MAPEO DE ESPECIES MINERALES ARCILLOSAS RESULTANTES DE MINERÍA DE ARCILLAS EN EL MUNICIPIO DE RÁQUIRA UTILIZANDO LA METODOLOGÍA MSAM Y PRODUCTOS SWIR

Autores

Nicolás Orjuela Albarracín

Uriel Fernando Cajamarca Céspedes

Director

Ing. José Luis Herrera Escorcia

Magister en Geografía

Codirectora

Ing. Martha Patricia Valbuena Gaona

Magister en Ciencias de la

Información y las comunicaciones

Universidad Distrital Francisco José De Caldas

Ingeniería Catastral y Geodesia

Bogotá D.C, Colombia

2024

Tabla de contenido

Tabla de contenido 2

1. Introducción 7

2. Objetivos 8

2.1. Objetivos específicos: 8

3. Estado del arte 9

4. Marco teórico 18

4.1. Minerales arcillosos 18

4.1.1. Arcillas 18

4.2. Percepción remota 21

4.2.1. Radiación electromagnética: 22

4.2.2. Espectro Electromagnético: 22

4.2.3. Firmas Espectrales: 24

4.2.4. **Tipos de Sensores:** 25

4.2.5. Resolución Espacial: 28

4.2.6. Resolución Espectral: 28

4.2.7. Resolución Radiométrica: 29

4.3. Algoritmo de procesamiento de imágenes satelitales 30

4.3.1. **Spectral Angle Mapper - SAM:** 32

4.4. Sensor hiperespectral 34

4.4.1. Sensor Prisma: 34

4.5. Red hidrográfica del municipio 36

4.5.1. **Hidrografía:** 36

5. Marco geológico 37

5.1. Descripción de formaciones 39

5.1.1. Formación Simití: 39

5.1.2. **Formación Churuvita:** 40

5.2. Sedimentación 40

6. Metodología 41

6.1. Recursos 41

6.1.1. Imagen Satelital 41

6.1.2. Firmas espectrales 43

6.1.3. División política Veredal Ráquira 43

6.2. Preprocesamiento 44

6.2.1. Corrección atmosférica: 44

6.2.2. Vapor de agua 46

6.2.3. Espesor óptico de los aerosoles 47

6.2.4. Espesor óptico de las nubes 48

6.2.5. Generación de reflectancia de la superficie 50

6.3. Procesamiento 50

7. Resultados 56

8. Discusión 66

8.1. Validación de datos 66

8.2. Limitaciones del estudio 72

8.3. SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES 74

9. CONCLUSIONES 76

10. BIBLIOGRAFÍA 78

11. Anexos 84

11.1. Mapa geológico del municipio de Ráquira 84

11.2. Mapa de Distribución de Caolinita 85

11.3. Mapa de Distribución de Illita-Esmectita 86

11.4. Mapa de Distribución de Pirofilita 87

11.5. Mapa de Distribución de Vermiculita 88

11.6. Mapa de Distribución de Moscovita 89

11.7. Mapa de Distribución de Montmorillonita 90

11.8. Mapa de Distribución de Dickita 91

11.9. Mapa de Distribución de Clorita 92

11.10. Glosario de acrónimos 93

Tabla de Ilustraciones

Figura 1: Diagrama de onda electromagnética. 22

Figura 2:Espectro electromagnético 23

Figura 3: Sensores activos. 26

Figura 4: Sensores Pasivos..... 27

Figura 5: Representación del ángulo de referencia..... 33

Figura 6: Formula para calcular Spectral Angle Mapper..... 33

Figura 7: Metodología Modificated Spectral Angle Mapper..... 34

Figura 8: Misión Satelital Prisma 35

Figura 9: Clasificación cuenca del río Ráquira..... 36

Figura 10: Mapa geológico del municipio de Ráquira..... 38

Figura 11: Leyenda mapa geológico del municipio de Ráquira 38

Figura 12: Imagen PRISMA 42

Figura 13: Firmas espectrales de minerales arcillosos..... 43

Figura 14: División política veredal Raquira..... 44

Figura 15: Corrección atmosférica imagen Prisma L2C..... 45

Figura 16: Longitudes de onda del espeso óptico de las nubes 49

Figura 17: Librerías Python 51

Figura 18: Firmas Espectrales Vermiculita..... 53

Figura 19: Composición de Bandas Vermiculita..... 54

Figura 20: MSAM ILLITA-ESMECTITA..... 56

Figura 21: Distribución de Caolinita..... 57
Figura 22: Distribución de Illita-Esmectita..... 58
Figura 23: Distribución de Pirofilita..... 60
Figura 24: Distribución de Vermiculita..... 61
Figura 25: Distribución de Moscovita..... 62
Figura 26: Distribución de Montmorillonita..... 63
Figura 27: Distribución de Dickita..... 64
Figura 28: Distribución de Clorita..... 65
Figura 29: Clasificación Supervisada..... 67
Figura 30:Mascara de suelo desnudo..... 67
Figura 31: Variabilidad de minerales arcillosos 2015-2023..... 69
Figura 32: Identificación de cuerpos de Agua..... 71

1. Introducción

La percepción remota es una técnica que posibilita la obtención de datos digitales sobre los objetos situados en el terreno sin necesidad de contacto directo. Esta interacción puede manifestarse como flujo energético del propio sensor o la reflexión solar sobre la superficie terrestre (Ramos,2020).

De este modo, esta técnica es fundamental para adquirir información sobre la composición, distribución y ubicación de elementos terrestres mediante procesos de reflexión, emisión o una combinación de ambas.

Así pues, la teledetección hiperespectral resulta ser una herramienta valiosa en cuanto a la determinación de minerales arcillosos presentes en el suelo, esto se debe a su capacidad de abarcar una amplia gama de longitudes de onda en el espectro electromagnético, lo que permite identificar patrones espectrales característicos de los minerales arcillosos (Urrestarazu ,2022). De acuerdo con lo expuesto, la exploración minera de arcillas en el municipio de Ráquira es una actividad recurrente y de significativo aporte tanto económico como cultural. En este sentido, resulta fundamental llevar a cabo una caracterización de los minerales arcillosos presentes en la zona de estudio, así como comprender los procesos que han conducido a la formación y el depósito de estos sedimentos en distintas áreas del municipio con el fin de contribuir a un conocimiento geológico de la zona de estudio, así como suministrar información útil que permita una mejor toma de decisiones en el ámbito socioeconómico y ambiental.

El presente documento inicio con una planificación y recopilación de información, obteniendo datos preliminares de fuentes bibliográficas y cartográficas de la zona de estudio. Posteriormente, se identificaron los principales minerales arcillosos presentes en la región,

resultantes de alteraciones de minerales arcillosos típicos de la zona, así como los minerales arcillosos comunes de Ráquira.

En segundo lugar, se obtuvo una imagen hiperespectral de la zona de estudio, proporcionada por la Agencia Espacial Italiana – ASI. Esta imagen permitió el uso de bandas del short wave infrared- SWIR del sensor, facilitando realizar la similitud espectral entre dos espectros mediante la metodología Modify Spectral Angle Mapper – MSAM, implementada con el software Python. Luego, se integró esta información en Sistemas de Información Geográfica - SIG para la elaboración de mapas detallados, que representan la distribución espacial de las especies minerales arcillosas en la zona, así como su abundancia.

Finalmente, se discutieron los resultados obtenidos en el contexto geológico y en el campo de la percepción remota, destacando la importancia de conocer los minerales arcillosos de la zona y señalando las principales limitaciones de la investigación.

2. Objetivos

Analizar y mapear las especies minerales arcillosas en el municipio de Ráquira mediante la técnica MSAM y productos del SWIR de imágenes hiperespectrales.

2.1. Objetivos específicos:

1. Identificar los principales minerales arcillosos existentes en el municipio de Ráquira.
2. Recopilar datos de firmas espectrales de los minerales arcillosos presentes en la zona provenientes de bases de datos.

3. Aplicar la metodología MSAM sobre imágenes hiperespectrales para obtener una clasificación de los minerales arcillosos, a partir de la coincidencia espectral.
4. Validar la significancia y relevancia de los datos preliminares presentados en documentos cartográficos y bibliográficos, así como en estudios previos con el fin de garantizar un correcto entendimiento del comportamiento de los minerales arcillosos presentes en la zona de estudio.

3. Estado del arte

A continuación, se listan algunos artículos relacionados con la metodología SAM:

Según **Bino et al (2022)** El uso de drones en entornos mineros es una forma de recopilar remotamente datos sobre el estado de un sitio en diversas industrias. Este documento propone un sistema combinado que utiliza una cámara de captura de imágenes multiespectrales de 6 bandas montada en un dron (Vehículo Aéreo No Tripulado, UAV), mapeo de ángulo espectral (SAM) y también inteligencia artificial (IA). Se capturaron datos multiespectrales a diferentes elevaciones de vuelo para encontrar la mejor altura desde la cual se pudiera identificar remotamente arenas de hierro con magnetita mediante el dron UAV especializado en recopilar información espectral con una precisión mínima de +/- 16 nm. Los datos fueron analizados mediante SAM para deducir los umbrales de similitud del coseno en cada elevación. Utilizando estos umbrales, se entrenaron y probaron algoritmos de IA especializados en clasificar datos de imágenes para encontrar el mejor modelo para clasificar arenas de hierro con magnetita. Considerando los registros de vuelo, la cobertura espacial de 338 m², una precisión de clasificación global del 99.7% y una precisión por clase del 99.4%, los resultados a una elevación de vuelo de 20 m presentaron los mejores índices de rendimiento en general. Por lo tanto, los resultados positivos de este estudio

sugieren la viabilidad del uso de esta tecnología en diversas prácticas de minería e ingeniería de minerales.

Según **Wang et al (2021)** el mapeo de minerales es un procedimiento crucial para el aprovechamiento de los recursos minerales y es especialmente significativo para el análisis de zonas de mineralización, en particular para los minerales alterados. La aparición de la teledetección, especialmente los datos hiperespectrales, se ha convertido en un nuevo enfoque para el mapeo de minerales a gran escala. Además, el mapeo de ángulo espectral (SAM) es un clasificador comúnmente utilizado para distinguir los minerales, pero su capacidad de discriminación es limitada en una escala de mapeo, y la precisión de identificación es baja para una serie de minerales con curvas espectrales similares cuando se aplica un solo clasificador. En este trabajo, se identificaron minerales alterados en el Distrito Minero Dehua-Youxi-Yongtai uniendo datos hiperespectrales terrestres y aéreos, y se construyó un modelo de entrenamiento triple de SAM con transformada wavelet (WSAM) para discriminar la categoría de 9 minerales alterados. Los resultados experimentales demuestran que la técnica propuesta proporciona una precisión de identificación del 82% y 70% para verificaciones virtuales y por difracción de rayos X (XRD), respectivamente, y el resultado del mapeo es confiable en comparación con las muestras medidas.

Según **Godoy et al (2017)** El Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) lleva a cabo el proyecto "Prospección de Zeolitas Sedimentarias en la República Argentina" mediante su Dirección de Recursos Geológico Mineros y la Unidad Sensores Remotos y SIG. En este trabajo se presentan los resultados del procesamiento de datos ASTER en la zona de Piedra Parada, Río Chubut Medio. Se utilizó el algoritmo Spectral Angle Mapper con patrones espectrales de clinoptilolita, heulandita, mordenita y analcima del USGS. A partir de un mapa de probabilidad

de ocurrencia, se realizaron trabajos de campo y recolección de muestras para determinar la distribución y composición de las zeolitas, validando la metodología de procesamiento de imágenes mediante difracción de rayos X (DRX). Las rocas zeolitizadas se componen principalmente de clinoptilolita y/o heulandita. Se midió la reflectancia con espectro radiómetro para ajustar la clasificación espectral y crear una base de datos espectral de zeolitas de Chubut. Los datos fueron integrados en un SIG, validando la metodología y permitiendo su uso en otras regiones de Argentina para ampliar la prospección.

Según **Chakravarty et al (2021)** explica cómo utilizar e implementar el método SAM para la categorización de imágenes satelitales. Las Imágenes Hiperespectrales (HI) proporcionan una variedad de espectros de píxeles que permiten visualizar y diferenciar elementos espectralmente similares pero distintos. Con el sensor HI, se capturan HI con múltiples bandas del espectro en el Satélite de Teledetección (RSS). Para implementar el Spectral Angle Mapper (SAM) en Imágenes Hiperespectrales, se realizan clasificaciones. Para observar mejor, se obtiene una composición de color falso de la imagen en diferentes superficies. En la implementación del SAM, las HI de varias bandas se organizan en un cubo tridimensional de imágenes. SAM es una técnica de clasificación supervisada que reconoce varias clases dentro de una imagen, permitiendo calcular el ángulo espectral. El ángulo espectral se determina utilizando el vector creado para cada píxel y el vector de referencia creado para cada clase de referencia seleccionada. Los resultados se obtienen combinando varios datos 2-D en datos 3-D con un cubo compacto y observándolos. Dado que se usa el vector de referencia para la clasificación SAM, se calcula el ángulo entre el vector de referencia y el vector del píxel para comparar con el valor umbral del ángulo. Luego, se usa la codificación de colores para distinguir entre las diversas

clases que reconoce el algoritmo SAM. Así, SAM se utiliza para analizar fotos hiperespectrales y extraer información temática como cuerpos de agua, cobertura terrestre y nubes.

Según **Gopinath et al (2020)** Las imágenes hiperespectrales se utilizan en diversos campos. El objetivo principal de este estudio fue emplear imágenes hiperespectrales de Hyperion junto con el Spectral Angle Mapper (SAM) y la Máquina de Soporte Vectorial (SVM) para discriminar las clases de uso y cobertura del suelo en el distrito de Kozhikode, Kerala, que presenta una combinación de diferentes características fisiográficas. Hyperion opera desde una plataforma espacial con niveles de señal de superficie modestos y una columna completa de atmósfera que influye en la señal, por lo que los datos obtenidos requieren un preprocesamiento cuidadoso para minimizar el ruido del sensor y la atmósfera. La corrección atmosférica utilizando el módulo FLAASH basado en MODTRAN y la reducción de dimensionalidad de los datos mediante Análisis de Componentes Principales (PCA) permitieron a Hyperion ofrecer valores de reflectancia discretos. Clasificadores avanzados como SAM y SVM pudieron describir el patrón y la distribución espacial de la cobertura del suelo. Según las evaluaciones de precisión, SVM mostró mejores resultados de clasificación que SAM, con una precisión general del 85.6% y un coeficiente kappa de 0.89. Este estudio sugiere que SVM puede ser utilizado para la clasificación de uso y cobertura del suelo de datos hiperespectrales con alta precisión.

Según **Meima et al (2020)** El objetivo principal es investigar las variaciones en la composición química/mineralógica de minerales complejos desde la escala submilimétrica hasta la métrica, ofreciendo nuevas oportunidades de interpretación para la exploración. El estudio se basa en mineral cromitita gruesa del Merensky Reef, representado por un núcleo de perforación y una pequeña sección a través de la capa superior de cromitita. Las mediciones detalladas

basadas en imágenes LIBS fueron acompañadas de mediciones de referencia resueltas en el espacio, basadas en SEM/MLA y EDXRF, además de análisis químicos de múltiples cortes del núcleo. El algoritmo SAM se aplicó para la clasificación de imágenes hiperespectrales LIBS con respecto a diferencias en la química mineral. Las investigaciones se centraron en el preprocesamiento de espectros LIBS antes de la clasificación SAM, en el desarrollo de una biblioteca espectral, y en la validación de los datos clasificados. Se encontró que el algoritmo SAM, basado únicamente en las relaciones entre intensidades espectrales, es insensible a variaciones de plasma de disparo a disparo y a efectos de matriz inducidos químicamente. Sin embargo, el algoritmo puede volverse inexacto en bajos ratios señal-ruido, en los bordes entre diferentes granos minerales (espectros mixtos), o al clasificar fases químicamente similares como pirita y pirrotita. La extensión de espectros mixtos depende del tamaño de los granos minerales y del tamaño del punto del láser LIBS.

Según **Woo et al (2021)** Las imágenes multiespectrales de alta resolución capturadas por drones (UAV) pueden proporcionar información valiosa para mapear áreas forestales recientemente quemadas. En este estudio, investigamos el uso de imágenes multiespectrales capturadas con un UAV para evaluar la severidad de los incendios en áreas afectadas por incendios forestales en Gumi-si, Corea del Sur. La clasificación de incendios se realizó utilizando dos algoritmos de aprendizaje supervisado: máxima verosimilitud (ML) y mapeo de ángulo espectral (SAM). Se emplearon tres índices espectrales: índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), NDVI del borde rojo (RE-NDVI) y el índice de vegetación de diferencia de banda visible (VDVI) para crear umbrales de severidad de quemado en los clasificadores ML y SAM. Los resultados indicaron que ML tiene una precisión general más alta (80–89%, coeficiente Kappa = 0.8) que SAM (44–52%, coeficiente Kappa ~0.27) en la

identificación de clases de severidad de incendio. El clasificador ML mostró mayor precisión para las clases de área no quemada y fuego de copas, mientras que el clasificador SAM mostró precisión moderada para todas las clases. La mayoría de los errores de clasificación se identificaron entre el área no quemada y el área con daños leves por calor. Esta investigación reveló que distinguir entre el área no quemada y el área con daños leves por calor es la tarea más desafiante en la clasificación de la severidad del fuego. Además, se requiere una investigación adicional para mejorar la precisión de la clasificación de la severidad del fuego a partir de imágenes multiespectrales.

Según **Zhou et al (2021)** Los métodos basados en clasificación para estimar parámetros de calidad del agua (WQP) mediante teledetección han mostrado un gran potencial en aguas interiores. En este estudio, realizamos la estimación del valor de Profundidad de Secchi (ZSD) en el área de Wuhan, basándonos en una tipología global del agua. Primero, clasificamos el agua en siete tipos utilizando datos de Sentinel-2. Este procedimiento se basó en el mapeo de ángulo espectral (SAM) de los 13 tipos ópticos de agua interior (IWOTs). Luego, resumimos los siete IWOTs en cuatro categorías para el área de Wuhan. Desarrollamos modelos empíricos para cada categoría de agua mediante regresión lineal múltiple escalonada, red neuronal de regresión generalizada (GRNN) y regresión de proceso gaussiano de espectro disperso (SSGPR), y aplicamos los mejores enfoques (GRNN y SSGPR) a tres imágenes satelitales completas (27 de octubre de 2018, 10 de mayo de 2019 y 29 de julio de 2019). Finalmente, los resultados obtenidos se validaron utilizando coincidencias in situ-satélite y se compararon con los resultados basados en imágenes no clasificadas. Con el error cuadrático medio (RMSE) de los tres resultados derivados de satélite reducido de 0.32 m (sin clasificación) a 0.16 m (con

clasificación), y el error porcentual absoluto medio (MAPE) reducido del 52% al 18%, del 0.51 m (MAPE = 57%) al 0.19 m (MAPE = 21%), y del 0.18 m (MAPE = 35%) al 0.09 m (MAPE = 17%), las estimaciones de ZSD sobre aguas ópticamente complejas mejoraron basándose en esta clasificación del agua. Debido a su bajo costo y facilidad de operación, la clasificación derivada del SAM aplicada en este estudio ofrece una posibilidad para el monitoreo dinámico y de alta precisión para la gestión del agua.

Según **Rasheed et al (2020)** Esta investigación se basa en la relación entre el espectro reflejado, la naturaleza de cada objetivo, el área y el porcentaje de su presencia con otros objetivos en la unidad del área objetivo. Se han detectado cambios en la cobertura del suelo durante diferentes años utilizando imágenes satelitales basadas en el procesamiento del Mapeador de Ángulo Espectral Modificado (MSAM), utilizando imágenes satelitales Landsat con dos programas de software (MATLAB 7.11 y ERDAS Imagine 2014). El método de clasificación supervisada propuesto (MSAM) utilizando un programa MATLAB junto con el método de clasificación supervisada (Máxima verosimilitud) de ERDAS Imagine se ha utilizado para obtener resultados más precisos y detectar cambios ambientales a lo largo del tiempo. A pesar de utilizar dos métodos de clasificación, los resultados del método sugerido (MSAM) han demostrado su superioridad, con precisiones de clasificación del 88%, 91% y 92% para los años 1986, 2000 y 2018, respectivamente. Los resultados indicaron que, durante las últimas tres décadas, el área de estudio ha experimentado muchos cambios artificiales y naturales, que han impactado en la cobertura del suelo, la vegetación y el entorno acuático. Los resultados muestran que estos pantanos sufrieron sequedad, escasez de vegetación y aumento del suelo aluvial durante el período 1986-2000, mientras que durante 2000-2018 hubo un aumento en el agua y la vegetación con una disminución del suelo aluvial.

Según **Çan et al (2020)** La planificación del uso del suelo es fundamental para los procesos de desarrollo sostenible y debe estructurarse en armonía con las restricciones geo ambientales. En este estudio, se determinó la detección de cambios en el uso del suelo en el área residencial de Denizli entre los años 1984 y 2018. En los análisis, se utilizaron imágenes Landsat-5TM y Landsat-8 OLI para 1984 y 2018, respectivamente. Se aplicaron correcciones geométricas, radiométricas y atmosféricas a las imágenes satelitales en la etapa de preprocesamiento. La detección de cambios en el uso del suelo se realizó utilizando el método de clasificación supervisada -Spectral Angle Mapper-. La precisión de las clasificaciones se evaluó mediante la índice kappa, que fue de 0.80 para la imagen de 1984 y 0.87 para la de 2018. Según los resultados, entre 1984 y 2018 se observó un aumento del 155% y 96% en las áreas construidas y forestales, mientras que se observaron disminuciones del 52% y 40% en la agricultura y el suelo desnudo, respectivamente. También se determinó que la mayoría de las áreas de asentamiento aumentaron en regiones cercanas a zonas de fallas activas. En consecuencia, las áreas construidas dentro de la zona de amortiguamiento de 500 m a las fallas activas aumentaron un 240% de 1984 a 2018.

En el curso de esta investigación, se ha evidenciado una notable escasez de antecedentes en el mapeo de minerales arcillosos en el municipio de Ráquira. A pesar de la riqueza geológica de la región, los estudios previos son limitados y, en muchos casos, la información disponible es desactualizada. Esta situación plantea un desafío, pero también una oportunidad para contribuir al conocimiento de la geología local y a la valoración de sus recursos minerales. A continuación, se listan algunos artículos relacionados con el mapeo de arcillas en Ráquira y en toda Colombia

Según **Gaviria et al (2013)** los minerales arcillosos que se encuentran en las lodolitas del Cretáceo Inferior en la región de Ráquira, Boyacá, Colombia, y cómo reflejan los procesos

termodinámicos que afectaron a las rocas durante su génesis y enterramiento. Los autores utilizaron diferentes técnicas de caracterización, como difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, fluorescencia de rayos X y análisis textural, para identificar y cuantificar los minerales arcillosos presentes en nueve muestras de lodolitas recolectadas en una sección estratigráfica. Se encontraron que las lodolitas de la parte superior de la secuencia (Formación Churuvita) están dominadas por caolinita y cuarzo, mientras que las de la parte inferior (Formación San Gil Superior) están dominadas por pirofilita y cuarzo. También observaron cambios en el grado de cristalinidad, la proporción de illita y esméctica, y la presencia de estructuras interestratificadas. Estas asociaciones mineralógicas indican condiciones de presión-temperatura altas, posiblemente debido a una diagénesis profunda o a un gradiente geotérmico anormalmente alto en la zona.

Según **Cespedes (2014).** La caracterización mineralógica, química y físico-cerámica de 12 muestras de arcillas procedentes de los municipios de Sogamoso, Ráquira y Cómbita, mediante técnicas como difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X, análisis térmico y ensayos de plasticidad, contracción, porosidad y resistencia mecánica. Se identificaron minerales como cuarzo, caolinita, pirofilita, montmorillonita y feldespato en las arcillas. Se seleccionaron ocho arcillas con propiedades adecuadas para ser utilizadas como componentes en formulaciones de pastas cerámicas tradicionales. Se observó un comportamiento térmico-dimensional estable y una coloración variada en las arcillas cocidas a 1165°C.

Según **Bonilla (2011)** la proveniencia y la transformación diagenética de los minerales arcillosos presentes en las unidades sedimentarias del Maastrichtiano - Paleoceno al norte de Bogotá, Colombia. Los autores utilizan técnicas de difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X e índice de cristalinidad para identificar y caracterizar los minerales arcillosos, tales como

caolinita, illita, esméctica, clorita y vermiculita. Los resultados revelan cambios en la fuente de los sedimentos, relacionados con el levantamiento de la ancestral Cordillera Central, y procesos de enterramiento que afectan el grado de ordenamiento y cristalinidad de los minerales arcillosos. El estudio aporta información relevante para la comprensión de la evolución geológica y paleo ambiental de la región.

Según **Camacho (2015)** el caso de estudio específico se centra en la aplicación de las Imágenes Hiperespectrales "HSI" en la geología colombiana. Para ello, se evalúa la capacidad de detección del sensor hiperespectral Hyperion, ubicado en el satélite EO-1. El área de prueba se encuentra al noroccidente del municipio de Girón, en el departamento de Santander. Los resultados obtenidos son altamente satisfactorios: el coeficiente de correlación espectral muestra una alta concordancia, y la relación espacial entre la firma espectral obtenida y la geología conocida del área es aceptable. Estos hallazgos se validaron mediante análisis de Difracción de Rayos X (DRX) en muestras tomadas del sitio de estudio.

4. Marco teórico

4.1. Minerales arcillosos

4.1.1. Arcillas

La arcilla es una sustancia que se origina de la descomposición de rocas que contienen feldespato, como el granito. Esta sustancia se caracteriza por ser un silicato de aluminio hidratado. En términos de su apariencia física, la arcilla puede presentar una variedad de colores que van desde el blanco hasta el rojo anaranjado, dependiendo de las impurezas que contiene.

Las arcillas se pueden clasificar en dos categorías principales, dependiendo de la disposición estructural de sus tetraedros y octaedros. Estas categorías son las arcillas 1:1 y las arcillas 2:1.

Las arcillas 1:1, como la caolinita, están compuestas por una capa tetraédrica y una capa octaédrica. En términos más técnicos, la estructura 1:1 está formada por la capa basal de tetraedros, un plano de Mg o Al, y un plano de OH(Ibañez,2006)

Por otro lado, las arcillas 2:1, que incluyen las ilitas, esmécticas, vermiculitas y cloritas, están compuestas por una capa tetraédrica, una capa octaédrica y una capa tetraédrica. En términos más técnicos, la estructura 2:1 se reduce a dos capas de tetraedros y un solo plano con los cationes Al y/o Mg. (Ibañez,2006)

Caolinita:

La caolinita es un mineral arcilloso blanco, suave y ligero, conocido por su plasticidad y pureza. Se compone principalmente de silicato de aluminio hidratado (Al2Si2O5(OH)4). Es un componente esencial de la porcelana y se utiliza en diversas aplicaciones como la fabricación de papel, cerámica, pinturas, cosméticos y productos farmacéuticos. (Deer, Howie & Zussman, 1992).

Clorita:

La clorita es un grupo de minerales arcillosos de color verde a negro, caracterizados por su estructura en capas y su composición química variable. Contiene silicio, aluminio, hierro, magnesio y otros elementos. Se utiliza principalmente en la industria cerámica, como absorbente en la agricultura y como aditivo en la fabricación de pinturas y plásticos. (Bailey, 1988).

Dickita:

La dickita es un mineral arcilloso blanco, similar a la caolinita, pero con una estructura cristalina diferente. Se compone de silicato de aluminio hidratado ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) y se encuentra en rocas sedimentarias y metamórficas. Se utiliza principalmente en la fabricación de cerámica y refractarios. (Deer, Howie & Zussman, 1992).

Montmorillonita:

La montmorillonita es un mineral arcilloso de color verde o marrón, conocido por su alta capacidad de absorción de agua e hinchamiento. Se compone principalmente de silicato de aluminio hidratado $(Na,Ca)_{0.33}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$) y se utiliza en diversos productos como la fabricación de bentonita, pinturas, detergentes y productos farmacéuticos. (Grim, 1968).

Moscovita:

La moscovita es un mineral del grupo de las micas, de color blanco o transparente, con una estructura laminar y exfoliable. Se compone principalmente de silicato de aluminio y potasio ($KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$). Se utiliza en la industria eléctrica, electrónica y cerámica. (Deer, Howie & Zussman, 1962).

Pirofilita:

La pirofilita es un mineral arcilloso blanco o gris, similar a la talca, con una estructura en capas. Se compone principalmente de silicato de aluminio hidratado ($Al_2Si_4O_{10}(OH)_2$) y se utiliza en la fabricación de refractarios, cerámica y productos de talco. (Deer, Howie & Zussman, 1992).

Vermiculita:

La vermiculita es un mineral arcilloso de color marrón o dorado, conocido por su exfoliación en láminas flexibles y su capacidad de absorción de agua. Se componeprincipalmente de silicato de aluminio y magnesio hidratado (Mg, Fe, Al)3(Si, Al)4O10(OH)2·4H2O) y se utiliza en diversos productos como la horticultura, aislamiento térmico y construcción. (Bailey, 1988).

4.2. Percepción remota

La percepción remota es una disciplina fundamental en el estudio y análisis de los recursos naturales y el medio ambiente. Al utilizar sensores montados en plataformas aéreas o espaciales, esta técnica permite adquirir información valiosa sobre la superficie terrestre sin necesidad de contacto físico directo. "La percepción remota proporciona una perspectiva sinóptica y repetitiva de grandes áreas, lo que la convierte en una herramienta poderosa para el mapeo, monitoreo y gestión de los recursos naturales" (Lillesand et al., 2015). Es por ello que resulta esencial comprender los conceptos básicos y principios fundamentales de esta ciencia, ya que servirán como base para el desarrollo de este proyecto de investigación. A lo largo de las siguientes secciones, se abordarán temas clave como los fundamentos de la percepción remota, las características de los sistemas sensores, las regiones espectrales de interés, las resoluciones de los datos, y los procesos de corrección y análisis de imágenes. Estos conocimientos teóricos sentarán las bases para la correcta interpretación y procesamiento de los datos de percepción remota, lo que permitirá obtener resultados confiables y útiles para el estudio en cuestión.

4.2.1. Radiación electromagnética:

La radiación electromagnética se define como la propagación de energía a través del espacio o de la materia en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas se producen mediante la oscilación de campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí.

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro." (2008, Serway & Jewett)

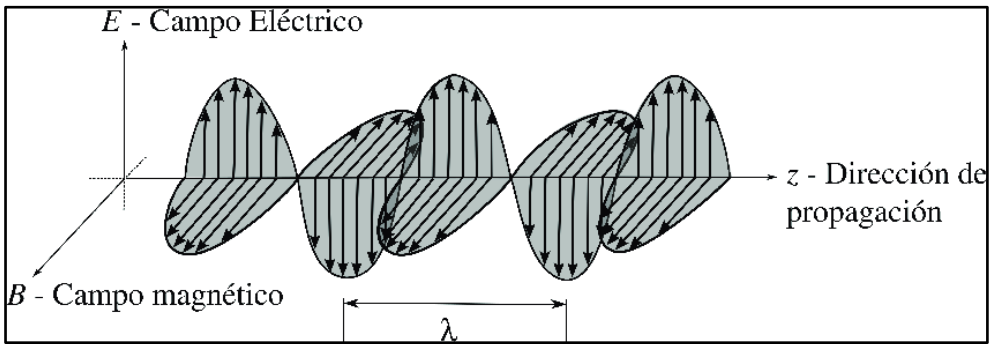


Figura 1: Diagrama de onda electromagnética.
***Fuente**:https://www.researchgate.net/figure/Figura-22-Diagrama-esquematico-de-una-onda-electromagnetica_fig1_317225835*

4.2.2. Espectro Electromagnético:

El espectro electromagnético se divide en varias regiones, cada una con propiedades características y aplicaciones específicas. Comenzando por las ondas de mayor longitud de onda, tenemos las ondas de radio, que incluyen las ondas de radio AM y FM, las ondas de televisión y las microondas utilizadas en telecomunicaciones y hornos microondas. Luego vienen las ondas

infrarrojas, que son invisibles para el ojo humano y se utilizan en aplicaciones como la detección de calor y la visión nocturna. (2004, Hewitt)

El espectro electromagnético es un concepto fundamental en física que describe la distribución de todas las ondas electromagnéticas según su longitud de onda o frecuencia. Abarca un rango increíblemente amplio, desde las ondas de radio de baja frecuencia hasta los rayos gamma de alta energía. Cada región del espectro tiene propiedades únicas y aplicaciones específicas en diferentes campos de la ciencia y la tecnología." (2009,Young & Freedman)

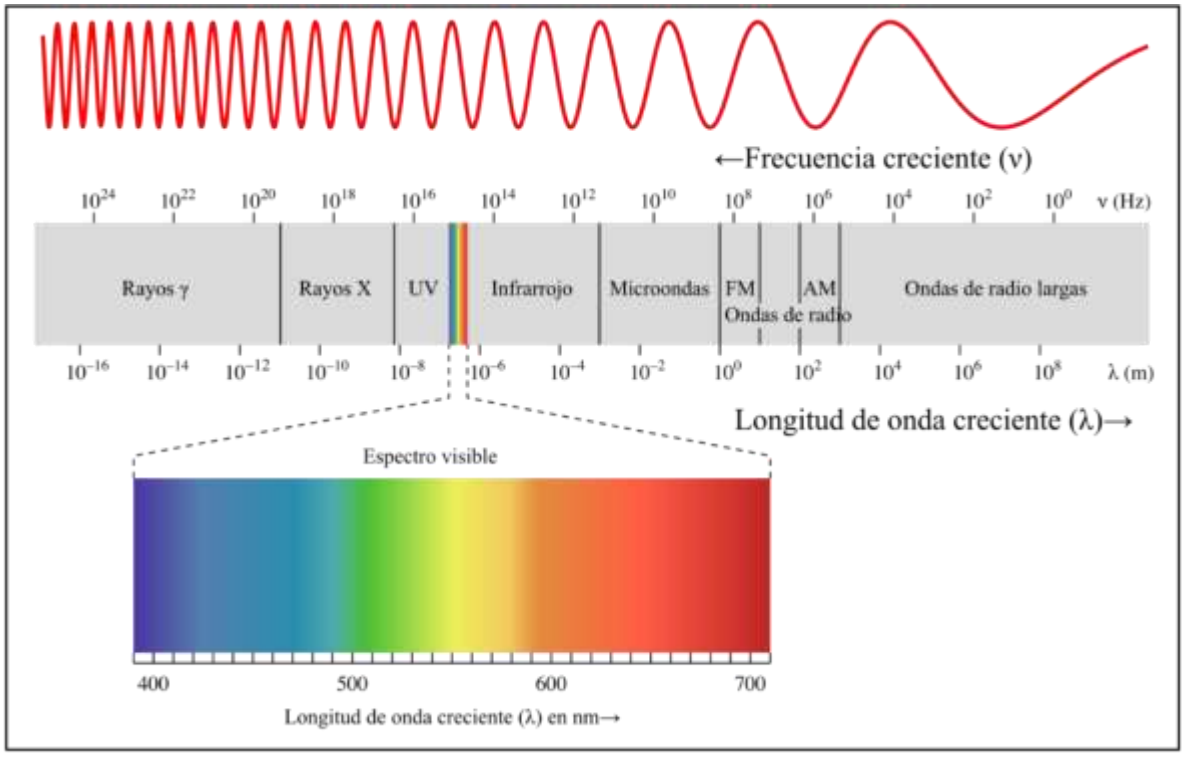


Figura 2:Espectro electromagnético
Fuente: *https://adrianredesdedatos.blogspot.com/2018/09/espectro-electromagnetico.html*

La región del infrarrojo de onda corta (SWIR, aproximadamente 1.3 a 3 μm) es sensible al contenido de humedad en la vegetación y el suelo, lo que la hace útil para estudios de estrés hídrico, contenido de humedad del suelo y discriminación de tipos de rocas. La región del

infrarrojo térmico (aproximadamente 3 a 15 μm) se utiliza para medir la radiación térmica emitida por los objetos, lo que permite determinar su temperatura superficial." (2011, Campbell & Wynne)

Las regiones de las microondas (aproximadamente 1 mm a 1 m) son particularmente útiles en la teledetección debido a su capacidad para penetrar las nubes y la lluvia, lo que las hace adecuadas para aplicaciones meteorológicas y de monitoreo de la superficie terrestre en condiciones climáticas adversas. Los sistemas de radar activos emiten y reciben señales de microondas para obtener información sobre la superficie y los objetos." (2007, Schowengerdt)

4.2.3. Firmas Espectrales:

Las firmas espectrales son patrones característicos de reflectancia o emisión de radiación electromagnética de diferentes materiales u objetos en función de la longitud de onda. Las firmas espectrales son fundamentales para identificar y discriminar diferentes tipos de cubiertas terrestres. A continuación, se explica con más detalle este concepto:

Una firma espectral es la representación gráfica de la respuesta espectral de un objeto u material a lo largo de las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético. Cada tipo de cubierta terrestre (agua, vegetación, suelo, roca, etc.) tiene una firma espectral única, lo que permite su identificación y discriminación en imágenes de teledetección." (2015, Lillesand et al)

Las firmas espectrales de la vegetación sana muestran una alta reflectancia en la región del infrarrojo cercano debido a la estructura celular de las hojas, y una baja reflectancia en la región visible debido a la absorción de la clorofila. Esta firma espectral característica permite distinguir fácilmente la vegetación de otros tipos de cubiertas. (2011,Campbell & Wynne)

Las firmas espectrales de los minerales y rocas varían según su composición química y estructura cristalina, lo que resulta en patrones de absorción y reflectancia únicos en diferentes regiones del espectro. Por ejemplo, las arcillas tienen una fuerte absorción en la región del infrarrojo de onda corta, mientras que los óxidos de hierro muestran una alta reflectancia en la región del visible. (1997, Sabins)

4.2.4. **Tipos de Sensores:**

Los sensores activos tienen una fuente de energía propia, como un radiotransmisor, que emite radiación electromagnética hacia los objetos de la superficie terrestre. Luego, miden la radiación reflejada o retro dispersada por esos objetos. Los sistemas de radar y lidar son ejemplos de sensores activos. (2015,Lillesand et al)

Una ventaja clave de los sensores activos es que no dependen de la iluminación solar, por lo que pueden adquirir datos durante el día o la noche. Además, su propia fuente de energía les permite penetrar a través de nubes y niebla, lo que los hace útiles en condiciones atmosféricas adversas. (2011, Campbell & Wynne)

Los radares de apertura sintética (SAR) son sensores activos que operan en la región de las microondas del espectro electromagnético. Emiten pulsos de microondas y miden la energía reflejada por los objetos en la superficie, lo que permite generar imágenes de alta resolución independientemente de las condiciones de iluminación. (1997, Sabins)

"Los sistemas lidar (Light Detection and Ranging) son sensores activos que utilizan pulsos láser en el rango visible o infrarrojo cercano. Se utilizan para medir distancias y obtener

información tridimensional precisa sobre la topografía, la vegetación y otros objetos en la superficie terrestre." (2007, Schowengerdt)



Figura 3: Sensores activos.
Fuente: *https://geomatiksinfronteras.wordpress.com/percepcion-remota/*

Los sensores pasivos son aquellos que detectan la radiación electromagnética natural emitida o reflejada por los objetos en la superficie terrestre. No generan ninguna señal propia, sino que simplemente recogen la energía existente. Algunos detalles importantes sobre los sensores pasivos en teledetección



Figura 4: Sensores Pasivos.
Fuente: *https://geomatiksinfronteras.wordpress.com/percepcion-remota/*

Los sensores pasivos miden la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos en la superficie de la Tierra. Operan detectando la radiación solar reflejada en las regiones visibles e infrarrojas del espectro, así como la radiación térmica emitida por los objetos en la región infrarroja térmica. (2015,Lillesand et al)

Las cámaras fotográficas, los escáneres multiespectrales y los radiómetros son ejemplos de sensores pasivos. Detectan la radiación electromagnética en diferentes regiones del espectro, como el visible, infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta e infrarrojo térmico. (2011,Campbell & Wynne)

Los sensores pasivos en el rango óptico (visible e infrarrojo) sólo pueden operar durante el día y en condiciones de cielo despejado, ya que dependen de la radiación solar reflejada. En cambio, los sensores pasivos en el rango de las microondas pueden operar de día y de noche, y bajo la mayoría de las condiciones atmosféricas. (1997, Sabins)

Una ventaja de los sensores pasivos es que no requieren una fuente de energía propia, lo que simplifica su diseño y reduce los costos. Sin embargo, su principal limitación es que

dependen de la disponibilidad de radiación electromagnética natural, ya sea solar o térmica. (2007, Schowengerdt)

4.2.5. Resolución Espacial:

El concepto de resolución espacial se refiere al objeto más pequeño que puede ser distinguido de forma separada en una imagen. En los sistemas fotográficos, se mide como la mínima separación a la que dos objetos aparecen claramente diferenciados y separados en la fotografía. Se expresa en unidades de longitud, ya sea milímetros en la imagen o metros sobre el terreno, y depende de la distancia focal de la cámara y de su altura sobre la superficie terrestre (1990, Chuvieco).

Por otro lado, en los sensores óptico-electrónicos, se prefiere utilizar el término "campo de visión instantáneo" (IFOV, por sus siglas en inglés). El IFOV se define como el ángulo sólido, medido en radianes, que el sensor observa en un instante determinado. Sin embargo, es más común expresarlo como la distancia en el terreno que corresponde a ese ángulo, teniendo en cuenta la altura de vuelo y la velocidad de barrido del sensor. En esencia, esta distancia representa el tamaño de la unidad mínima de información contenida en la imagen, conocida como píxel. Esta medida del tamaño del píxel es la forma más generalizada de expresar la resolución espacial (1990, Chuvieco).

4.2.6. Resolución Espectral:

La resolución espectral se refiere a la cantidad y el ancho de las bandas espectrales que un sensor es capaz de discriminar. Un sensor será más adecuado cuantas más bandas espectrales proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas terrestres. Además, es conveniente que esas bandas sean lo suficientemente estrechas para recoger la señal

en regiones específicas del espectro. Bandas demasiado amplias pueden registrar un valor promediado que oculte las diferencias espectrales entre cubiertas de interés (1990, Chuvieco).

Entre los sensores espaciales, los que tienen menor resolución espectral son los radares y los sistemas fotográficos. El radar normalmente trabaja en un solo canal, mientras que la fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo blanco y negro, color natural o infrarrojo color. Por el contrario, los sensores óptico-electrónicos ofrecen un amplio rango de bandas espectrales, aunque pueden presentar problemas para transmitir grandes cantidades de datos al aumentar el número de bandas (1990, Chuvieco).

4.2.7. Resolución Radiométrica:

La resolución radiométrica se refiere a la sensibilidad del sensor para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de los sistemas fotográficos, se indica por el número de niveles de gris que pueden ser registrados en la película. Para los sensores óptico-electrónicos, la imagen se presenta generalmente en formato digital, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. El número máximo de niveles digitales que puede representar la imagen se identifica como la resolución radiométrica del sensor. Este rango de codificación varía entre los diferentes sensores (1990, Chuvieco).

Cuanto mayor sea la precisión radiométrica, mejor se podrá interpretar la imagen. El número de niveles más adecuado depende del método de interpretación utilizado. Si la interpretación es visual, se debe considerar que el ojo humano difícilmente puede percibir más de 64 niveles de gris y no más de 200.000 tonalidades de color (1990, Chuvieco).

Según Lillesand et al. (2015), las imágenes multiespectrales son aquellas que capturan información en varias bandas espectrales discretas, generalmente entre 3 y 10 bandas. Estas

bandas están separadas en diferentes regiones del espectro electromagnético, como el visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Las imágenes multiespectrales son ampliamente utilizadas en aplicaciones como la cartografía de uso del suelo, la agricultura, la silvicultura, la hidrología y la geología. Algunos ejemplos de sensores multiespectrales son los instrumentos Landsat, SPOT y ASTER.

Lillesand et al. (2015) definen las imágenes hiperespectrales como aquellas que capturan información en cientos de bandas estrechas y contiguas a lo largo del espectro electromagnético. Estas imágenes proporcionan una firma espectral detallada de los materiales en la superficie terrestre, lo que permite una identificación y discriminación más precisa de diferentes tipos de objetos y materiales. Las imágenes hiperespectrales son útiles en aplicaciones como la detección de minerales, el monitoreo de la vegetación, el análisis de la calidad del agua, la detección de objetivos militares, entre otras. Algunos ejemplos de sensores hiperespectrales son el Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) y el Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO).

4.3. Algoritmo de procesamiento de imágenes satelitales

Uno de los tipos más comunes de algoritmos son los de clasificación, que se dividen en supervisados y no supervisados. "Los algoritmos de clasificación supervisada, como el de máxima verosimilitud, asignan píxeles a clases predefinidas utilizando muestras de entrenamiento" (Richards, 2013, p. 247). Por otro lado, "los algoritmos de clasificación no

supervisada, como K-means e ISODATA, agrupan píxeles en clases espectralmente similares sin conocimiento previo de las clases" (Tso y Mather, 2009, p. 289).

Otro tipo importante son los algoritmos de detección de cambios, que se utilizan para identificar variaciones en la superficie terrestre entre diferentes fechas. "Las técnicas de detección de cambios, como la diferencia de imágenes y el análisis de componentes principales, son esenciales para monitorear fenómenos dinámicos, como la deforestación y la urbanización" (Lu et al., 2004, p. 687).

Los algoritmos de pansharpening, como el método de componentes principales y el método de la transformada wavelet, se emplean para mejorar la resolución espacial de las imágenes multiespectrales mediante la fusión con una imagen pancromática de alta resolución. "El pansharpening es fundamental para aprovechar al máximo la información espectral y espacial de los datos de teledetección" (Vivone et al., 2015, p. 1).

En el contexto de este proyecto de clasificación de minerales arcillosos, el algoritmo SAM destaca por su capacidad para identificar materiales basándose en su firma espectral. "SAM es uno de los métodos más populares para el mapeo de materiales utilizando imágenes hiperespectrales, ya que utiliza la información espectral completa en lugar de simplemente la intensidad de la señal" (Kruse et al., 1993, p. 147). Además, el SAM es insensible a factores multiplicativos, como las condiciones de iluminación y las propiedades de ganancia del sensor, lo que lo hace robusto para el mapeo de materiales en imágenes adquiridas bajo diferentes condiciones.

Si bien existen otros algoritmos similares para la identificación de materiales, como el Matched Filtering y el Constrained Energy Minimization, SAM se destaca por su eficiencia

computacional y su capacidad para detectar firmas espectrales características de los minerales arcillosos en el rango infrarrojo. "Las arcillas exhiben fuertes bandas de absorción en el rango infrarrojo de onda corta debido a los modos de estiramiento y flexión de los enlaces OH y H2O" (Clark, 1999, p. 709), lo que hace que el SAM sea una elección adecuada para este proyecto.

4.3.1. **Spectral Angle Mapper - SAM:**

En un espacio espectral multidimensional de N dimensiones (también denominado espacio supe espectral), un vector de píxel X posee tanto magnitud (longitud) como un ángulo medido con respecto a los ejes que definen el sistema de coordenadas del espacio. En la técnica SAM, solo se utiliza la información angular para identificar los espectros de píxeles. Esta técnica se basa en la suposición de que un espectro de reflectancia observado es un vector en un espacio multidimensional, donde el número de dimensiones coincide con el número de bandas espectrales. SAM permite un mapeo rápido al calcular la similitud espectral entre los espectros de la imagen y los espectros de referencia. (2014, Rashmi)

Para comparar dos espectros, como el espectro de un píxel de la imagen y un espectro de referencia de una biblioteca, se definen vectores multidimensionales para cada espectro y se calcula el ángulo entre estos dos vectores. Los ángulos más pequeños representan coincidencias más cercanas al espectro de referencia. Si este ángulo es menor que un nivel de tolerancia dado, los espectros se consideran coincidentes, incluso si uno de ellos es mucho más brillante que el otro (más alejado del origen). Los píxeles que están más allá del umbral máximo de ángulo especificado no se clasifican. Este método es sencillo y rápido para mapear la similitud espectral de los espectros de la imagen con los espectros de referencia. SAM suprime la influencia de los efectos de sombreado para resaltar las características de reflectancia objetivo, por lo que se

considera un método de clasificación muy potente que funciona bien incluso en presencia de ruido de escala. Además, SAM es invariante ante escalados multiplicativos desconocidos y, en consecuencia, es resistente a desviaciones desconocidas que puedan surgir debido a diferentes condiciones de iluminación y orientación angular. (2014, Rashmi)

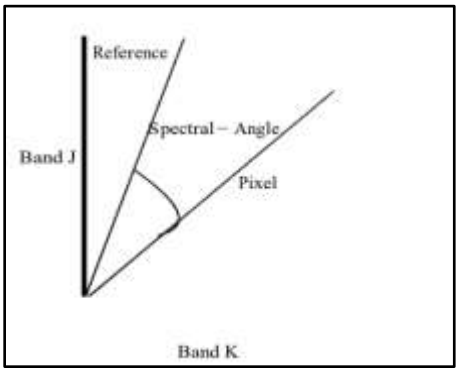


Figura 5: Representación del ángulo de referencia
Fuente: *https://www.ijiset.com/v1s4/IJISET_V1_I4_27.pdf*

El algoritmo SAM extiende esta interpretación geométrica al espacio n-dimensional. SAM evalúa la similitud entre dos vectores espectrales aplicando la siguiente ecuación:

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

Figura 6: Fórmula para calcular Spectral Angle Mapper
Fuente: *https://www.ijiset.com/v1s4/IJISET_V1_I4_27.pdf*

En donde nb es igual al número de bandas de la imagen, t es igual al valor del pixel espectro, r es el ángulo de referencia y alfa es igual al ángulo espectral

El método "Modified SAM" o "MSAM" se caracteriza por la implementación de un parámetro espectral innovador, denominado T'. Este parámetro T' se obtiene a partir de la

reflectancia espectral y la reflectancia promedio del espectro. En el proceso de cálculo del ángulo, MSAM determina el ángulo θ' entre los parámetros T1' y T2'. Por otro lado, el método SAM original calcula el ángulo θ entre T1 y T2. Como resultado de esta modificación, el ángulo espectral que se deriva del método MSAM tiene un rango que va de 0 a π. En el contexto de los minerales, este rango equivale a un intervalo de -1 a 1. Esta es una característica distintiva del método MSAM en comparación con el método SAM original. (Kodama & Yamaguchi, 2010), la relación de estos vectores se observa en la siguiente figura:

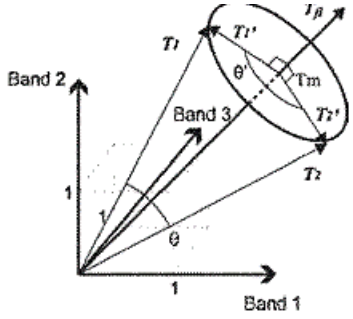


Figura 7: Metodología Modificated Spectral Angle Mapper
Fuente: *Kodama, S., & Yamaguchi, Y. (2010). Mapping of hydrothermally altered rocks using Modified Spectral Angle Mapper (MSAM) method and ASTER SWIR data*

4.4. Sensor hiperespectral

4.4.1. Sensor Prisma:

El sistema PRISMA incorpora un satélite que se encuentra en una órbita solar sincrónica LEO (órbita baja terrestre) adecuada y optimizada para cumplir con los objetivos de la misión. Estos objetivos incluyen la adquisición de datos, el tiempo de retrospección y la cobertura.

La captura de imágenes se llevará a cabo mediante un instrumento hiperespectral/pancromático instalado a bordo del satélite. Este satélite pertenece a la clase de tamaño pequeño y tiene una vida operativa de al menos 5 años.

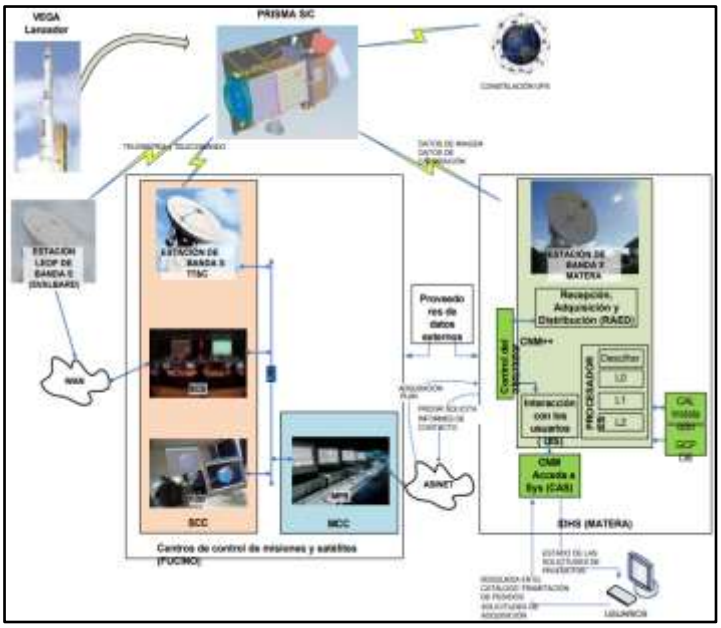


Figura 8: Misión Satelital Prisma

Fuente: *https://www.asi.it/wp-content/uploads/2021/11/PRISMA-Pre-feasibility-tool-manual.pdf*

PRISMA tiene las siguientes características principales:

- Adquisición de imágenes HYP/PAN en todo el mundo (prestaciones garantizadas sólo en la zona de interés principal, entre latitudes de -70 grados y 70 grados)
- Pedido y entrega de productos archivados HYP/PAN
- Barrido 30 km
- Longitud de onda de 400 a 2500 nm
- GSD: hiperespectral 30m, PAN 5m
- 239 bandas: 66 bandas VNIR, 173 bandas SWIR

4.5. Red hidrográfica del municipio

4.5.1. **Hidrografía:**

La cuenca principal de la zona de estudio es el río Ráquira, que forma parte de la cuenca hidrográfica del río Suárez, bajo la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Dicho afluente es clasificado como de tercer orden y, abarca una extensión de aproximadamente 19,918 ha, con alrededor del 78% de esta superficie localizada en el municipio de Ráquira (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2005).

Así entonces, las fuentes hídricas que confluyen al sistema del Río Ráquira son los ríos Dulce, río Salado, río La Candelaria y las quebradas Santa Ana, La Reja, Cucharero, Los arrayanes, La Calera, Los Alisos, Cañadas, Trompetal y Amarillos, lo cuál puede ser detallado en la siguiente figura:

NOMBRE DE LA CUENCA	CAUCE PRINCIPAL	CAUCES DE SEGUNDO NIVEL	CAUCES DE TERCER NIVEL	CAUCES DE CUARTO NIVEL	CAUCES DE QUINTO NIVEL
Río Ráquira	Río Ráquira	Río Salado (tributario)	Q. Salada	Río Dulce	Q. Amoladero
					Q. Zarra
				Q. Las Animas	
				Q. Chillón	
				Q. La Rochela	
				Q. Trompetal	
			Q. Pedro Viejo		
		Río Candelaria	Q. Torongua		
			Q. El Muello		
			Q. Los Moreno		
			Q. Guaracnita		
			Río Frita		
			Q. El Penco		
			Q. Gacheneca		
			Q. Los Buitres		
			Q. de Minas		
			Q. El Guarno		
			Q. El Bosque		
			Q. Chinguichangua		
		Río Sutamarchan	Q. la Providencia		
			Q. la Zambrana		
		Q. La Reja			
		Q. Cucharero	Q. Aranda	Q. Los cerezos	Q. Cortadera
		Q. Los Arrayanes			
		Q. La Calera			

Figura 9: Clasificación cuenca del río Ráquira

Fuente: *Elaboración de los estudios de diagnóstico prospectiva y formulación para la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suarez - CAR - 2005*

Desde el punto de vista geomorfológico, la cuenca se caracteriza por una topografía montañosa con pendientes que suelen superar los 30 grados de inclinación. Destacan filos con protuberancias topográficas, que exhiben pendientes longitudinales moderadas a bajas, compuestas principalmente por materiales arcillosos (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2005).

Así pues, la geomorfología ligeramente plana se encuentra compuesta por depósitos aluviales y coluviales, los cuales son el resultado de procesos fluviales como la corriente y procesos degradacionales.

5. Marco geológico

Ráquira, es un municipio situado en el departamento de Boyacá, Colombia, donde afloran rocas sedimentarias del periodo cretácico (Instituto colombiano de geología y minería (INGEOMINAS), 2005). Según INGEOMINAS (2005) son diversas las formaciones estratigráficas que se extienden a lo largo del municipio, dentro de las que se pueden destacar: La formación Simiti, La formación Churuvita y en menor proporción la formación de Arenisca tierna y la formación Bogotá, como se puede apreciar a continuación:

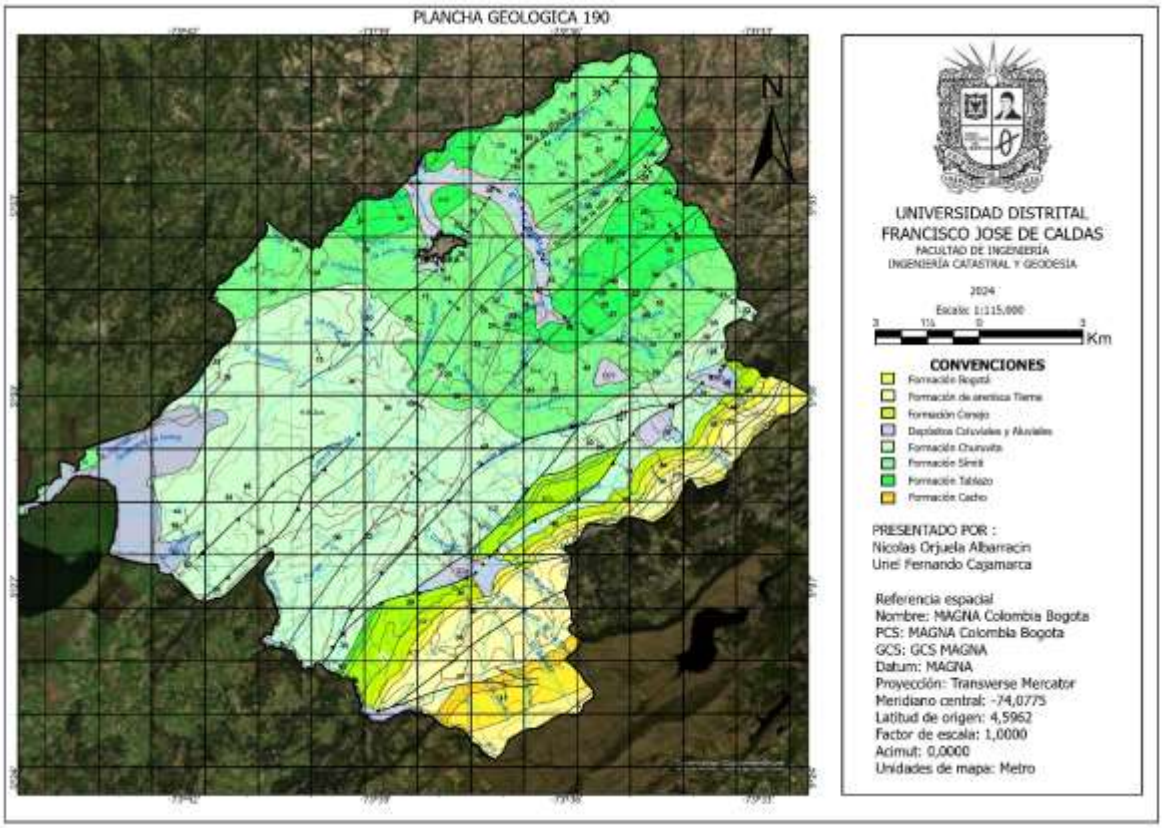


Figura 10: Mapa geológico del municipio de Ráquira

Fuente: *Geología Regional de la plancha 190, Chiquinquirá. Ingeominas 2005, (ver anexo 11.1)*



Figura 11: Leyenda mapa geológico del municipio de Ráquira

Fuente: *Geología Regional de la plancha 190, Chiquinquirá. Ingeominas 2005*

Es necesario destacar, que la formación denominada como ‘Formación areniscas de Chiquinquirá’ hace referencia a la formación previamente denominada como ‘Formación de Churuvita’.Como se puede apreciar, dentro de la zona objeto de análisis, se destaca por la diversidad de formaciones estratigráficas presentes, sin embargo, es necesario resaltar que para este estudio se consideraron específicamente las formaciones estratigráficas Simiti y Churuvita, siendo estas las formaciones geológicas de mayor dominio en el municipio de Ráquira.

5.1. Descripción de formaciones

5.1.1. Formación Simití:

La formación Simití, a nivel macroscópico, se caracteriza por la presencia de granos finos, los cuales presentan formas subredondeadas y prismáticas (Ingeominas, Colombia, 2005). Desde el punto de vista textural, son depósitos con un nivel intermedio de madurez, es decir, que aún no se encuentran completamente desarrolladas.

En relación a los procesos que han impactado las rocas de la formación Simití, se evidencia una compleja interacción en los procesos de diagenéticos y posiblemente hidrotermales. Estos han alterado significativamente la textura depositacional original de las rocas, así como probablemente su composición (Ingeominas, 2005). Dentro de las alteraciones químicas y/o físicas más sobresalientes se destaca la precipitación de minerales opacos, posiblemente pirita, en un entorno reductor seguido de una abundante precipitación de óxidos de hierro. Se estima que estos últimos se encuentren vinculados, al menos parcialmente, con procesos de alteración hidrotermal (Ingeominas,2005).

5.1.2. **Formación Churuvita:**

A nivel macroscópico, la formación Churuvita se distingue por la presencia de arenitas de grano fino con poca porosidad (Ingeominas,2005). Los granos exhiben principalmente formas subredondas y esféricas. Al igual que la formación previamente señalada, los depósitos presentan un nivel intermedio de madurez.

La historia diagenética de la presente formación se distingue por dos fases principales:

La primera, una fase temprana dominada por procesos de compactación mecánica, seguida por una fase tardía donde predominan los procesos químicos de disolución y alteración. Por otro lado, las areniscas presentes en esta formación muestran una tendencia donde después de la deposición, ocurre una precipitación de Silicio sobrecrecimientos de cuarzo, sin embargo, estos no alcanzan un desarrollo óptimo (Ingeominas, 2005).

Una vez destacado lo anterior, obtener información sobre las formaciones geológicas presentes en el municipio de Ráquira es de vital importancia para comprender la composición y estructura de su suelo. No obstante, con el paso del tiempo, los suelos se ven afectados por diversos fenómenos físicos. Por tanto, es crucial entender el comportamiento geomoformológico del mismo. Esto es especialmente relevante en Ráquira, dado que la presencia montañosa de la Cordillera Oriental de los Andes y diversas fuentes hídricas de la zona de estudio contribuyen a la existencia de procesos de sedimentación, como se señala en el siguiente apartado.

5.2. Sedimentación

La sedimentación es un proceso mediante el cual materiales de una zona son transportados por agua, viento o hielo a una nueva ubicación. Estos materiales conocidos como sedimentos, pueden incluir fragmentos de roca, minerales y restos orgánicos. Así entonces, los

procesos de sedimentación resultan ser indispensables y fundamentales en las formaciones geológicas estructurales y la modificación del paisaje (Parodi, M. S. et al, 2023), encontrando dentro de la zona de estudios los siguientes:

5.2.1. Depósitos Aluviales:

Los depósitos aluviales son una acumulación de sedimentos que son formados por el movimiento del agua como lo son arroyos, ríos o corrientes de estos. Estos cauces desplazan una variedad de sedimentos como arcillas, limos, arenas y, los deposita en aquellas zonas donde la velocidad del agua disminuye (Parodi, M. S. et al, 2023).

5.2.2. Depósitos Coluviales:

Los depósitos coluviales son acumulaciones de materiales desplazados por la gravedad, que ocurren principalmente en pendientes pronunciadas**.** Provienen principalmente de la erosión y la alteración de suelos situados en la parte superior de la pendiente(Fito,J.E, 2007).

6. Metodología

6.1. Recursos

6.1.1. Imagen Satelital

Para el presente estudio se utilizó una imagen adquirida del satélite PRISMA, con temporalidad del 13 de diciembre de 2023, a través de su nivel de procesamiento L2C consistente en un producto de Reflectancia Geolocalizada en Superficie (Hiperespectral / PAN), incluyendo:

- Producto de caracterización de aerosoles (VNIR)

- Mapa de vapor de agua (hiperespectral)
- Caracterización de nubes.

La reflectancia de superficie es fundamental para aplicaciones como la clasificación de materiales y la detección de cambios en la superficie terrestre utilizando SAM. Esta imagen, que constituye un valioso componente de la investigación, fue captada en el marco de la misión hiperespectral llevada a cabo por la agencia espacial italiana. Es pertinente subrayar que PRISMA representa una destacada contribución en el ámbito de la observación terrestre mediante su avanzada tecnología de imágenes hiperespectrales.



Figura 12: Imagen PRISMA
Fuente: *Elaboración Propia*

6.1.2. Firmas espectrales

En cuanto a las firmas espectrales, se recopilaron 8 firmas espectrales de 8 tipos de minerales arcillosos los cuales son las siguientes: Amonio, clorita, dickita, caolinita, montmorillonita, moscovita, pirofilita y vermiculita.

Dichas firmas espectrales fueron obtenidas de la USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) y, se encuentran bajo la unidad de medida del micrómetro.

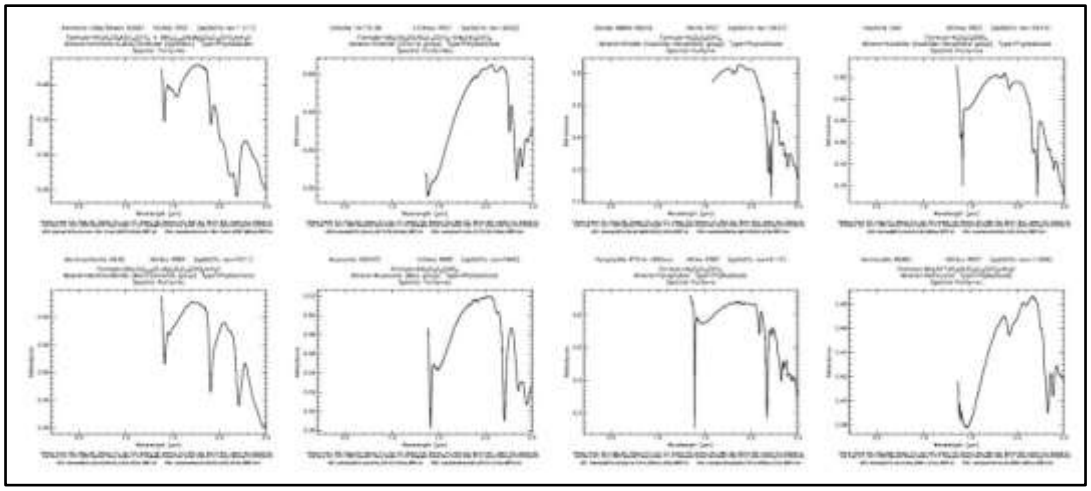


Figura 13: Firmas espectrales de minerales arcillosos
Fuente: *Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).*

6.1.3. División política Veredal Ráquira

De conformidad con los datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi- IGAC, se identificó las siguientes veredas dentro del municipio de Ráquira.

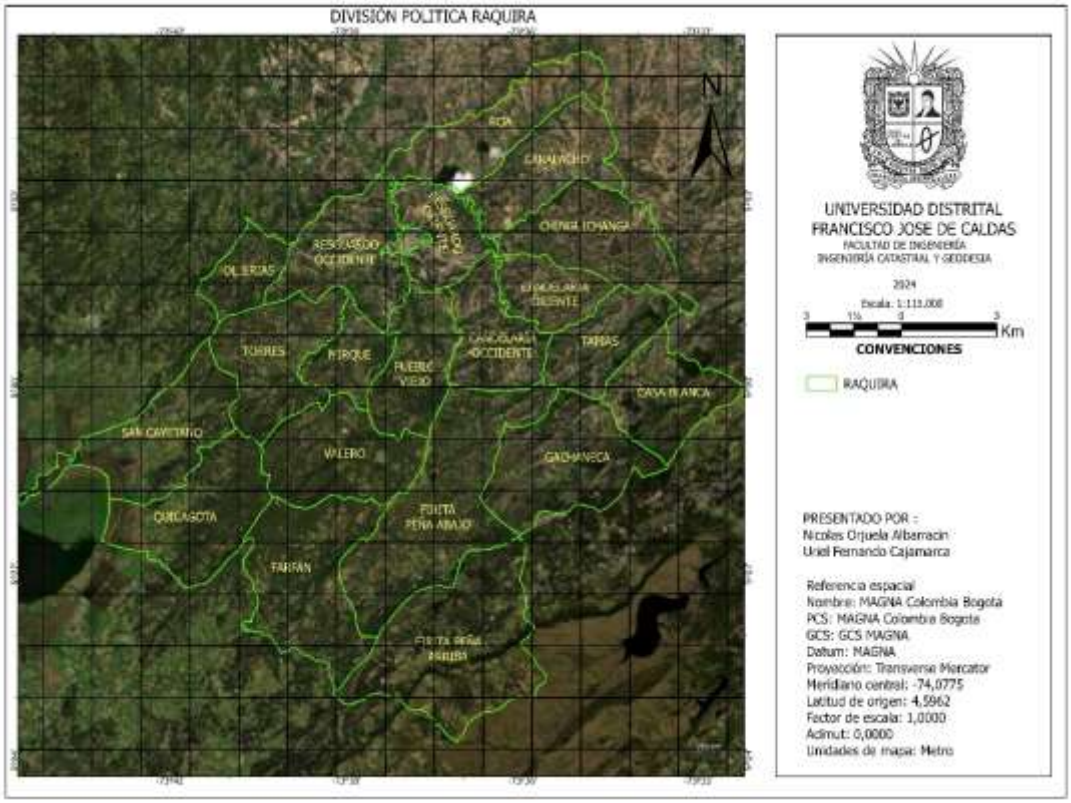


Figura 14: División política veredal Ráquira
Fuente: *Datos abiertos, IGAC*

6.2. Preprocesamiento

Para llevar a cabo el estudio en cuestión, resulta esencial que la imagen empleada atraviese varias etapas de preprocesamiento que garanticen la calidad y coherencia de los insumos procesados. En las siguientes secciones, se detallará cada una de estas etapas, destacando las técnicas utilizadas.

6.2.1. Corrección atmosférica:

Los sensores satelitales recolectan información sobre la cobertura terrestre a partir de la intensidad de radiación electromagnética. La radiación que se captura abarca tanto la luz solar

reflejada en la superficie terrestre como aquella energía que se disemina y se refleja por la atmósfera, conocida como radiancia.

En el caso puntual del presente informe se tiene en cuenta el procedimiento que se muestra en la Figura 14 la cual describe el procedimiento establecido por los productos clasificados como L2C :

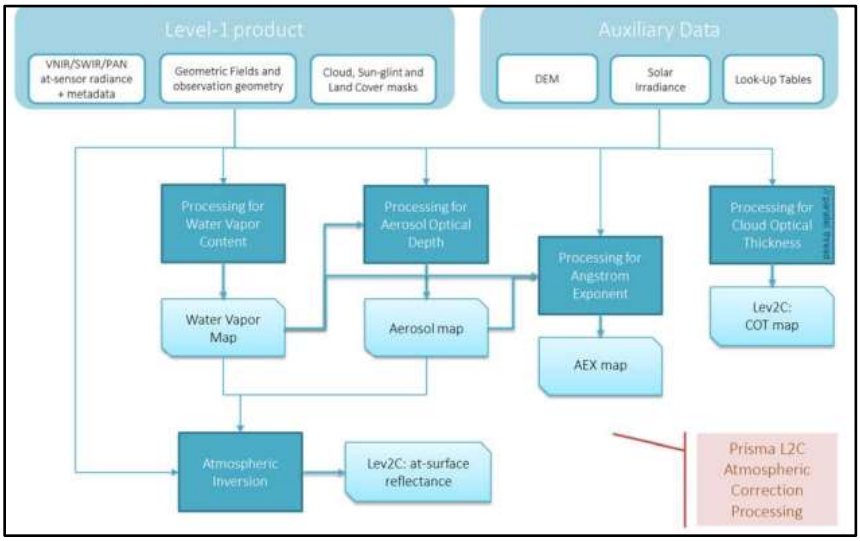


Figura 15: Corrección atmosférica imagen Prisma L2C
Fuente: *Agencia Espacial Italiana - Misión hiperespectral de ASI, PRISMA Algorithm Theoretical Basis Document*

En el caso de los productos clasificados en un nivel 2 de la misión satelital Prisma, es importante considerar que se centran en gases absorbentes en la atmósfera. Destacando que las correcciones más significativas surgen debido a la presencia de aerosoles atmosféricos y vapor de agua, como se puede apreciar en la Figura 14 (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma).

Según lo descrito, es importante proporcionar una estimación del contenido de vapor de agua y el espesor óptico de aerosoles. Por tanto, para los productos de nivel de clasificación 2

resulta fundamental seguir los siguientes tres pasos para una corrección atmosférica adecuada (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma):

- Tratamiento del contenido de vapor de agua
- Tratamiento del espesor óptico de aerosoles.
- Inversión atmosférica (los dos resultados previos son utilizados para determinar la radiancia de la superficie).

6.2.2. Vapor de agua

El método empleado para determinar el vapor de agua se realiza mediante una técnica que implica calcular las diferencias entre la radiancia medida por el sensor en la banda λi y la radiancia correspondiente a la trayectoria atmosférica en esa misma banda, la cual se deriva de la Base de datos de cálculo de transferencia radiactiva (LUT, por sus siglas en inglés) tal como se ilustra en la siguiente ecuación (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma):

$$(1) \quad wv = Lm_{\lambda i} - Latm_{\lambda i}$$

Donde:

- $Lm_{\lambda i}$: Radiancia medida por el sensor en una banda i.
- $Latm_{\lambda i}$: Radiancia de la trayectoria atmosférica.

Finalmente, es de aclarar que la estimación de este parámetro se lleva a cabo a nivel de pixel y se encontrara bajo la resolución espacial del conjunto de datos hiperespectrales prisma, el cual es de 30 metros.

6.2.3. Espesor óptico de los aerosoles

La detección de los aerosoles inicia después de haber procesado adecuadamente los datos sobre el contenido del vapor del agua, puesto que de este dependerá el mapa de vapor de agua (WVM, por sus siglas en inglés), que a su vez es un parámetro de entrada importante para el análisis de los aerosoles (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma).

Así entonces, con el objetivo de analizar el comportamiento del aerosol en todo el espectro de longitud de onda contenida en el producto, es necesario realizar una estimación preliminar del exponente de Angstrom (AEX), cuyo intervalo se sitúa entre 550 –700 nm. Este índice se encontrará estimado a partir de la profundidad óptica de los aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés), el mapa de vapor de agua (WVM) y un conjunto inicial de datos hiperespectrales (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma).

La reflectancia total a una longitud de onda λ, medida en la parte superior de la atmósfera, se encuentra expresada de la siguiente manera:

$$\rho_{ToA}(\lambda) = \rho_{Ray}(\lambda) + \rho_{as}(\lambda) + t\rho_s(\lambda) \quad (2)$$

Donde:

- $\rho_{Ray}(\lambda)$: Es la reflectancia con la dispersión de Rayleigh.
- $\rho_{as}(\lambda)\alpha \frac{\tau a(\lambda)}{4\cos(\theta)\cos(\theta o)}$:Es la reflectancia debido a los aerosoles bajo el supuesto de dispersión única,θ : ángulo cenital del sensor y θo : ángulo cenital del sol.
- $t\rho_s(\lambda)$:Es la reflectancia en superficie escalada por la transmisión atmosférica ascendente t .

Una vez calculados los valores del vapor de agua (WV) y el espesor óptico de los aerosoles (AOT), se llevará a cabo la interpolación de las LUT, lo que permitirá generar la inversión atmosférica en las bandas seleccionadas. Esto proporcionará así las correspondientes reflectancias de la superficie.

6.2.4. Espesor óptico de las nubes

El procesamiento del espesor óptico de las nubes abarca una alta variedad de escenarios, pues en este punto resulta necesario que se determinen las propiedades de las nubes que afectan directamente el espectro electromagnético. La radiación está ligada a las propiedades ópticas de los cirros o las nubes, y a la altitud de estas en la atmósfera (2021, Agencia Espacial Italiana- Misión satelital Prisma).

Una vez descrito lo anterior, el principio se fundamenta en una técnica de reflexión de las nubes en un canal no absorbente en la región del espectro visible, donde se demuestra una alta sensibilidad al espesor óptico de las nubes (COT, por sus siglas en inglés). Por otro lado, el mismo principio aplicado en un canal absorbente en la región del infrarrojo permite determinar el tamaño de las partículas de la nube (2009, Guanter, et al).

Así entonces, dicho componente se calculará con ayuda de una base de datos que contiene radiancias de la parte superior de la atmósfera en diversos escenarios atmosféricos. Se resalta que dichos cálculos atmosféricos se realizan en las siguientes longitudes de onda:

437.0	864.3	1023.4	1305.9	1971.8
467.5	874.5	1104.2	1497.6	2022.2
508.2	925.4	1144.5	1598.5	2102.9
640.5	942.7	1205.0	1638.8	2133.2
701.5	983.1	1245.4	1699.4	2203.8

Figura 16: Longitudes de onda del espeso óptico de las nubes
Fuente: *Agencia Espacial Italiana - Misión hiperespectral de ASI PRISMA, Algorithm Theoretical Basis Document*

El proceso inicia con la selección de píxeles mediante la aplicación de mascarás de nubes, las cuales son proporcionadas en el nivel 1 del producto Prisma. Posteriormente, se realiza una comparación entre las radiancias medidas con aquellas que han sido almacenadas en bases de datos en una amplia gama de escenarios atmosféricos. De esta manera, se generan matrices de radiancias para cada combinación de radio efectivo, profundidad óptica y para cada longitud de onda correspondiente a condiciones específicas en la superficie terrestre; este procesamiento implica una iteración numérica para buscar aquellas radiancias que mejor se ajusten a las medidas observadas (2021, Agencia Espacial Italiana-Misión satelital Prisma).

El esquema numérico utilizado minimiza la suma del cuadrado de los residuos de cada canal, siendo definida por la diferencia existe entre el logaritmo de radiancias simuladas y el logaritmo de las radiancias medidas, así entonces la ecuación se encuentra definida como:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i}^{n} |\log(L_{sim}(\lambda_i) - \log(L_{meas}(\lambda_i)\ |^2}$$

Donde:

- $\log(L_{sim}(\lambda_i)$: Logaritmo de radiancias simuladas.

- $\log(L_{meas}(\lambda_i)$: Logaritmo de radiancias medidas.

6.2.5. Generación de reflectancia de la superficie

Finalmente, el último paso se basa en la siguiente ecuación de transferencia de radiación Lambertiana como se aprecia a continuación:

$$(4)\ \rho_{TOA\lambda}(\theta_0, \theta_V, \phi, \mathrm{AER}_\lambda; \rho_S) = \rho_{Path\lambda}(\theta_0, \theta_V, \phi, \mathrm{AER}_\lambda) + \frac{\mathrm{TR}_\lambda(\theta_0,\theta_V,\phi,\mathrm{AER}_\lambda)\rho_{S\lambda}}{(1-\mathrm{S}_{atm\lambda}(\mathrm{AER}_\lambda)\rho_{S\lambda})}$$

Donde:

- $\theta_0\ y\ \theta_V$:Son el ángulo cenital solar y el ángulo cenital de visión, respectivamente.
- Φ: Ángulo acimutal relativo, es decir, la diferencia entre el ángulo acimutal solar y el de visión.
- AER_λ: Son las propiedades ópticas del modelo del aerosol.
- $\rho_{Path\lambda}$: Es la reflectancia del trayecto atmosférico.
- TR_λ: Es la transmisión total de la atmosfera (considera absorción de gases)
- $\mathrm{S}_{atm\lambda}$: Es el albedo esférico de la atmósfera.
- $\rho_{S\lambda}$: Es la reflectancia espectral en la superficie.

Teniendo en cuenta la ecuación 4, esta puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$(5)\ \rho_{S\lambda} = \frac{\rho_{TOA\lambda}-\rho_{Path\lambda}}{\mathrm{TR}_\lambda-\mathrm{S}_{atm\lambda}(\rho_{TOA\lambda}-\rho_{Path\lambda})}$$

6.3. Procesamiento

La metodología MSAM es una técnica fundamental en el procesamiento de imágenes satelitales que permite analizar la composición espectral de los objetos presentes en una escena.

Al aplicar MSAM, se compara el ángulo espectral entre la firma espectral de un píxel en la imagen y un espectro de referencia previamente seleccionado. Este enfoque proporciona información detallada sobre las características espectrales de los elementos presentes en la escena, lo que resulta invaluable en diversas aplicaciones, como la detección de materiales y la clasificación de superficies terrestres. En este estudio, se explorará el proceso de implementación de la metodología MSAM utilizando el lenguaje de programación Python, con el fin de comprender y aplicar de manera práctica sus principales conceptos y aplicaciones.

Para la correcta ejecución del código se necesita un entorno que para este estudio fue el entorno de visual studio code que nos permite depurar el código de Python cargando su extensión, una vez realizada la instalación se cargan las bibliotecas necesarias para el correcto desarrollo

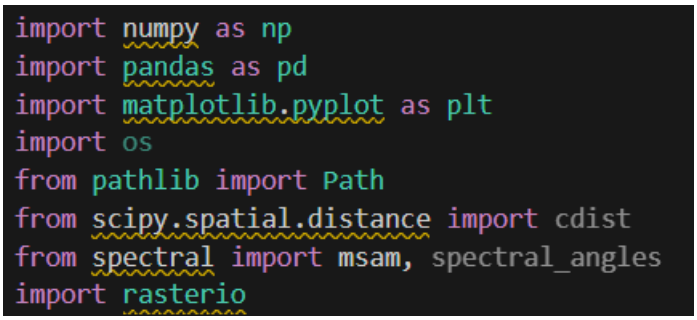


Figura 17: Librerías Python
Fuente: *Elaboración Propia*

1. NumPy es una biblioteca para el lenguaje de programación Python que proporciona soporte para arreglos multidimensionales (o arrays), junto con una gran colección de funciones matemáticas para operar sobre ellos. Es esencial para la computación científica, análisis de datos, procesamiento de señales y machine learning. Se utiliza comúnmente en campos como la ingeniería, la investigación científica y la inteligencia artificial (NumPy documentation).

2. Pandas es una biblioteca de Python para manipulación y análisis de datos. Ofrece estructuras de datos flexibles y poderosas como DataFrames y Series, permitiendo operaciones de lectura/escritura, limpieza y transformación de datos de manera eficiente. Se usa en análisis de datos, finanzas, investigación de mercado y ciencia de datos (pandas documentation).

3. Matplotlib es una biblioteca de gráficos y visualización para Python. Permite crear una amplia gama de gráficos, como líneas, barras, dispersión, histogramas y diagramas 3D. Es útil para visualización de datos, análisis exploratorio y producción de gráficos para publicaciones y presentaciones científicas (Using Matplotlib).

4. El módulo Os en Python proporciona funciones para interactuar con el sistema operativo, como manipulación de archivos y directorios, ejecución de comandos y gestión de variables de entorno. Se usa en administración de sistemas, scripts de automatización y desarrollo de aplicaciones (Miscellaneous operating system interfaces)

5. Pathlib es un módulo para trabajar con rutas y sistemas de archivos de manera orientada a objetos. Facilita la manipulación de rutas, como unir directorios, obtener extensiones de archivos y comprobar la existencia de archivos. Se usa en desarrollo de aplicaciones, scripts de automatización y manejo de archivos (Object-oriented filesystem paths).

6. SciPy es una biblioteca de Python para computación científica y técnica, basada en NumPy. Ofrece herramientas para álgebra lineal, integración, optimización, interpolación y procesamiento de señales. Se usa en investigación científica, ingeniería y análisis numérico (SciPy documentation).

7. Spectral Python (SPy) es una biblioteca para análisis de datos espectrales y teledetección. Ofrece herramientas para análisis de imágenes multiespectrales e hiperespectrales,

como clasificación y reducción de dimensionalidad. Se usa en campos como teledetección, geología y ciencias ambientales (Welcome to Spectral Python).

8. Rasterio es una biblioteca para lectura y escritura de datos rasterizados (imágenes geoespaciales). Permite la manipulación de imágenes satelitales y datos geoespaciales, con funciones para reproyecciones y transformaciones. Se usa en SIG (Sistemas de Información Geográfica), cartografía y análisis geoespacial .

Una vez importadas las bibliotecas o módulos necesarios, se procede a comparar los valores de la firma espectral de las diferentes arcillas y el valor de las bandas swir de nuestra imagen hiperespectral y estos valores se guardan en un nuevo Excel, en donde tendremos los valores de reflectancia y longitud de onda

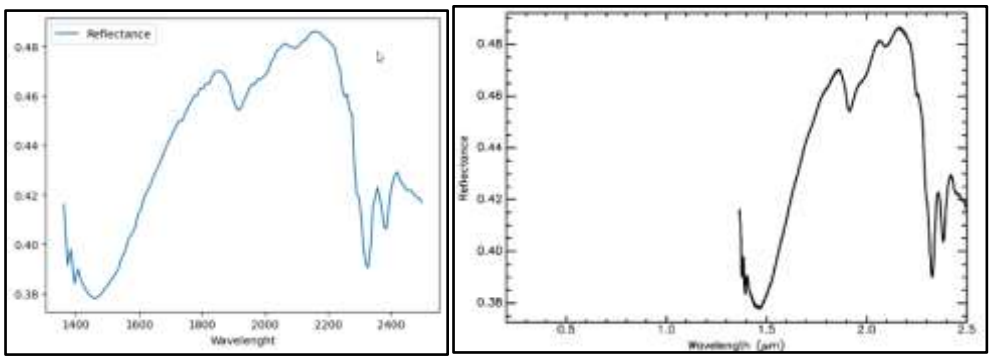


Figura 18: Firmas Espectrales Vermiculita
Fuente: *Elaboración Propia*

Se hace una verificacion de la longitud de onda de este nuevo excel con los valores de las bandas de nuestra imagen swir, que relacionan cada banda con un valor de reflectancia, al ser 173 bandas solo necesita las bandas que estan dentro del rango de la firma espectral de

referencia, una vez verificado cuales bandas de la imagen swir en este caso para la vermiculita son 131 con longitud de onda desde 1361.053 nm a 2497.115 nm, con la ayuda de Arcgis PRO se utiliza la herramienta composición de bandas solo con las bandas necesarias para cada tipo de firma.

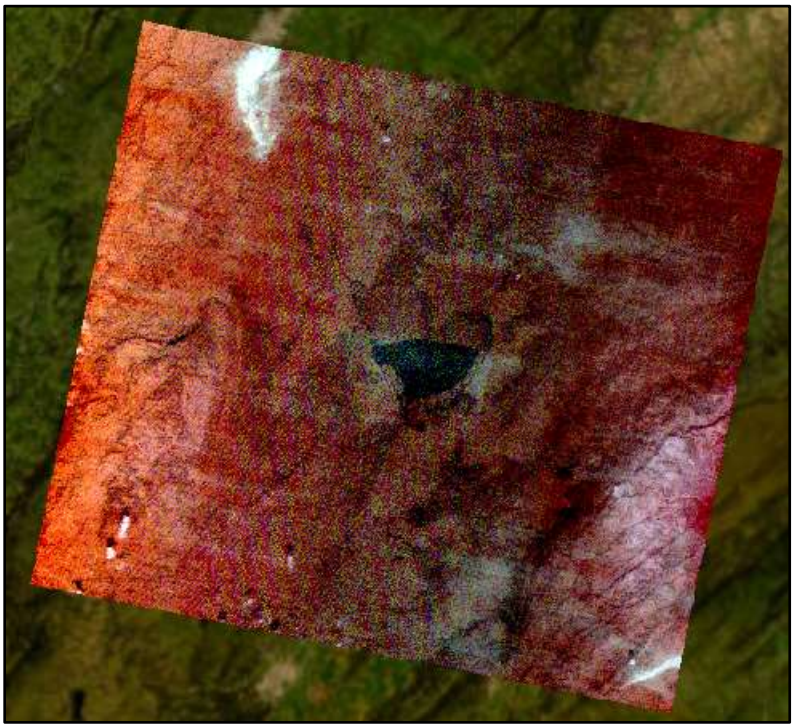


Figura 19: Composición de Bandas Vermiculita
Fuente: *Elaboración Propia*

A continuación, se hace una tabla para cada tipo de arcilla y cuantas bandas se usan y sus longitudes de onda

Tipo de arcilla	Cantidad de bandas	Ancho de bandas nm
Caolinita	133	1339.129 ; 2497.115
Illita-esmectita	129	1383.28 ; 2497.115
Pirofilita	132	1349.788 ; 2497.115
Vermiculita	131	1361.053 ; 2497.115

Moscovita	129	1383.28 ; 2497.115
Montmorillonita	130	1372.912 ; 2497.115
Dickita	110	1585.86 ; 2497.115
Clorita	131	1361.053 ; 2497.115

Una vez obtenida la imagen se procede a cargar en Python es necesario que el número de bandas de nuestra imagen creada sea la misma cantidad de filas de nuestro Excel de la firma, ya que es necesario para que el código en Python funcione correctamente ya que se realizan varias operaciones matriciales.

Se procede a utilizar la herramienta o concepto de threshold “umbral”, que en procesamiento de imágenes, la umbralización se utiliza para convertir imágenes en escala de grises en imágenes binarias (blanco y negro), divide los datos en dos categorías: aquellos que están por encima del umbral y aquellos que están por debajo. Esto ayuda a resaltar objetos o características específicas. Para ello toca definir un threshold diferente para cada tipo de arcilla para que el código haga la comparación de cada pixel de la imagen con nuestro valor de threshold, es valor vario de 0 a 1 en donde 1 es lo más similar a nuestra firma espectral y 0 lo más alejado, al definir el threshold este da una nueva imagen en donde muestra en color blanco los valores de reflectancia que coinciden con nuestro umbral y en negro los que no.

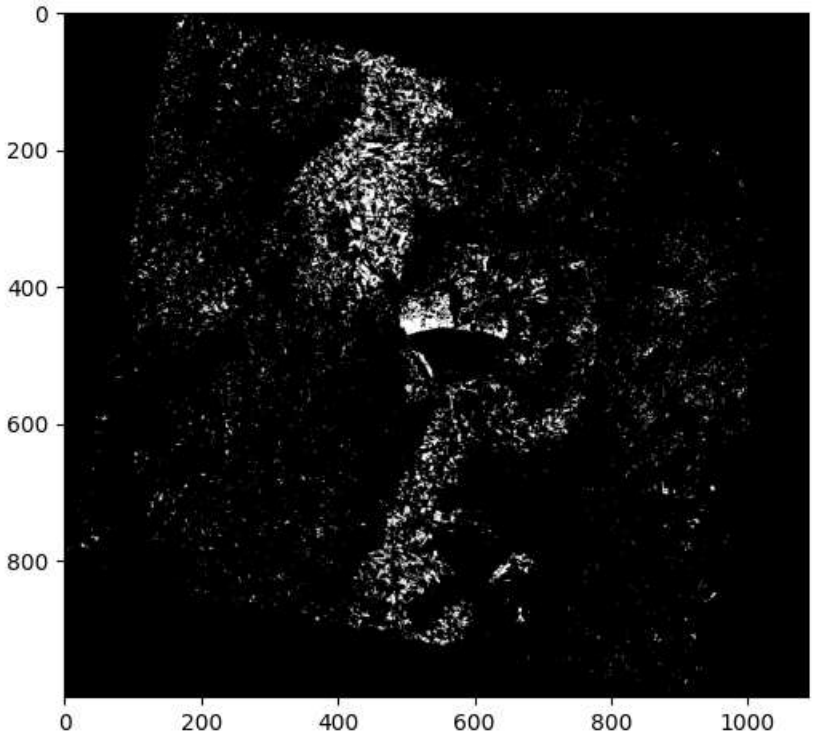


Figura 20: MSAM ILLITA-ESMECTITA
Fuente: *Elaboración Propia*

7. Resultados

Es de destacar que los resultados obtenidos en este estudio se fundamentaron en documentos técnicos, bibliográficos y cartográficos establecidos previamente por autoridades en la materia. Dado que la composición geológica del suelo no presenta cambios significativos en períodos de tiempo relativamente cortos, se consideró pertinente utilizar las fuentes más recientes y actualizadas disponibles para la zona de interés. Esta decisión metodológica se basa en el principio de que los documentos técnicos especializados representan el conocimiento más avanzado y confiable en un campo específico, al ser producto de rigurosas investigaciones y revisiones por parte de expertos. Por lo tanto, los hallazgos y conclusiones derivados de este

proyecto se encuentran respaldados por la literatura técnica más actual y relevante, asegurando así la solidez y validez de los resultados obtenidos.

A partir del procesamiento se obtiene el resultado de 8 arcillas, se hace un recorte al ráster solo para la zona de estudio de nuestro interés, obteniendo como resultado:

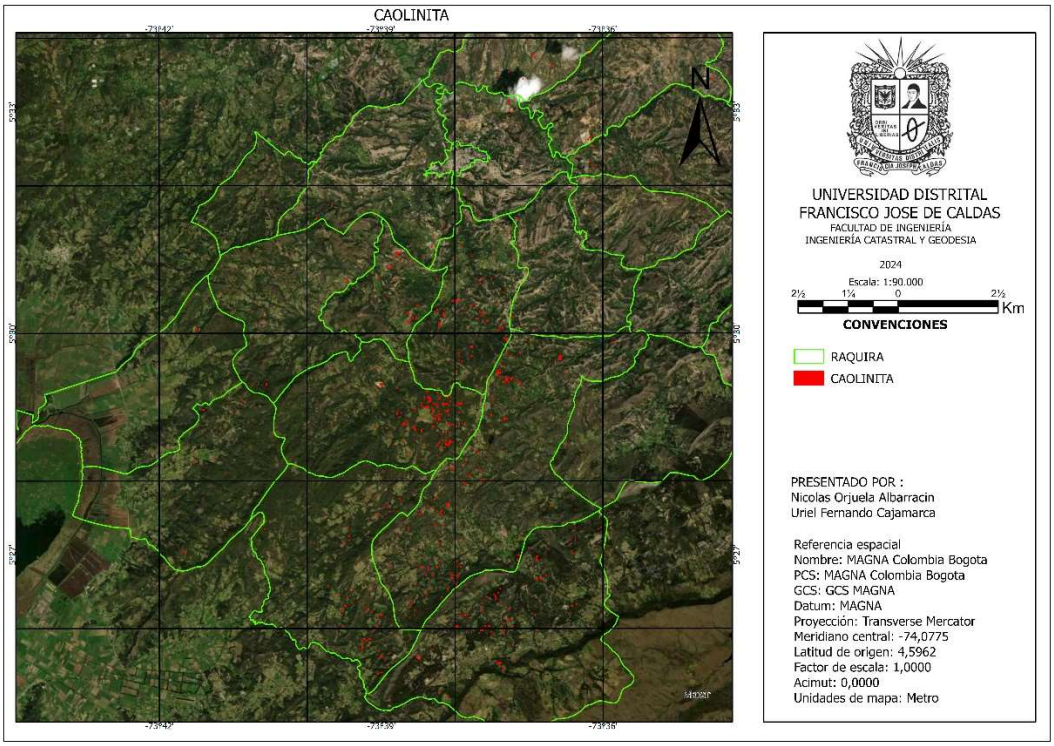


Figura 21: Distribución de Caolinita
***Fuente:** Elaboración Propia, (ver anexo 11.2)*

Como se puede apreciar en la imagen, la arcilla caolinita se encuentra principalmente concentrada en las veredas de Pueblo Viejo, Candelaria Occidental y Firita Peña Abajo en el municipio de Ráquira. Esta concentración de arcilla caolinita se logró identificar y mapear aplicando un umbral (threshold) del 25% en la metodología MSAM utilizada en el procesamiento de las imágenes hiperespectrales. La presencia y distribución de la caolinita en

estas zonas concuerda con la información geológica disponible para la región. La plancha geológica del Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) indica que las formaciones geológicas predominantes en estas áreas son la Formación Churuvita y, en menor medida, la Formación Simití.

Además, un estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia en 2013 (Gaviria et al., 2013) corrobora la presencia de caolinita en estas formaciones geológicas. Según este estudio, la caolinita es uno de los minerales arcillosos más comunes encontrados en la Formación Churuvita, y también se presenta, aunque en menor cantidad, en la Formación Simití (antes conocida como Formación San Gil Superior).

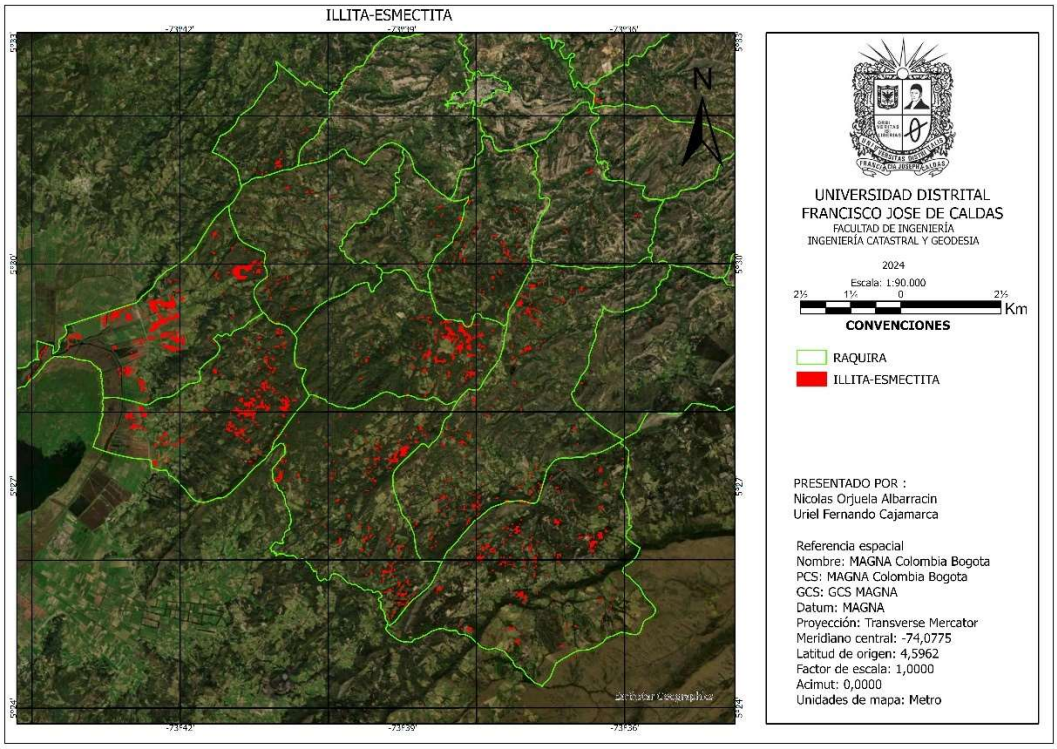


Figura 22: Distribución de Illita-Esmectita
Fuente: *Elaboración Propia (ver anexo 11.3)*

Según la anterior Figura, la arcilla illita-esmectita se encuentra principalmente concentrada en las veredas de San Cayetano, Quicagota, Farfan y Valero del municipio de Ráquira. Esta concentración de la arcilla illita-esmectita se logró mapear aplicando un umbral (threshold) del 27% en la metodología MSAM utilizada en el procesamiento de las imágenes hiperespectrales. Las veredas mencionadas se encuentran ubicadas dentro de las formaciones geológicas Churuvita y Simití, según se evidencia en el mapa geológico de la zona. Un estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia en 2013 (Gaviria et al., 2013) confirma la presencia predominante del mineral arcilloso illita-esmectita en la Formación Churuvita de esta región.

En el caso de Ráquira, se puede observar que la concentración de illita-esmectita se encuentra asociada a zonas de cultivos cercanas a la Laguna de Fúquene. Esta distribución podría estar relacionada con el uso de la illita como fertilizante en estas áreas agrícolas, aprovechando sus propiedades beneficiosas para el crecimiento de los cultivos.

La illita-esmectita, al ser una arcilla interestratificada, puede presentar características variables dependiendo de la proporción y distribución de los componentes illita y esmectita. Estas características pueden influir en su comportamiento y potencial uso en diferentes aplicaciones, como la agricultura, la industria cerámica o la construcción.

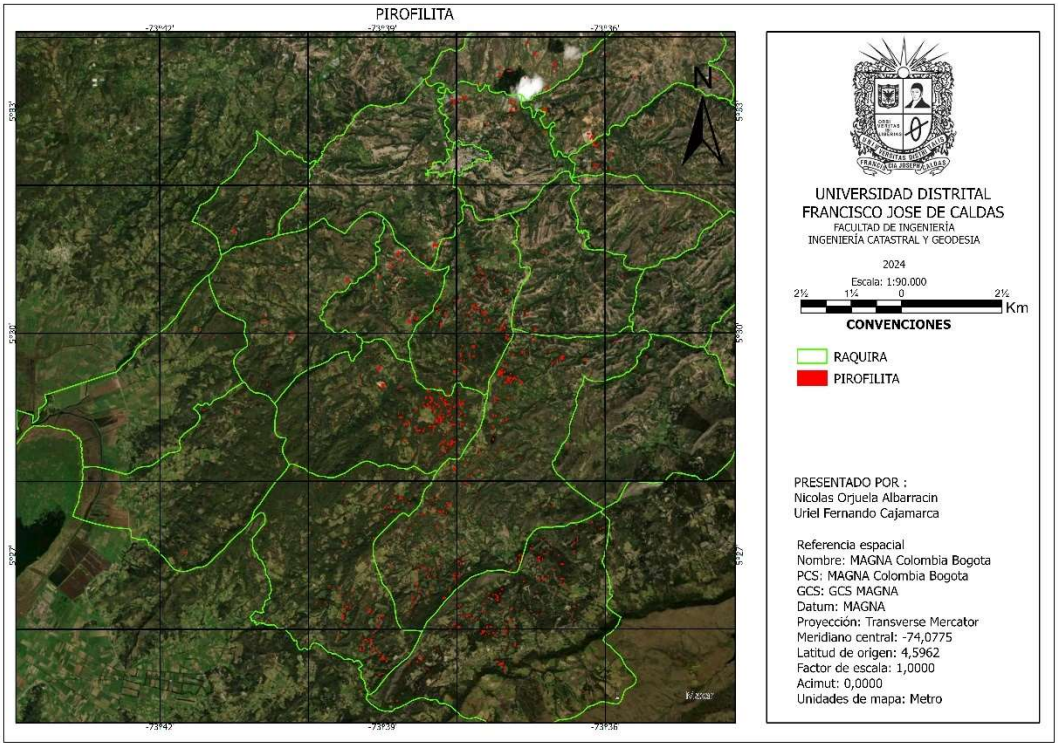


Figura 23: Distribución de Pirofilita
Fuente: *Elaboración Propia, (ver anexo 11.4)*

Como se evidencia en la Figura, la arcilla pirofilita se encuentra principalmente concentrada en las veredas de Valero, Pueblo Viejo y Firita Peña Abajo del municipio de Ráquira. Esta concentración de pirofilita se logró identificar y mapear aplicando un umbral (threshold) del 20% en la metodología MSAM utilizada en el procesamiento de las imágenes hiperespectrales.

Las veredas mencionadas se encuentran ubicadas dentro de la Formación Simití, anteriormente conocida como Formación San Gil Superior, según se puede constatar en el mapa geológico de la zona. Un estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia en 2013 (Gaviria et al., 2013) indica que la pirofilita es uno de los minerales arcillosos presentes en esta formación geológica.

La presencia de pirofilita en la Formación Simití sugiere que esta arcilla se formó a partir de procesos geológicos específicos, como la alteración hidrotermal o la diagénesis profunda de rocas ricas en aluminio. Estas condiciones de presión y temperatura elevadas favorecieron la transformación de otros minerales arcillosos o minerales de aluminio en pirofilita. Es importante destacar que la distribución espacial de los minerales arcillosos, como la pirofilita, puede verse influenciada por diversos factores geológicos, como la composición original de las rocas, las condiciones de sedimentación, los procesos de alteración posteriores y la tectónica de la región.

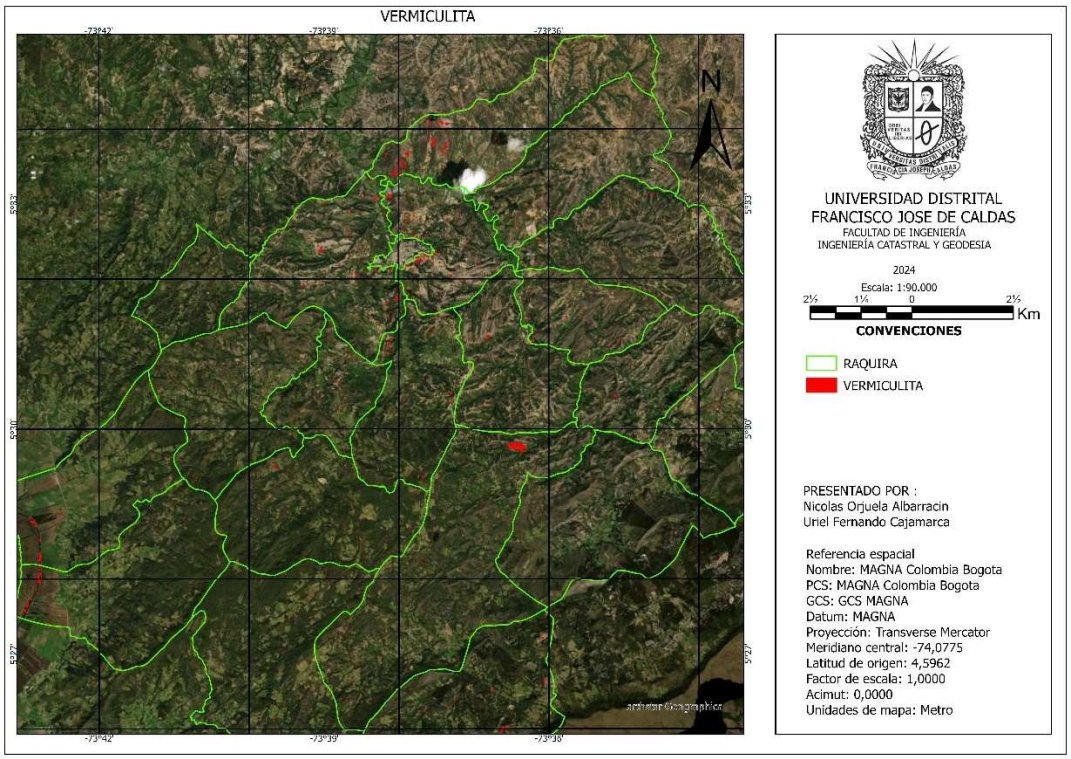


Figura 24: Distribución de Vermiculita
***Fuente:** Elaboración Propia (ver anexo 11.5)*

La representación gráfica muestra que esta arcilla se encuentra principalmente concentrada en las veredas de Roa, Resguardo oriente y Firita Peña Abajo veredas pertenecientes a la formación de Simiti, esta concentración de arcilla se logró con threshold al 10%. La

formación de vermiculita, un tipo de arcilla, en un contexto geológico específico puede explicarse por la alteración de minerales de mica, como la moscovita, bajo condiciones ambientales particulares. Según (2005, ingeominas), se menciona la presencia de muscovita en varios segmentos de la formación de simiti, lo que resulta significativo ya que la vermiculita puede generarse a partir de la alteración hidrotermal de micas ricas en hierro.

La vermiculita se forma cerca de la superficie terrestre y se puede encontrar en suelos y sedimentos antiguos, así como en la interfaz entre rocas ígneas ricas en feldespato y otras ricas en hierro y magnesio. Esto sugiere que las condiciones descritas en los segmentos del texto podrían ser favorables para la formación de vermiculita.

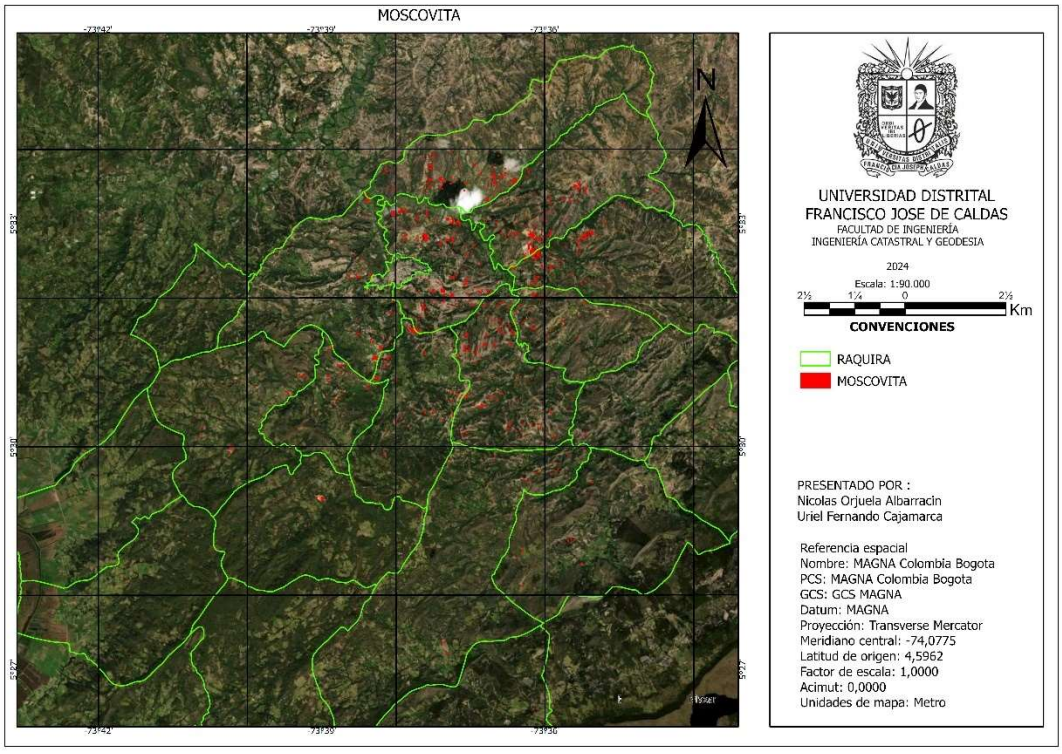


Figura 25: Distribución de Moscovita
Fuente: *Elaboración Propia (ver anexo 11.6)*

Como se puede apreciar en la imagen esta arcilla se encuentra principalmente concentrada en las veredas de Roa, Resguardo Oriente y Candelaria Occidente, esta concentración de arcilla se logró con threshold al 11%, según (2013, Gaviria, et al) Es común encontrar moscovita en rocas sedimentarias como areniscas y lodolitas, donde actúa como un mineral detrítico o de grado metamórfico muy bajo.

Al mencionar que en las arenitas de la Formación Churuvita hay presencia de arenitas moscovíticas, indica que estas arenitas contienen el mineral moscovita como uno de sus componentes detríticos. Esto sugiere que, durante la deposición de estos sedimentos, había una fuente de aporte de moscovita, probablemente proveniente de la erosión de rocas metamórficas o ígneas que contenían este mineral.

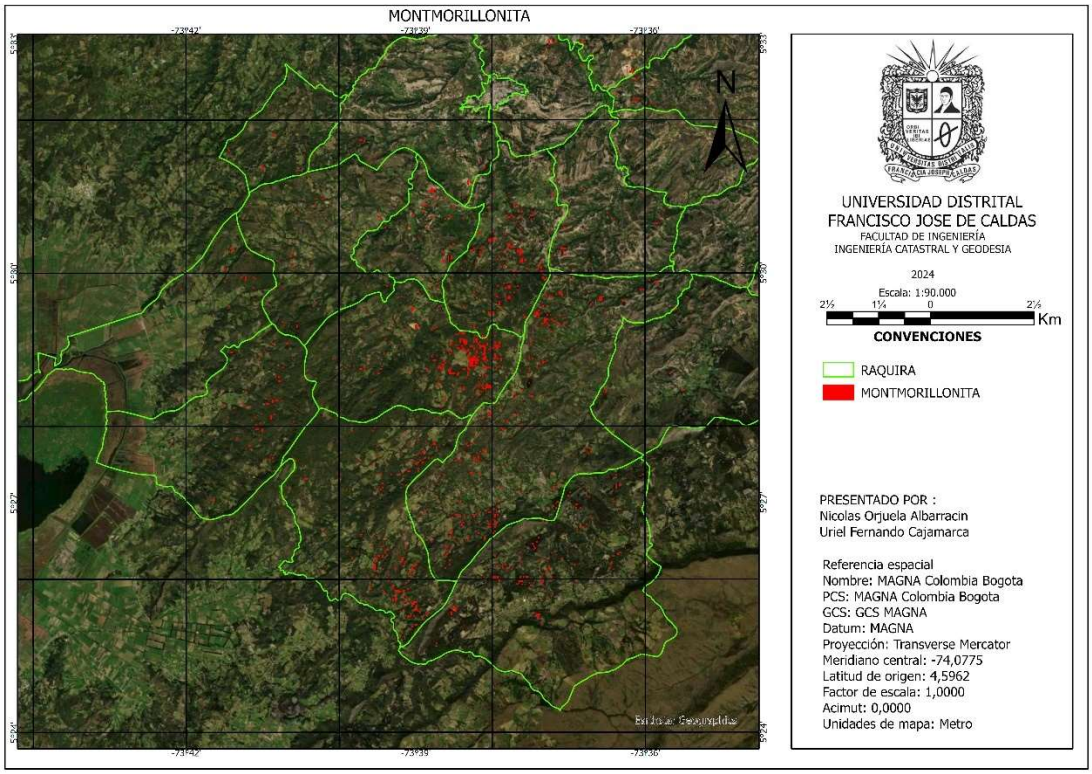


Figura 26: Distribución de Montmorillonita
Fuente: *Elaboración Propia (ver anexo 11.7)*

La representación gráfica obtenida confirma que la “montmorillonita” se encuentra predominantemente concentrada en las veredas de Pueblo Viejo, Valero, Firita y Peña Abajo, alcanzada mediante un threshold del 34%. Además, investigaciones previas, como lo señalan Cespedes, et al (2014), destacan en su análisis mineralógico la presencia de Cuarzo y Caolinita, así como la de montmorillonita como mineral arcilloso original en el municipio de Ráquira. Esto sugiere su presencia en gran parte del municipio, aunque este concentrada en ciertas áreas. Es relevante señalar que este mineral arcilloso se encuentra principalmente en zonas donde existe una alteración de minerales primarios ricos en aluminio y silicatos, como es el caso del cuarzo quien se encuentra dentro de la familia de minerales denominados silicatos y, se caracterizan por ser ricos en silicio.

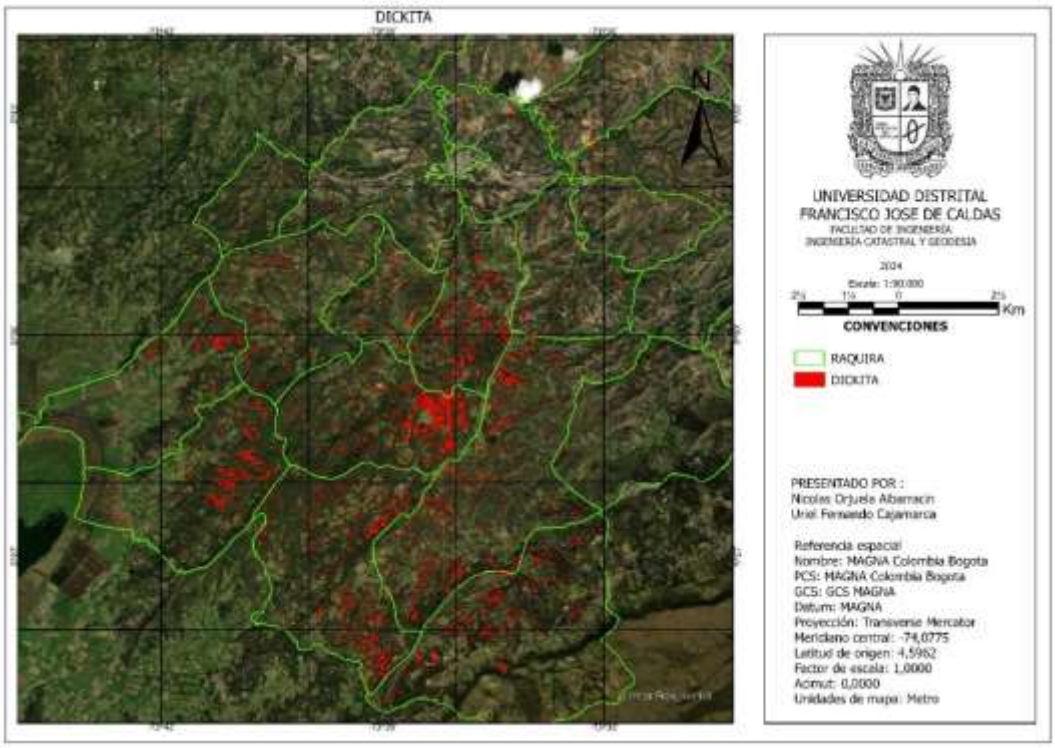


Figura 27: Distribución de Dickita
Fuente: *Elaboración Propia (ver anexo 11.8)*

La imagen revela que existe una concentración significativa de “Dickita” en las veredas Pueblo Viejo, Valero, Firita Peña Abajo y Quicagota, alcanzada con un threshold del 20%. Estas áreas donde se denota la presencia del mineral arcilloso, están asociadas con la Formación Churuvita, conforme a lo estipulado en la plancha geológica 190- Chiquinquirá (ver anexo 11.1). Esta observación valida lo señalado por Gaviaría (2013), quien sostiene que, aunque este mineral no constituye una fracción predominante en la zona de estudio, su presencia tiende a intensificarse en la Formación Churuvita y a desaparecer en la Formación San gil. Denotando que en las zonas señaladas ocurren transformaciones mineralógicas las cuales resultan ser fundamentales dentro de la investigación y la industria.

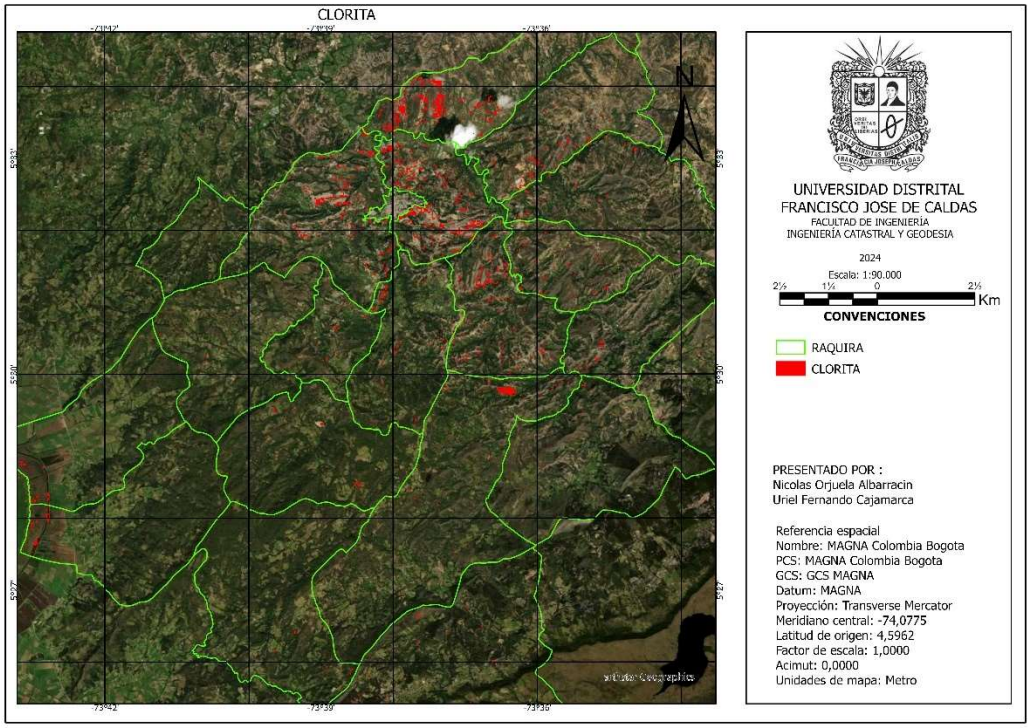


Figura 28: Distribución de Clorita
Fuente: *Elaboración Propia (ver anexo 11.9)*

La distribución de la “Clorita”, como se muestra en la imagen, se concentra principalmente en las veredas de Pueblo Viejo, Candelaria Occidente, Resguardo Oriente, Resguardo Occidente y Roa, con una concentración lograda mediante un threshold del 10%. Lo anterior sugiere, de acuerdo con las observaciones de Gaviaría (2013), que la transformación de estructuras originales generalmente ocurre cuando los sedimentos experimentan incrementos de presión y/o temperatura.

Con base en la cartografía geológica 190- Chiquinquirá, se puede apreciar que la presencia de dicho mineral arcilloso no es predominante dentro de la zona de estudio. Esto sugiere que su ocurrencia en la región podría atribuirse a procesos principalmente geotérmicos, los cuales facilitan la formación de la clorita en el municipio de Ráquira.

8. Discusión

8.1. Validación de datos

A continuación, se realiza un análisis multitemporal de la variabilidad de los minerales arcillosos presentes en el suelo del municipio de Ráquira con imágenes Landasat 8 en un nivel 2 las cuales fueron obtenidas de USGS y presentan temporalidades de tiempo del año 2015 y 2023, respectivamente.

En el estudio, se llevó a cabo una clasificación supervisada utilizando ArcGIS Pro, un software de sistemas de información geográfica. El objetivo era identificar y separar las diferentes cubiertas terrestres presentes en el área de interés. Se definieron tres clases principales: vegetación densa, suelo desnudo y cultivos.

Para la clasificación supervisada, se recopilaron muestras de entrenamiento representativas de cada una de estas clases. Utilizando herramientas de clasificación basadas en algoritmos de aprendizaje automático, como el clasificador de máxima verosimilitud, se asignaron los píxeles de la imagen a las clases correspondientes según su firma espectral.

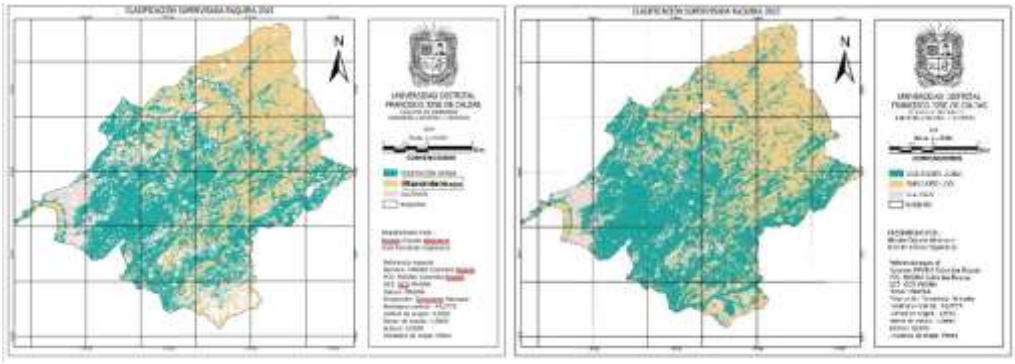


Figura 29: Clasificación Supervisada
Fuente: *Elaboración Propia*

Una vez obtenida la imagen clasificada, se procedió a aislar la clase de suelo desnudo. Esta capa se utilizó como una máscara para delimitar las áreas de interés y excluir las regiones cubiertas por vegetación densa o cultivos. "La máscara de suelo desnudo permite concentrar el análisis en las regiones donde es más probable encontrar afloramientos rocosos y depósitos minerales" (Rowan y Mars, 2003, p. 38).

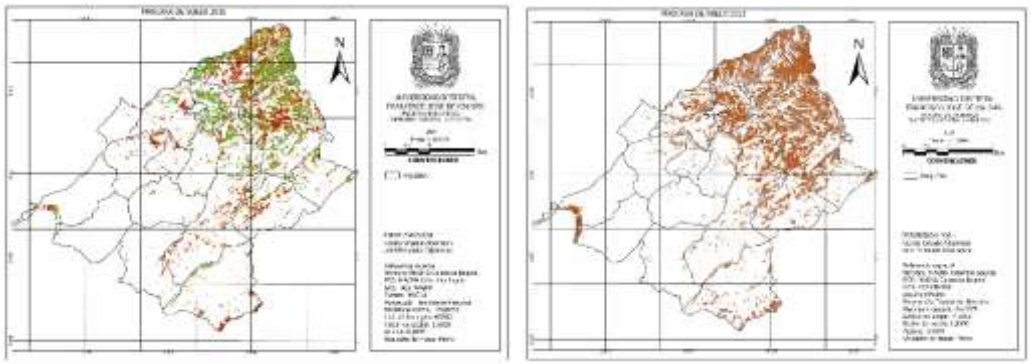


Figura 30:Mascara de suelo desnudo
Fuente: Elaboración propia

Con la máscara de suelo desnudo definida, se aplicó un índice espectral diseñado específicamente para la detección de arcillas. "Los índices espectrales de arcillas aprovechan las características de absorción diagnósticas de estos minerales en las regiones espectrales del visible e infrarrojo cercano y de onda corta" (Chabrillat et al., 2002, p. 1974). El índice utilizado, como el Índice de Arcilla o el Índice de Alteración de Arcilla, permite resaltar y mapear las áreas ricas en minerales arcillosos dentro de la máscara de suelo desnudo.

Una vez realizada la respectiva clasificación supervisada con el objetivo de limpiar en gran porción la densidad boscosa presente en la zona de estudio, se procede a aplicar el índice geológico de minerales arcillosos sobre aquellas zonas que no presentan una cobertura vegetal o también denominadas como suelos desnudos.

El índice de minerales arcillosos es una relación que se establece entre las bandas del SWIR de un sensor. Esta relación se basa en la capacidad de lo minerales hídricos como el caso de lo es el caso de los minerales arcillosos (2009, Dogan), así mismo este índice ayuda en la reducción de las variaciones de iluminación causadas por el terreno.

A continuación, se realiza un análisis multitemporal de la variabilidad de los minerales arcillosos presentes en el suelo del municipio de Ráquira con imágenes Landasat 8 en un nivel 2 las cuales fueron obtenidas de USGS.

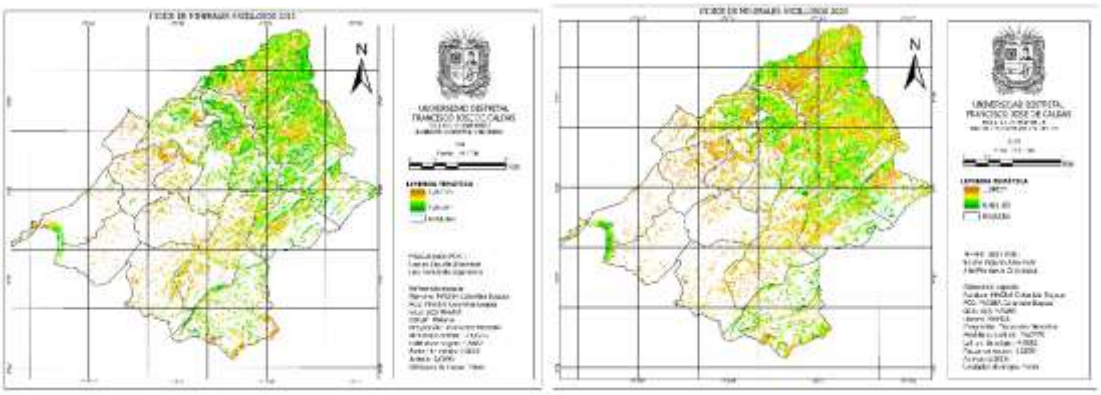


Figura 31: Variabilidad de minerales arcillosos 2015-2023
Fuente: Elaboración propia- Imagen Landsat 8

De acuerdo a la Figura 28, aquellas zonas que presentan tonalidades naranjas indican un alto grado de presencia de minerales arcillosos dentro de la zona. Por otro lado, las zonas con tonalidades amarillas también pueden sugerir una alta existencia de minerales, aunque en una menor concentración que aquellas zonas naranjas. Finalmente, el color verde denota una baja variabilidad o incluso una ausencia de minerales arcillosos (2009, Dogan).

Los minerales arcillosos desempeñan un papel fundamental dentro de la agricultura debido a sus propiedades físicas y químicas. Estas propiedades tienen un impacto significativo en la fertilidad del suelo y pueden proporcionar beneficios importantes para los cultivos. Sin embargo, la alteración del equilibrio de minerales arcillosos, como consecuencia de actividades humanas como la extracción minera con fines industriales, puede generar una alta degradación ambiental. Esta actividad puede alterar la biodiversidad y los ecosistemas zonales.

Así mismo, se destaca que los minerales arcillosos presentan altas capacidades de adsorción, lo que implica que pueden retener una amplia gama de contaminantes, y así volverse focos contaminantes que no afectan solo el suelo sino también representan una amenaza para las fuentes de agua de la zona. Es común ver que estas prácticas mineras se lleven a cabo en

proximidad a afluentes hídricos locales, lo que aumenta el riesgo de que estos cuerpos puedan ser contaminados.

Para concluir, la alteración del equilibrio de los minerales arcillosos por actividades humanas puede ser una amenaza significativa para el entorno y su biodiversidad, razón por la que resulta crucial identificar y clasificar aquellas zonas donde este fenómeno está ocurriendo, con el objetivo de minimizar los impactos y proteger la salud de los ecosistemas locales.

En cuanto al análisis multitemporal, es posible denotar que la parte nororiental del municipio ha experimentado una mayor acumulación de minerales arcillosos con el tiempo. Uno de los minerales arcillosos presentes en estas áreas es la moscovita, un mineral arcilloso común en la zona de estudio y, que además es detrítico (Ingeominas,2005).Dado que un material detrítico se origina a partir de la desintegración y desgaste de rocas preexistentes, incluyendo fragmentos transportados y depositados por agentes naturales como el agua y el viento, es posible que en esta área con aumento de variabilidad arcillosa estén ocurriendo procesos de sedimentación que generen este fenómeno. Además, es plausible que en la zona de interés se estén produciendo procesos hidrotermales, los cuales al presentar temperaturas anómalas, facilitan la interacción de materiales y la formación de nuevos minerales arcillosos (Gaviria, 2013). A pesar que, los minerales arcillosos aportan numerosos beneficios a la fertilidad del suelo (Dogan, 2009), es necesario abordar de manera adecuada la variabilidad arcillosa presente en cada uno de los suelos, puesto que podrían conducir a un problema ambiental a lo largo del tiempo.

Por otro lado, es importante destacar que, aunque no hay una zona más impactada que la previamente descrita, se observa que en las áreas cercanas al perímetro urbano de Ráquira también está aumentando la variabilidad de minerales arcillosos. Esta tendencia se ha detectado

previamente mediante la técnica MSAM, que ha revelado la presencia de diversos minerales arcillosos en estas zonas. El Ministerio de Cultura (2014) señala que las minas de arcilla se encuentran principalmente en las veredas de Pueblo Viejo, Mirque, Torres, Resguardo Occidente y Ollerías, así como en zonas de ladera al oeste del municipio. Por lo tanto, es plausible que los minerales arcillosos presenciados en la zona sean resultados de la actividad minera en estas áreas afectadas. Con el transcurso del tiempo, es probable que estos minerales hayan experimentado procesos de sedimentación que también podrían haber impactado otras áreas del municipio de Ráquira.

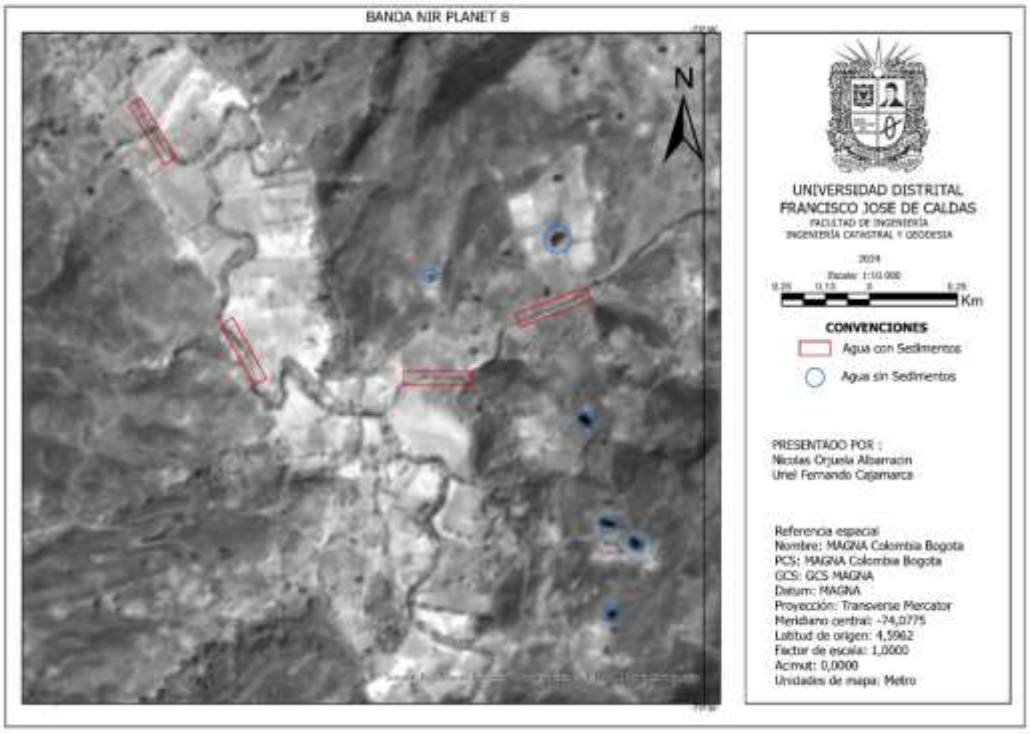


Figura 32: Identificación de cuerpos de Agua
Fuente: *Elaboración Propia Imagen Planet*

La evaluación de la calidad del agua es crucial para la gestión adecuada de los recursos hídricos y la protección del medio ambiente. Los métodos tradicionales de monitoreo del agua,

como la toma de muestras y el análisis de laboratorio, pueden ser costosos y lentos. Las imágenes satelitales ofrecen una alternativa para monitorear la calidad del agua que tan turbia se presenta de manera amplia y eficiente. Para complementar los anteriores análisis se utilizó el análisis de imágenes satelitales para evaluar la calidad del agua en el Río dulce y lagunas adyacentes. Se empleó la banda 8 del sensor Planet, que corresponde al infrarrojo cercano (NIR) ya que el agua tiene una fuerte detección de humedad esta región (Chuvieco,1990), para identificar la presencia de sedimentos.

Los sedimentos en el río dispersan la luz en todas direcciones, reduciendo la cantidad de luz que llega al sensor en la banda NIR. Esto oscurece el color del agua, haciéndola ver gris, esta sedimentación es causada por la explotación de minería cuyos residuos llegan a los ríos o quebradas, Los sedimentos también pueden absorber luz en la banda NIR, especialmente si son de color oscuro. Esto también contribuye a oscurecer el color del agua del río.

Las lagunas o lagos suelen ser más profundos que los ríos. En aguas más profundas, hay más agua absorbiendo la luz, lo que resulta en un color más oscuro, incluso en ausencia de sedimentos. Las lagunas suelen tener menor turbulencia que los ríos. La turbulencia en el agua puede mezclar los sedimentos y hacer que el agua se vea más grisácea. En las lagunas más tranquilas, los sedimentos se sedimentan en el fondo, lo que permite que la luz penetre más profundamente y resulte en un color más oscuro.

8.2. Limitaciones del estudio

Si bien la teledetección hiperespectral ofrece numerosas ventajas para la identificación y caracterización de minerales, también presenta ciertas limitaciones. Una de ellas es la influencia

de factores ambientales y de superficie que pueden alterar la firma espectral de los materiales, como la humedad del suelo, la presencia de vegetación, la rugosidad de la superficie y las sombras proyectadas. Estos factores pueden dificultar la discriminación precisa de los minerales arcillosos y requerir correcciones adicionales.

La cartografía e información científica en Colombia es muy escasa y se encuentra bastante desactualizada, lo que principalmente resulta como una limitación en cuanto a obtener información de temporalidades recientes.

El estudio se basó en firmas espectrales de minerales arcillosos obtenidas de la USGS. Sin embargo, es posible que estas firmas espectrales no representen con exactitud las características específicas de los minerales presentes en el área de estudio. Las variaciones locales en la composición química, la estructura cristalina y las impurezas pueden causar desviaciones en las firmas espectrales reales. Esto podría afectar la precisión de la clasificación y el mapeo de las especies minerales.

Aunque se realizó una validación de los resultados mediante estudios geológicos previos, no se llevaron a cabo campañas de muestreo y análisis de campo en el área de estudio. La recolección de muestras in situ y su posterior análisis en laboratorio podrían proporcionar una validación más robusta de los resultados obtenidos por teledetección.

El análisis de la calidad del agua respecto a la turbidez se realizó utilizando una sola banda del espectro visible (NIR) de imágenes Planet. Si bien esta banda proporciona información sobre la turbiedad del agua, no permite una caracterización completa de otros parámetros de calidad, como la presencia de contaminantes, nutrientes o materia orgánica disuelta. Un análisis más exhaustivo requeriría la recolección de muestras de agua para análisis en laboratorio.

Si bien el estudio identificó posibles impactos ambientales relacionados con la extracción de arcillas y la agricultura intensiva, no se realizaron evaluaciones detalladas de estos impactos. Sería necesario realizar estudios específicos sobre la erosión del suelo, la contaminación de fuentes de agua, la pérdida de biodiversidad y otros aspectos ambientales para comprender completamente las consecuencias de estas actividades.

8.3. SUGERENCIAS PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

1. Adquisición de imágenes hiperespectrales de mayor resolución espacial:

La resolución espacial de 30 metros de la imagen PRISMA puede ser insuficiente para capturar detalles finos o pequeños depósitos de minerales arcillosos. Se sugiere explorar la adquisición de imágenes hiperespectrales de mayor resolución espacial, como las proporcionadas por sensores aerotransportados o satélites de alta resolución, para obtener mapas más detallados de la distribución de las arcillas.

2. Recolección y análisis de muestras de campo:

Realizar campañas de muestreo in situ en el área de estudio y analizar las muestras recolectadas en laboratorio permitiría validar de manera más robusta los resultados obtenidos mediante teledetección. Estos análisis podrían incluir técnicas como difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja y análisis químicos para caracterizar con precisión la composición y estructura de los minerales arcillosos presentes.

3. Desarrollo de una biblioteca espectral local:

Crear una biblioteca espectral de minerales arcillosos específica para el área de estudio podría mejorar la precisión de la clasificación y el mapeo. Esta biblioteca se basaría en el análisis de muestras recolectadas in situ y representaría de manera más precisa las características espectrales de los minerales presentes en la región.

4. Integración de datos multisensor:

Combinar los datos hiperespectrales con otras fuentes de información, como imágenes multiespectrales, datos de radar o modelos digitales de elevación, podría proporcionar una comprensión más completa de las características del terreno y mejorar la precisión del mapeo de minerales arcillosos.

5. Análisis de parámetros de calidad de agua adicionales:

Además de la evaluación de la turbiedad utilizando la banda NIR, se sugiere explorar técnicas para analizar otros parámetros de calidad de agua, como la presencia de contaminantes, nutrientes o materia orgánica disuelta. Esto podría involucrar el uso de imágenes multiespectrales, la aplicación de índices espectrales específicos o la integración de datos in situ.

6. Evaluación de impactos ambientales detallados:

Realizar estudios específicos sobre la erosión del suelo, la contaminación de fuentes de agua, la pérdida de biodiversidad y otros aspectos ambientales relacionados con la extracción de arcillas y la agricultura intensiva. Estos estudios podrían incluir el monitoreo de la calidad del suelo, el análisis de sedimentos en cuerpos de agua, la evaluación de la vegetación y la fauna, entre otros.

7. Colaboración interdisciplinaria:

Fomentar la colaboración entre diferentes disciplinas, como la geología, la minería, la agricultura, la hidrología y la ecología, para abordar de manera integral los desafíos relacionados con la extracción de arcillas y sus impactos ambientales. Esta colaboración interdisciplinaria podría conducir a soluciones más sostenibles y a una mejor comprensión de las complejas interacciones entre los procesos naturales y las actividades humanas.

9. CONCLUSIONES

En el transcurso de esta investigación, se logró identificar ocho minerales arcillosos predominantes en el municipio de Ráquira: caolinita, illita-esmectita, pirofilita, vermiculita, moscovita, montmorillonita, dickita y clorita. Estos minerales se encuentran distribuidos en diversas áreas del municipio y su presencia está estrechamente relacionada con las formaciones geológicas de la región, particularmente las formaciones Simití y Churuvita. Además, se evidenció que la composición y distribución de estos minerales es el resultado de procesos geológicos complejos, como la diagénesis, la alteración hidrotermal y la sedimentación a lo largo del tiempo.

Sin embargo, uno de los principales retos enfrentados durante esta etapa fue la limitada disponibilidad de información actualizada y detallada sobre la geología local y la mineralogía de la zona de estudio. La mayoría de los estudios previos son relativamente antiguos y, en algunos casos, la información disponible era escasa o incompleta. Esto dificultó la comprensión integral de los procesos geológicos y las condiciones ambientales que dieron lugar a la formación y distribución de los minerales arcillosos. La recopilación de firmas espectrales de los minerales

arcillosos fue una etapa crucial para el desarrollo de este estudio. Se obtuvieron firmas espectrales de ocho tipos de arcillas a partir de la base de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Estas firmas espectrales sirvieron como referencia para la posterior identificación y clasificación de los minerales en las imágenes hiperespectrales.

No obstante, uno de los desafíos enfrentados fue la posible divergencia entre las firmas espectrales recopiladas y las características espectrales reales de los minerales presentes en la zona de estudio. Las firmas espectrales pueden variar debido a factores locales, como la composición química, la estructura cristalina y la presencia de impurezas, lo que podría afectar la precisión de la clasificación. Para abordar esta limitación, se sugiere el desarrollo de una biblioteca espectral local basada en el análisis de muestras recolectadas directamente en el área de estudio. Esta biblioteca espectral personalizada podría representar de manera más precisa las características espectrales únicas de los minerales arcillosos presentes en la región de Ráquira.

La aplicación de la metodología MSAM fue fundamental para obtener una clasificación detallada de los minerales arcillosos presentes en el municipio de Ráquira. Esta técnica permitió comparar las firmas espectrales de los píxeles de la imagen hiperespectral con las firmas espectrales de referencia recopiladas, y así identificar y mapear la distribución de cada tipo de arcilla en función de su coincidencia espectral. Sin embargo, uno de los principales desafíos enfrentados durante esta etapa fue la adquisición de imágenes hiperespectrales de alta calidad y resolución adecuada. Las imágenes hiperespectrales son costosas y su disponibilidad puede ser limitada en algunas regiones.

La validación de los resultados obtenidos mediante teledetección fue una etapa crucial para garantizar la confiabilidad y relevancia del estudio. Se realizó una revisión exhaustiva de documentos técnicos y estudios previos relacionados con la geología y mineralogía de la zona de

Ráquira. Esta revisión permitió corroborar la presencia y distribución de los minerales arcillosos identificados, así como comprender los procesos geológicos que dieron lugar a su formación. No obstante, uno de los desafíos enfrentados fue la limitada disponibilidad de información actualizada y detallada sobre la zona de estudio. Muchos de los estudios consultados eran relativamente antiguos o se centraban en áreas geográficas más amplias, lo que dificultaba la validación precisa de los resultados obtenidos a nivel local.

10. BIBLIOGRAFÍA

A. Camacho-Velasco, C. A. Vargas-García, F. A. Rojas-Morales, S. F. Castillo-Castelblanco & H. Arguello- Fuentes, "Aplicaciones y retos del sensado remoto hiperespectral en la geología colombiana", Fac. Ing., vol.24 (40), pp. 17–29, Sep.-Dic. 2015.

Agencia Espacial Italiana. (2021). PRISMA Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD).

Alcaldía de Ráquira. (2004). Esquema de Ordenamiento Territorial de Ráquira (Acuerdo Municipal No. 004 de 2004). https://repositoriocdim.esap.edu.co/bitstream/handle/123456789/11010/59561.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Aranda, J., Ojeda, G., & Orrillo, J. M. P. (2023). Desarrollo y configuración de los depósitos aluviales en el piedemonte occidental de la sierra de San Luis, Sierras Pampeanas de San Luis, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, *30*(2), 115-138.

Bailey, S. W. (1988). _Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas)._ Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 19(1), 311-358.

Bhattacharya, R. K., Das Chatterjee, N., & Das, K. (2019). Geomorphic response to riverine land cover dynamics in a quarried alluvial river Kangsabati, South Bengal, India. *Environmental Earth Sciences*, *78*, 1-18.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing (5ª ed., p. 131). Guilford Press.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing (5ª ed., p. 200). Guilford Press.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing (5ª ed., p. 309). Guilford Press.

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to Remote Sensing (5ª ed., p. 327). Guilford Press.

Carvalho, O., & Meneses, P. (n.d.). Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improvement on the Spectral Angle Mapper (SAM). https://aviris.jpl.nasa.gov/proceedings/workshops/00_docs/Osmar_1_carvalho__web.pdf

Center for Space Research. (n.d.). https://www.csr.utexas.edu/projects/rs/hrs/analysis.html.

Céspedes Prieto, N. E. (2014). Valoración de minerales arcillosos del departamento de Boyacá (Colombia) para la producción de materiales cerámicos.

Chakravarty, S., Paikaray, B. K., Mishra, R., & Dash, S. (2021, December). Hyperspectral image classification using spectral angle mapper. In 2021 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE) (pp. 87-90). IEEE.

Chuvieco, E. (199). Fundamentos de teledetección espacial. *Estudios Geográficos*, *52*(203), 371.

Clark, R. N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In Manual of remote sensing, (Vol. 3, pp. 3-58). John Wiley and Sons.

Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). _An introduction to the rock-forming minerals_. Harlow: Longman Scientific & Technical. De Diagnostico, E. D. L. E., Formulación, P. Y., & De Diagnostico, I. D. L. F. Cuenca Río Alto Suárez 2401-10.

Dogan, H. M. (2009). Mineral composite assessment of Kelkit River Basin in Turkey by means of remote sensing. *Journal of Earth System Science*, *118*, 701-710.

Esri. (n.d.). Aproximación Metodologica. https://proceedings.esri.com/library/userconf/latinproc00/colombia/aproximacion_metodologica.pdf.

Fito, J. E. (2007). Caracterización geomorfológica de diversos depósitos coluviales localizados en la cabecera del río Oiartzun (Gipuzkoa). *Lurralde*, *30*, 95-107.

Fundamentos de la Teledetección (Percepción Remota). (n.d.). https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2023-03/Fundamentals_of_RS_Span.pdf.

Gaviria, S., Sarmiento, G., & Sánchez, M. (2013). Minerales arcillosos marcadores de procesos termodinámicos en niveles lodolíticos del Cretáceo Inferior, región de Ráquira, Boyacá, Cordillera Oriental de Colombia. *Geología Colombiana*, *37*, 63-75.

Giancoli, D. C. (2008). Física: Principios con Aplicaciones (6ª ed., p. 677). Pearson Educación.

Godoy, S. E. C., Cozzi, G., Ubaldón, M. C., Donnari, E., & Wright, E. M. Detección De Zeolitas Con Aster En Piedra Parada-La Buitrera, Río Chubut Medio, Provincia Del Chubut. *Serie Correlación Geológica*, *33*(1-2), 61-72.

Gopinath, G., Sasidharan, N., & Surendran, U. (2020). Landuse classification of hyperspectral data by spectral angle mapper and support vector machine in humid tropical region of India. Earth Science Informatics, 13, 633-640.

Guanter, L.; Richter, R.; Kaufmann, H. On the application of the MODTRAN4 atmospheric radiative transfer code to optical remote sensing. Int. J. Remote Sens. 2009, 30, 1407–1424

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2001). Fundamentos de Física (6ª ed., vol. 2, p.). Wiley.

Herrera, J. (N.D.). SENSORAMIENTO REMOTO SATELITAL. Https://Repositorio.Utb.Edu.Co/Bitstream/Handle/20.500.12585/2528/0043142.Pdf?Sequence=1.

Hewitt, P. G. (2004). Física Conceptual (9ª ed., p. 572). Addison-Wesley.

Hewitt, P. G. (2004). Física Conceptual (9ª ed., p. 577). Addison-Wesley.

Hewitt, P. G. (2004). Física Conceptual (9ª ed., p. 578). Addison-Wesley

INGEOMINAS.2005. Geología regional de la plancha 190, Chiquinquirá. Informe final.

INGEOMINAS.2005. Geología regional de la plancha 190, Chiquinquirá.

Instituto Colombiano de Geología y Minería Ingeominas. (n.d.). Introduccion a la Percepcion Remota y sus ... https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008002524448/documento/pdf/2105244481102000.pdf.

Ismail, R. R., Al-Abudi, B. Q., & Hussein, Z. F. (2020). Land cover change detection using satellite images based on modified spectral angle mapper method.

King, M. D., W. P. Menzel, P. S. Grant, J. S. Myers, G. T. Arnold, S. E. Platnick, L. E. Gumley, S. C. Tsay, C. C. Moeller, M. Fitzgerald, K. S. Brown, and F. G. Osterwisch, (1996). Airborne scanning spectrometer for remote sensing of cloud, aerosol, water vapor and surface properties, J. Atmos. Oceanic Technology, 13, 777-794.

Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. W., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., & Goetz, A. F. (1993). The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. Remote sensing of environment, 44(2-3), 145-163.

La Resolución Espacial - NASA applied science. (n.d.-b). https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/EO4IM_Session_2_Espanol.pdf.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7ª ed., p. 285). Wiley.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7ª ed., p. 286). Wiley.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote Sensing and Image Interpretation (7ª ed., p. 583). Wiley.

Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., & Moran, E. (2004). Change detection techniques. International journal of remote sensing, 25(12), 2365-2401.

Lupinacci, C. M., da Conceição, F. T., & Paschoal, L. G. (2022). Geomorphic responses due to the second-largest global producer of ceramic tiles in the State of São Paulo, Brazil. *Catena*, *218*, 106550.

Meima, J. A., & Rammlmair, D. (2020). Investigation of compositional variations in chromitite ore with imaging Laser Induced Breakdown Spectroscopy and Spectral Angle Mapper classification algorithm. Chemical Geology, 532, 119376.

Ministerio de Cultura. 2014. Ráquira de la olla a la casa, los cuadernos del barro.

Nakajima, T. and M. D. King (1990). Determination of the optical thickness and effective particle radius of clouds from reflected solar radiation measurements. Part I: Theory. J. Atmos. Sci., 47, 1878-1893

NumPy documentation#. NumPy documentation - NumPy v1.26 Manual. (n.d.). https://numpy.org/doc/stable/#numpy-documentation

OS - miscellaneous operating system interfaces. Python documentation. (n.d.-a). https://docs.python.org/3/library/os.html

Osorio, G. E. B., Pérez, G. A. S., & Melo, S. G. (2011). Proveniencia y transformacion diagenética de minerales arcillosos Del Maastrichtiano-Paleoceno al norte de Bogotá, Cordillera Oriental de Colombia. *Geología Colombiana*, *36*, 179-196.

Pandas documentation#. pandas documentation - pandas 2.2.2 documentation. (n.d.). https://pandas.pydata.org/docs/

Parodi, M. S., Suarez, C. J. O., JARABA, D. C. M., Peralta, L. C. L., & Martínez, E. E. R. (2023). Caracterización y determinación del uso del depósito aluvial ubicado en la cantera Las Lomitas, corregimiento de Zambrano, La Guajira, Colombia. Prospectiva, 21(1).

Pathlib - object-oriented filesystem paths. Python documentation. (n.d.-b). https://docs.python.org/3/library/pathlib.html

Percepción Remota. Geomatik sin Fronteras. (2017, October 10). https://geomatiksinfronteras.wordpress.com/percepcion-remota/.

Rashmi, s, & Swapna, A. (n.d.). Spectral Angle Mapper algorithm for remote sensing ... https://www.ijiset.com/v1s4/IJISET_V1_I4_27.pdf

Resolución espacial en Teledetección y Sus Usos Reales. EOS Data Analytics. (2024a, January 25). https://eos.com/es/blog/resolucion-espacial/.

Ramos Organillo, F. J. Análisis de imágenes satelitales LANDSAT 8 por componentes principales para identificación de zonas con mineralización por carbonatos de cobre en la región de Jolalpan, Puebla.

Richards, J. A. (2013). Remote sensing digital image analysis: an introduction. Springer Science & Business Media.

Sabins, F. F. (1997). Remote Sensing: Principles and Interpretation (3ª ed., p. 67). W. H. Freeman.

Sabins, F. F. (1997). Remote Sensing: Principles and Interpretation (3ª ed., p. 147). W. H. Freeman.

Sabins, F. F. (1997). Remote Sensing: Principles and Interpretation (3ª ed., p. 197). W. H. Freeman.

Schowengerdt, R. A. (2007). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3ª ed., p. 62). Academic Press.

Schowengerdt, R. A. (2007). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3ª ed., p. 199). Academic Press.

Schowengerdt, R. A. (2007). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3ª ed., p. 211). Academic Press.

Schowengerdt, R. A. (2007). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing (3ª ed., p. 327). Academic Press.

Scipy documentation#. SciPy documentation - SciPy v1.13.0 Manual. (n.d.). https://docs.scipy.org/doc/scipy/

Secretaria de Marina- Armada México. (n.d.). Percepción Remota. https://2006-2012.semar.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html.

Serna, F. E. (1968). El Sistema Cretáceo en la región de Villa de Leiva y zonas próximas. *Geología Colombiana*, *5*, 5-74.

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). Física para Ciencias e Ingeniería (6ª ed., vol. 2, p. 1068). Thomson Learning.

Sinaice, B. B., Owada, N., Ikeda, H., Toriya, H., Bagai, Z., Shemang, E., ... & Kawamura, Y. (2022). Spectral angle mapping and AI methods applied in automatic identification of Placer deposit magnetite using multispectral camera mounted on UAV. Minerals, 12(2), 268.

Spectral Angle Mapper classification. (n.d.). https://envi.geoscene.cn/help/Subsystems/envi/Content/FindFeatures/Classification/ClassificationTools/SpectralAngleMapper.html.

Teledetección: Tipos y aplicaciones de los sensores Remotos. EOS Data Analytics. (2024, January 22). https://eos.com/es/blog/teledeteccion/.

Tema 1 - Fundamentos Físicos de la Teledetección. (n.d.-b). https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema01.pdf.

Tso, B., & Mather, P. M. (2009). Classification methods for remotely sensed data. CRC press.

Universidad de Guanajuato. (2023, August 15). Clase Digital 3. Conceptos Básicos de la Teledetección y los elementos de un proceso de teledetección. Recursos Educativos Abiertos. https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-3-conceptos-basicos-de-la-teledeteccion-y-los-elementos-de-un-proceso-de-teledeteccion/.

Using matplotlib#. Using Matplotlib - Matplotlib 3.8.4 documentation. (n.d.). https://matplotlib.org/stable/users/index

Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G. A., ... & Wald, L. (2015). A critical comparison among pansharpening algorithms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(5), 2565-2586.

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2009). Física Universitaria (12ª ed., vol. 2, pp. 1219-1220). Pearson Educación.

Welcome to spectral python (spy). Welcome to Spectral Python (SPy) - Spectral Python 0.21 documentation. (n.d.). https://www.spectralpython.net/

Wang, M., Huang, Z., Zhang, X., Zhang, Y., & Chen, M. (2021). Altered mineral mapping based on ground-airborne hyperspectral data and wavelet spectral angle mapper tri-training model: Case studies from Dehua-Youxi-Yongtai Ore District, Central Fujian, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *102*, 102409.

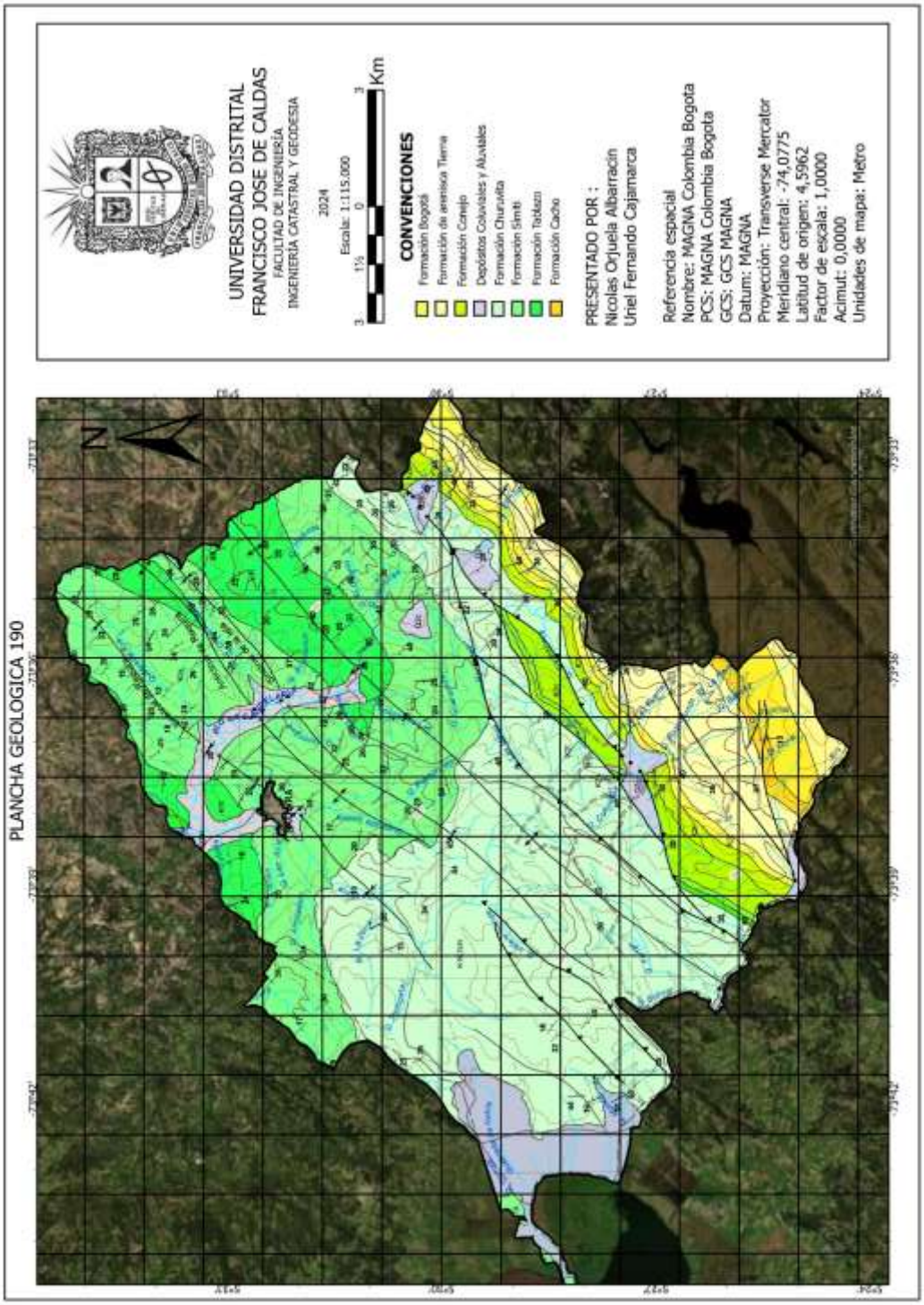
Woo, H., Acuna, M., Madurapperuma, B., Jung, G., Woo, C., & Park, J. (2021). Application of maximum likelihood and spectral angle mapping classification techniques to evaluate forest fire severity from UAV multi-spectral images in South Korea. Sensors and Materials, 33(11), 3745-3760.

Zhou, Y., Liu, H., He, B., Yang, X., Feng, Q., Kutser, T., ... & Kou, J. (2021). Secchi Depth estimation for optically-complex waters based on spectral angle mapping-derived water classification using Sentinel-2 data. International Journal of Remote Sensing, 42(8), 3123-3145.

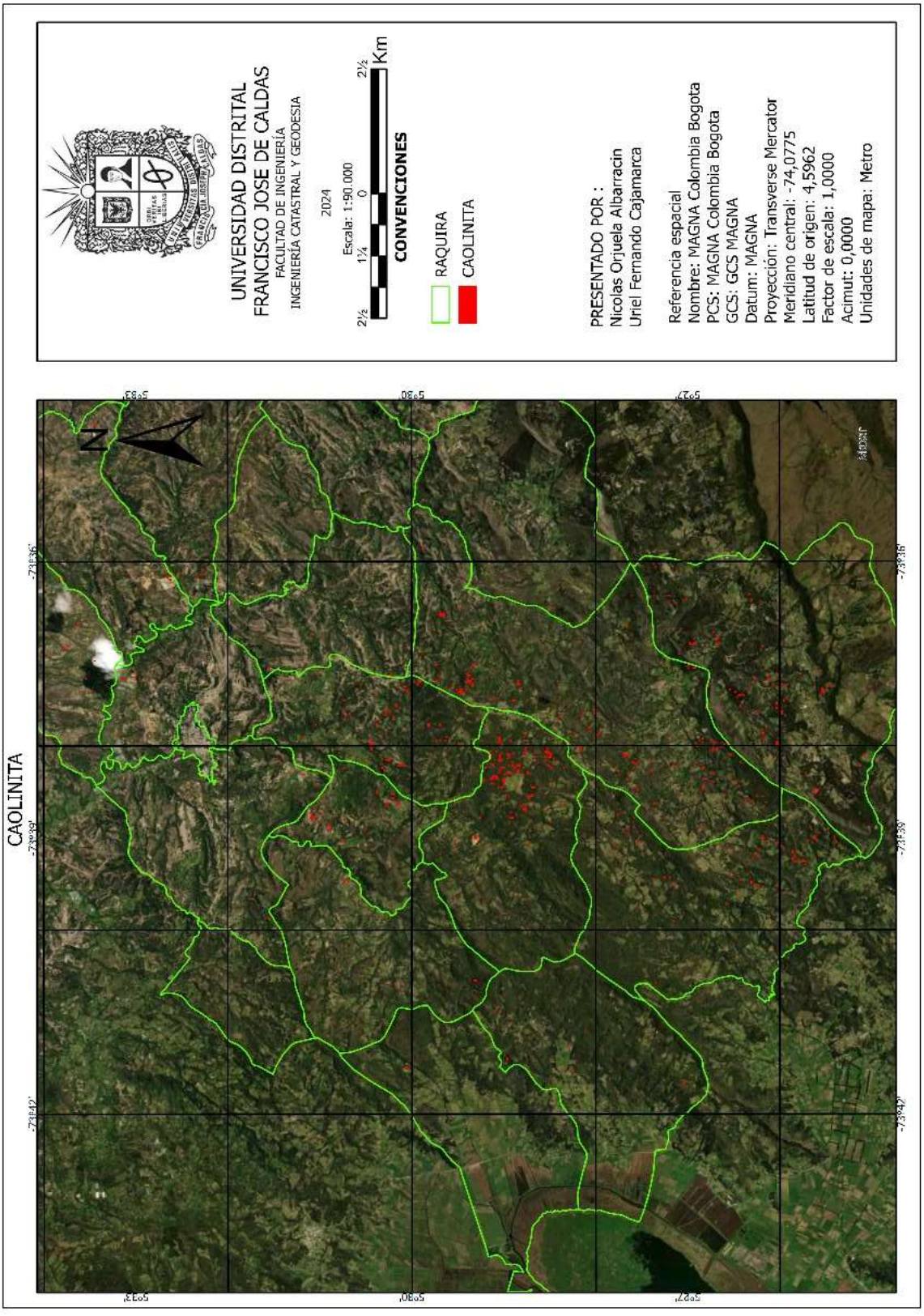
Çan, T., Tekin, S., Traore, M., & Kumsar, H. (2020). Land Use Change Detection in Denizli City Center Using spectral angle mapper method and evaluations in terms of some earth science data. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(8), 1360-1364.

11. Anexos

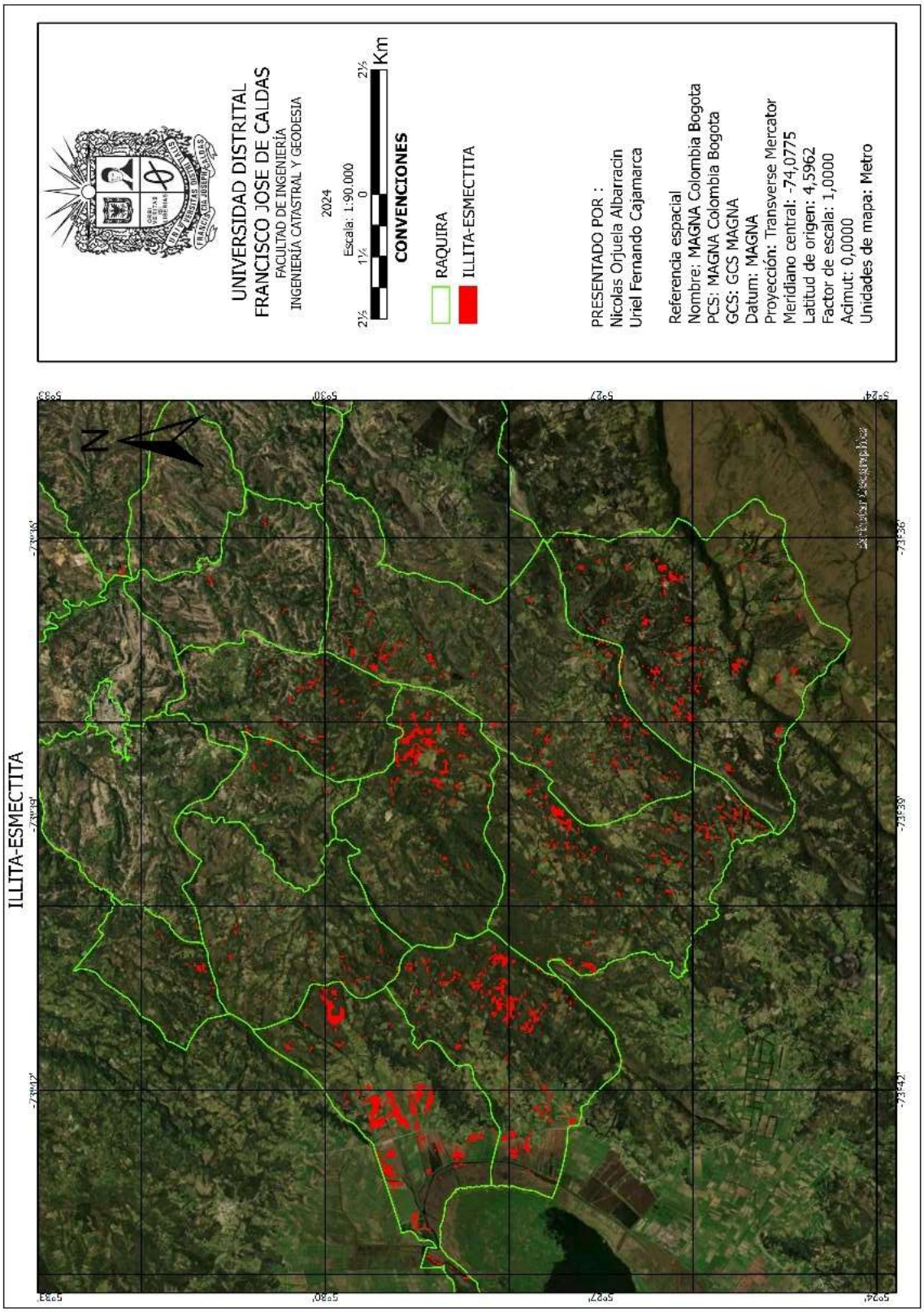
11.1. Mapa geológico del municipio de Ráquira



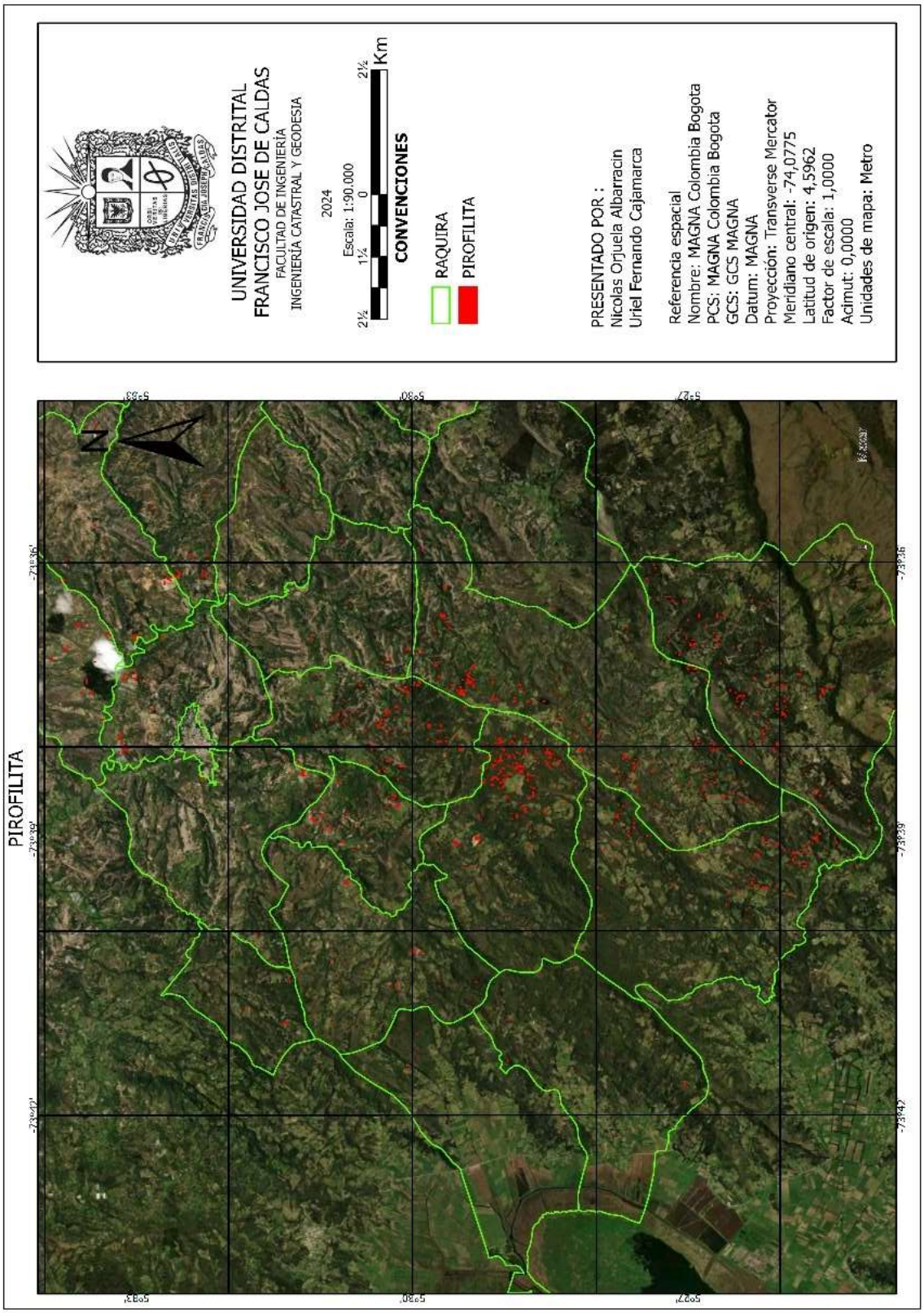
11.2. Mapa de Distribución de Caolinita



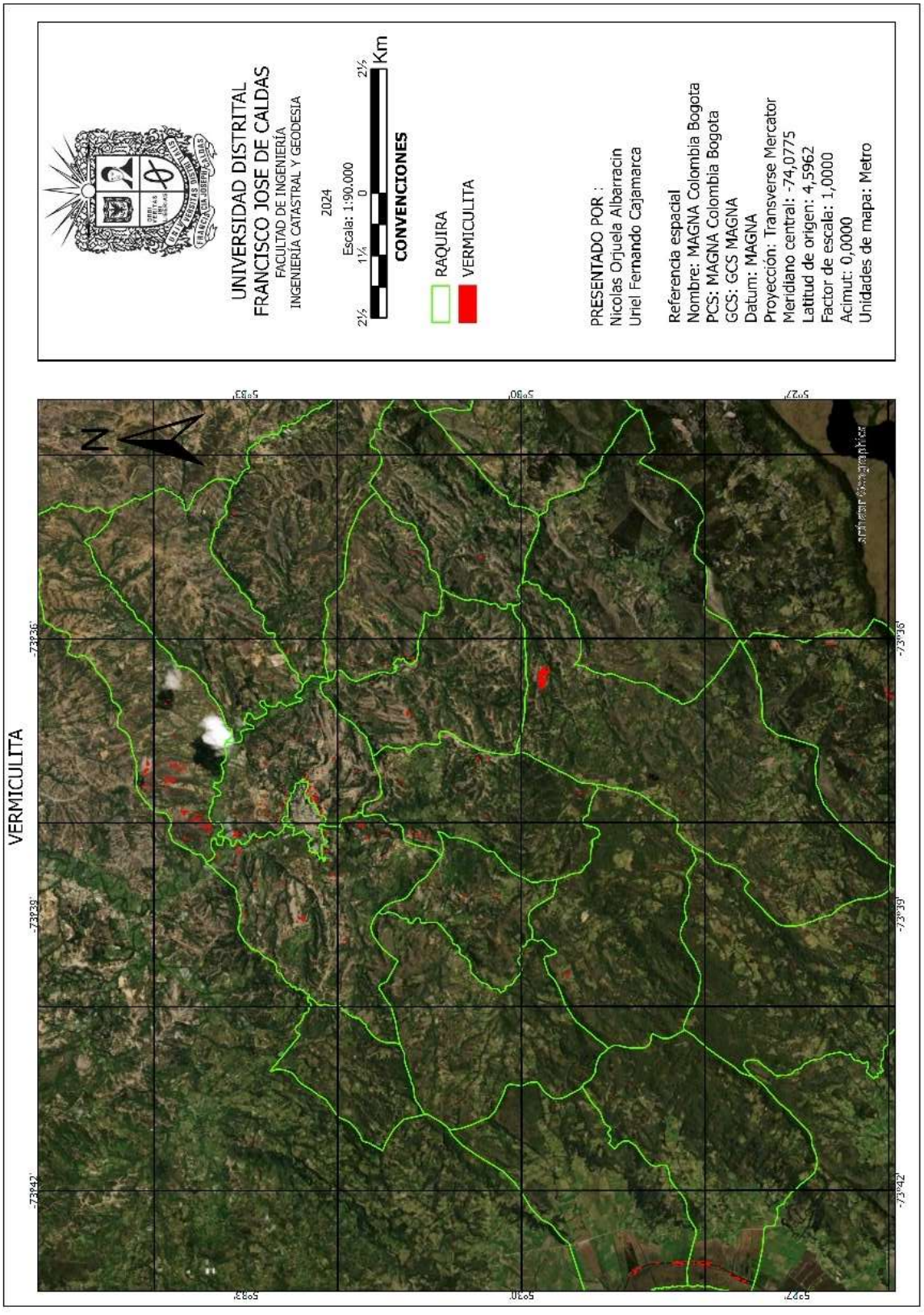
11.3. Mapa de Distribución de Illita-Esmectita



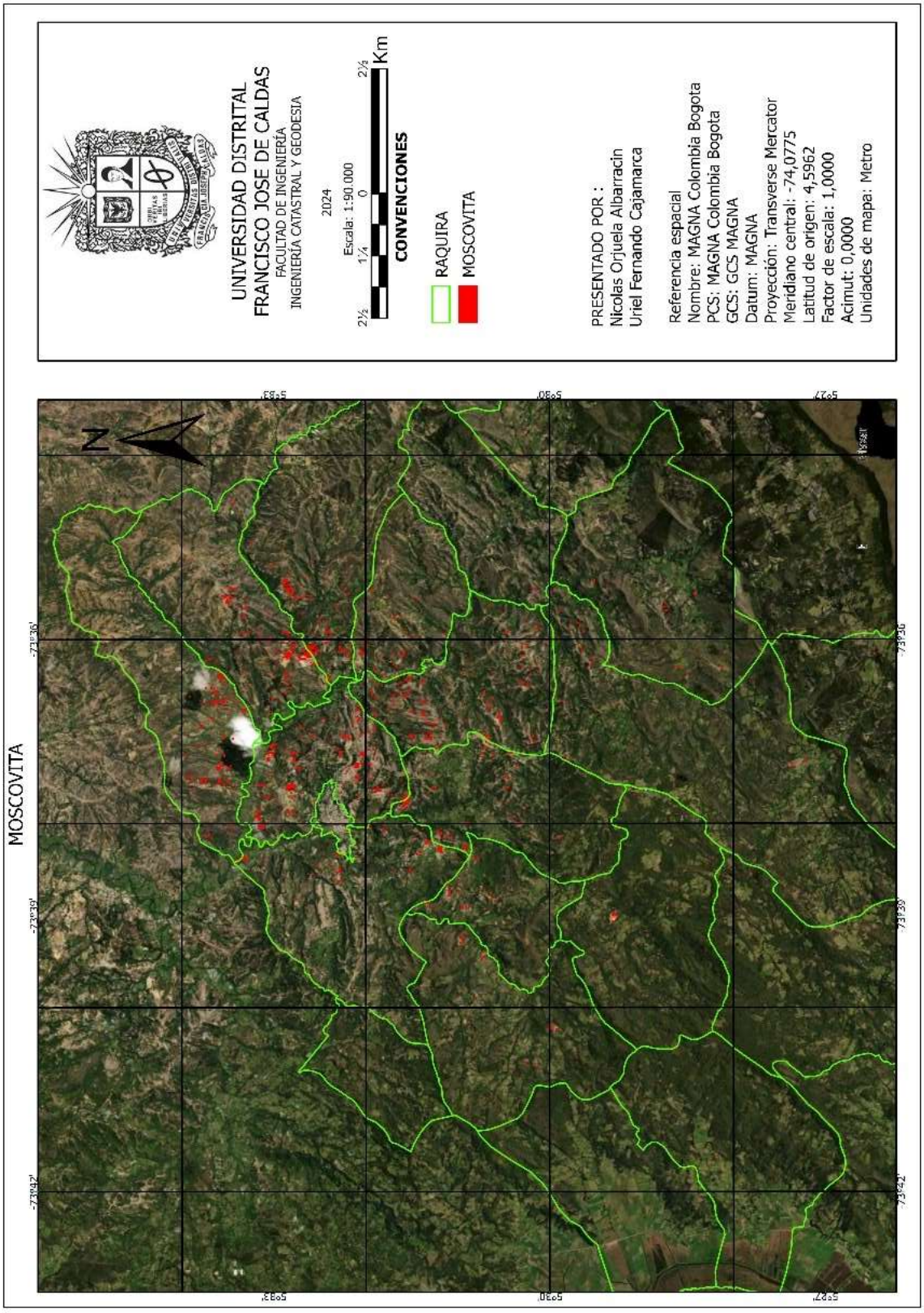
11.4. Mapa de Distribución de Pirofilita



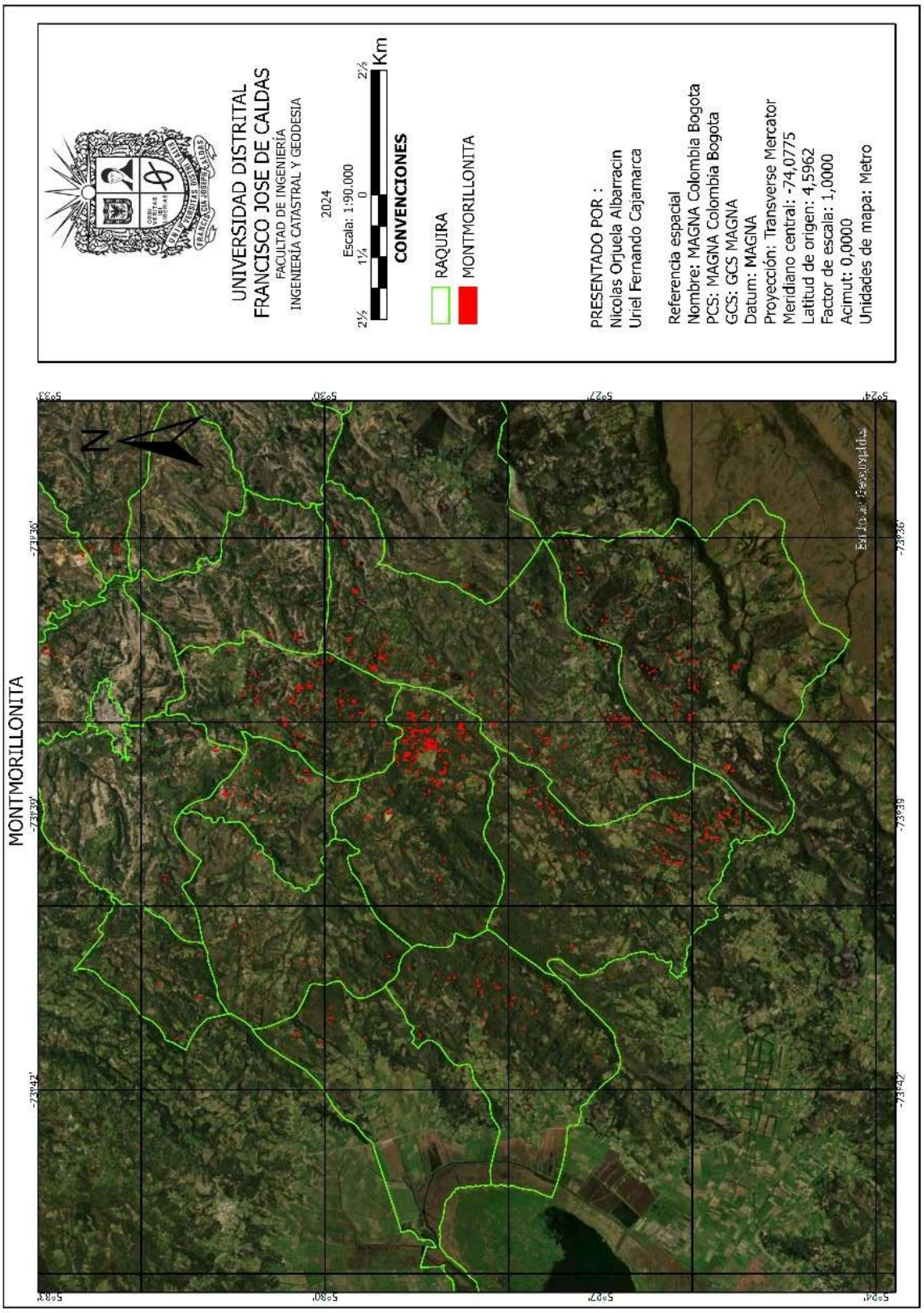
11.5. Mapa de Distribución de Vermiculita



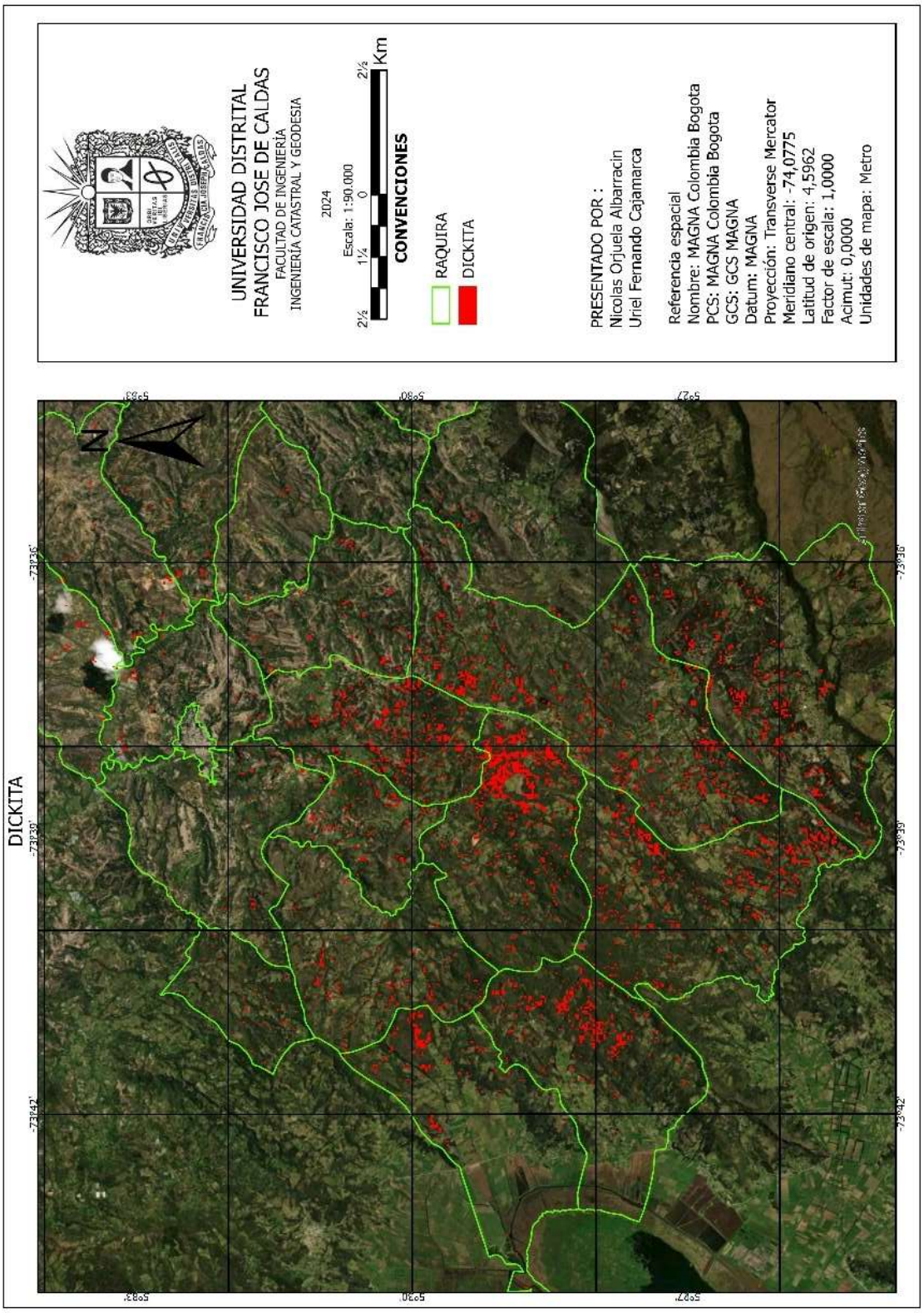
11.6. Mapa de Distribución de Moscovita



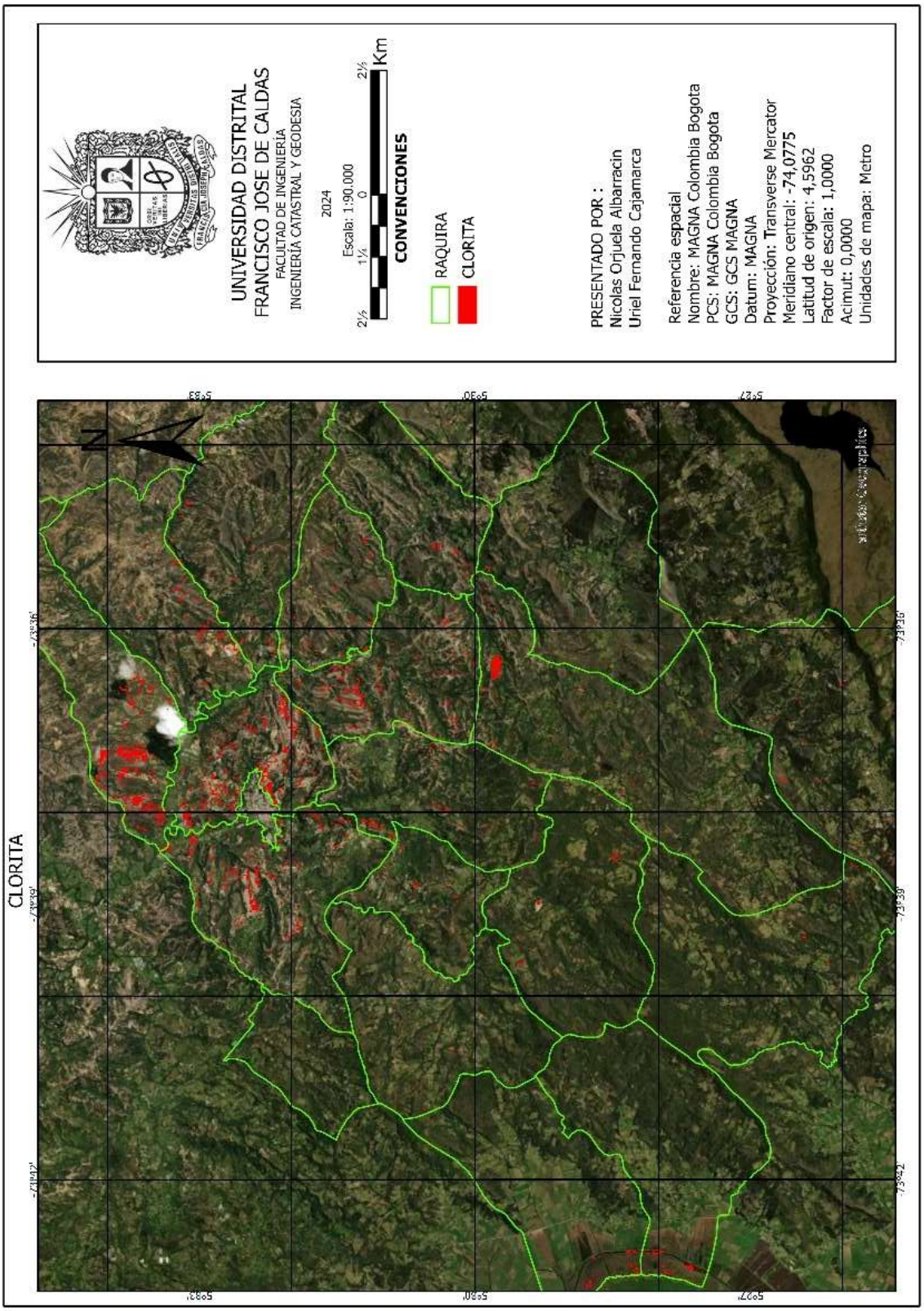
11.7. Mapa de Distribución de Montmorillonita



11.8. Mapa de Distribución de Dickita



11.9. Mapa de Distribución de Clorita



11.10. Glosario de acrónimos

USGSS - United States Geological Survey. Es una agencia científica del gobierno de los Estados Unidos encargada de estudiar el paisaje de los EE. UU., sus recursos naturales y los peligros naturales que lo amenazan.

MSAM - Modified Spectral Angle Mapper. Es una técnica utilizada en el procesamiento de imágenes satelitales para comparar firmas espectrales y clasificar los materiales presentes en una escena.

SIG - Sistemas de Información Geográfica. Herramientas que permiten la captura, almacenamiento, análisis y presentación de datos referenciados espacialmente.

SWIR - Short Wave Infrared. Se refiere a la parte del espectro infrarrojo que cubre longitudes de onda entre 1.4 y 3 micrómetros, utilizado en imágenes hiperespectrales para detectar materiales y minerales.

ASI - Agencia Espacial Italiana. Es la organización gubernamental responsable del desarrollo espacial en Italia, proporcionando datos satelitales y colaborando en investigaciones científicas.

Percepción Remota: Disciplina que permite adquirir información sobre la superficie terrestre a través de sensores en plataformas aéreas o espaciales, sin contacto físico directo. Es fundamental para el estudio de recursos naturales y el medio ambiente.

Radiación Electromagnética: Energía que se propaga en forma de ondas electromagnéticas, generada por la oscilación de campos eléctricos y magnéticos. Es esencial en la teledetección.

Espectro Electromagnético: Rango de todas las longitudes de onda posibles de radiación electromagnética, que incluye desde ondas de radio hasta rayos gamma. Se divide en varias regiones con propiedades y aplicaciones específicas.

Firmas Espectrales: Patrones característicos de reflectancia o emisión de radiación electromagnética de diferentes materiales u objetos según la longitud de onda. Son esenciales para identificar diferentes tipos de cubiertas terrestres.

Sensores Activos: Dispositivos que emiten radiación electromagnética y miden la radiación reflejada o dispersada por los objetos en la superficie terrestre. Ejemplos incluyen radares y lidar.

Sensores Pasivos: Dispositivos que detectan la radiación electromagnética natural emitida o reflejada por los objetos en la superficie terrestre, sin generar su propia señal.

Resolución Espacial: Grado de detalle visible en una imagen satelital o aérea, que depende de la capacidad del sensor para distinguir objetos cercanos en el espacio.