimination of mangroves from non-mangroves using LANDSAT 8 OLI imagery. *MethodsX*, 5, 1129–1139. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2018.09.011>

Fal, S., Maanan, M., Baidder, L., & Rhinane, H. (2019). The contribution of Sentinel-2 satellite images for geological mapping in the south of Tafilalet Basin (Eastern Anti-Atlas, Morocco). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4/W12). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-75-2019>

Lopez, J., & Zuluaga, C. (2014). Neis de Macuira: Evolución tectónica de las rocas metamórficas paleozoicas de la Alta Guajira, Colombia. *Boletín De Geología*, 34(2).

L3harrisgeospatial. (s.f.). Minimum Noise Fraction Transform <https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/minimumnoisefractiontransform.html#:~:text=Loading%E2%80%A6Boardman%20and%20Kruse%2C%201994>

CARTOGRAFÍA DE MINERALES DE ALTERACIÓN EN LA ALTA GUAJIRA,
PENÍNSULA DE LA GUAJIRA, COLOMBIA, POR MEDIO DE IMÁGENES
SATELITALES SENTINEL-1 Y SENTINEL-2.

86

Martínez, L. F., & Zuluaga C, C. A. (2010). Thermal modeling of pluton emplacement and associated contact metamorphism: Parashi Stock emplacement in the Serrania de Jarara (Alta Guajira, Colombia). *Earth Sciences Research Journal*, 14(2).
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-6190201000020000

Pérez-Consuegra, N., Parra, M., Jaramillo, C., Silvestro, D., Echeverri, S., Montes, C., Jaramillo, J. M., & Escobar, J. (2018). Provenance analysis of the Pliocene Ware Formation in the Guajira Peninsula, northern Colombia: Paleodrainage implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 81. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.11.002>

Rajendran, S., & Nasir, S. (2017). Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. In *Ore Geology Reviews* (Vol. 88). <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.04.016>

Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14(3–4). [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)

Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). (s.f.). Sensores remotos. <https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>

THE EUROPEAN SPACE AGENCY. (2015, 17 junio). Sentinel 2. ESA. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2

Vargas, Carlos A., Montes, Luis A., & Ortega, Carlos. (2012). Geología estructural y estratigrafía del área Majayura (Guajira). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(140), 385-398. de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000300005&lng=e&tlng=es.

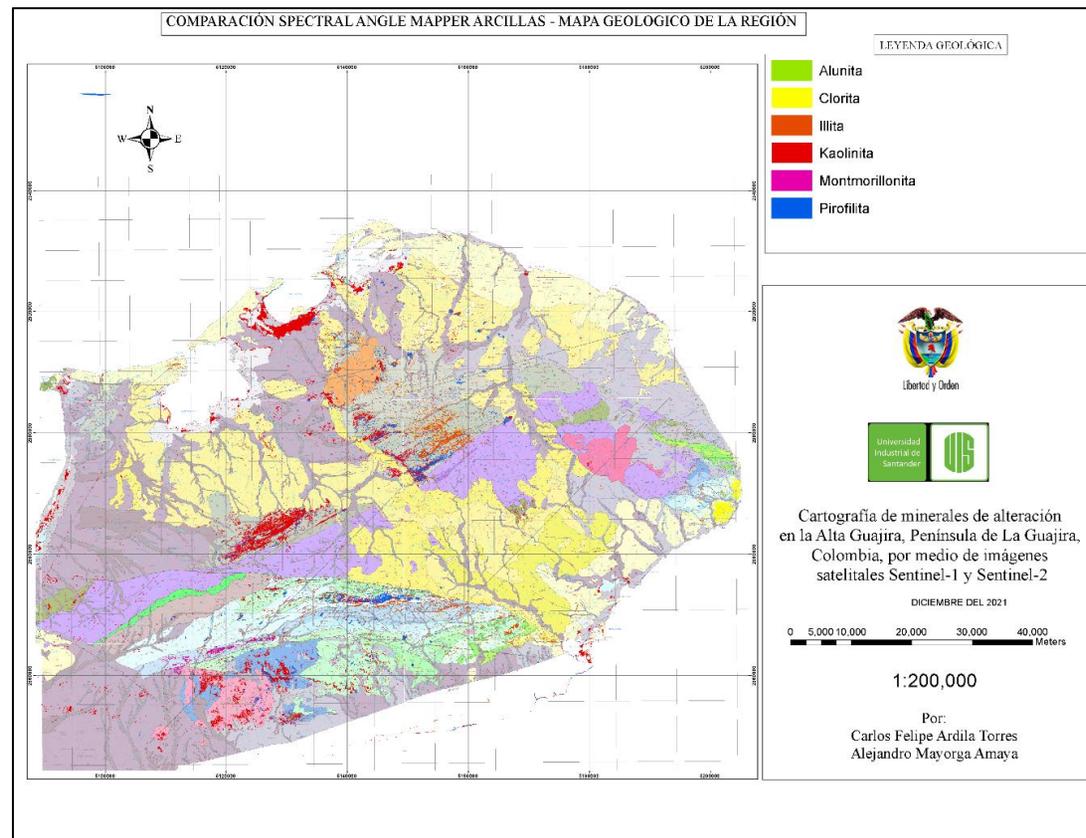
Villacís García, M., Ugalde Arzate, M., Vaca Escobar, K., Villalobos, M., Zanella, R., & Martínez Villegas, N. (Marzo 20, 2015). Laboratory synthesis of goethite and ferrihydrite of controlled particle sizes. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 67(3), 433–446. <https://doi.org/10.18268/bsgm2015v67n3a7>

Apéndices

Apéndices A

Mapa ampliado comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el mapa geológico de la península.

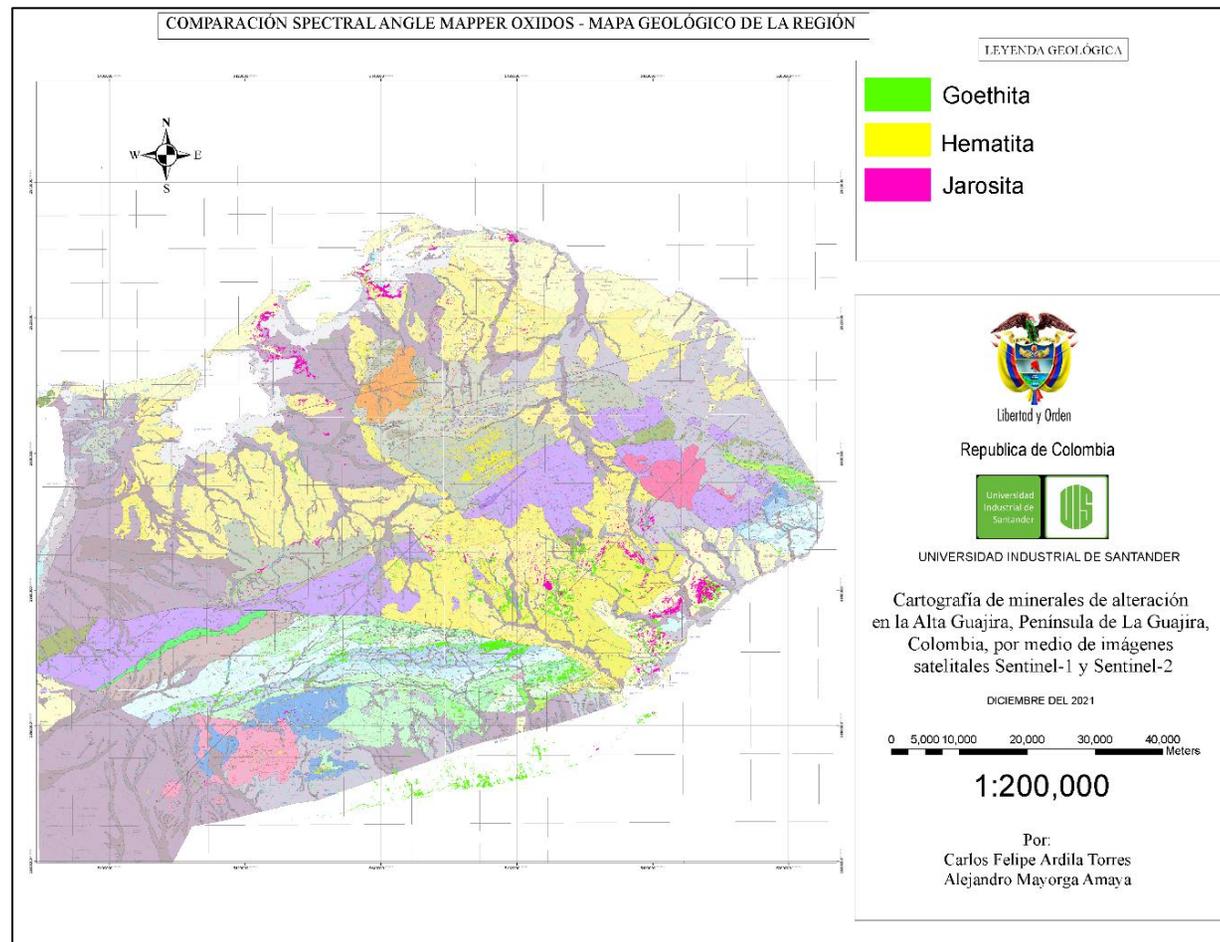
Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).



Apéndices B

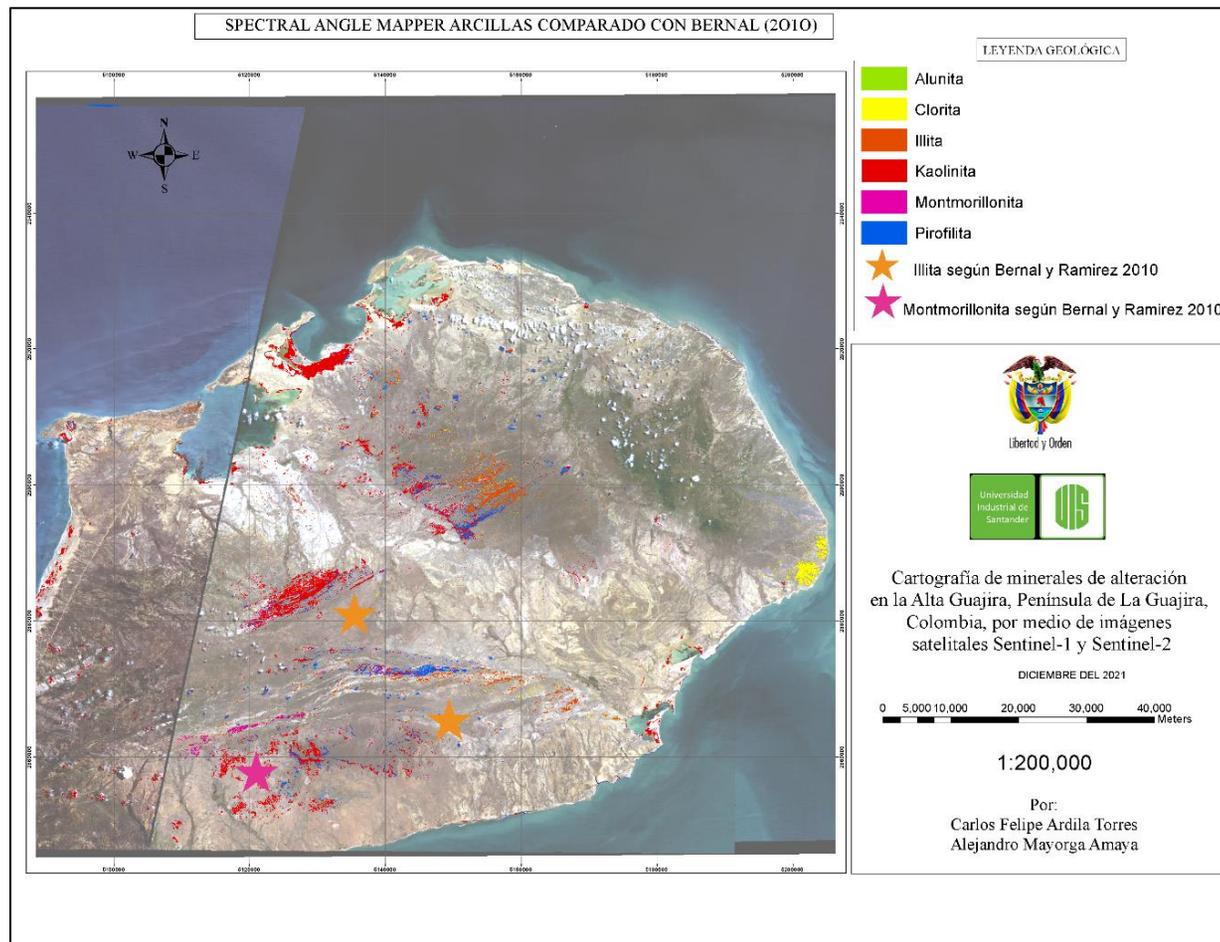
Mapa ampliado comparativo de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el mapa geológico de la península.

Mapa geológico base tomado de (INGEOMINAS, 2008).



Apéndices D

Mapa comparativo ampliado de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de las arcillas y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).



Apéndices E

Mapa comparativo ampliado de la respuesta del Spectral Angle Mapper del grupo de los óxidos y el estudio seleccionado (Bernal y Ramírez, 2010).

