



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Teledetección espacial mediante la aplicación de  
imágenes satelitales tipo ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI  
y SENTINEL 2 en zonas de alteración hidrotermal”**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO EN MINAS**

**Autor:**

**IVÁN ISRAEL MOGROVEJO BARRERA**

**Director:**

**ING. VÍCTOR OMAR DELGADO INGA**

**CUENCA – ECUADOR**

**2021**



## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado de manera especial a mis padres Iván y Martha que siempre me han inculcado la Fe en Dios, me han sabido motivar y apoyar a pesar de las dificultades que hemos atravesado.

A mis hermanos William, Gabriela, María José y Belén por siempre ser mi motivo de alegría, por siempre estar junto a mí apoyándome en cada paso de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios principalmente por regalarme la salud, inteligencia y discernimiento para poder afrontar con rectitud y valentía todos los días de mi vida.

A mis padres y hermanos, especialmente a mi hermano William quien siempre me ha apoyado incondicionalmente a superar cada prueba y cada meta que me he planteado en la vida.

A los profesores de la Escuela de Minas que durante mi vida estudiantil supieron apoyarme e impartirme sus conocimientos. De manera especial quiero agradecer al Dr. Juan Calderón y al Ing. Leonardo Núñez que siempre me inculcaron a hacer los proyectos con responsabilidad y entrega, además de siempre motivarme a la investigación y a la constante innovación.

Al Ing. Omar Delgado Inga, mi director de tesis, por su motivación, paciencia y su apoyo incondicional en la guía y realización de este trabajo.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	i
AGRADECIMIENTOS .....	ii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS .....	x
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1 .....	3
GENERALIDADES .....	3
1.1 Ubicación .....	3
1.2 Geología Regional .....	4
1.2.1 Estructura Regional .....	7
1.3 Geología Local .....	8
1.3 Geomorfología .....	11
1.4 Hidrografía .....	12
1.5 Metalogenia .....	12
CAPÍTULO 2 .....	15
MARCO TEÓRICO .....	15
2.1 Alteración hidrotermal .....	15
2.1.1 Factores que controlan la alteración hidrotermal .....	15
2.1.2 Procesos resultantes de la alteración hidrotermal .....	16
2.1.3 Tipos de alteración hidrotermal .....	17
2.2 Fundamentos de Teledetección .....	18
.....	20
2.2.1 Energía electromagnética .....	21
2.2.2 Espectro electromagnético .....	23
2.2.3 Interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera .....	25
2.2.4 Interacciones de la energía electromagnética con las superficies .....	26
2.3 Teoría general de los sensores pasivos .....	27
2.3.1 Resolución de los sensores pasivos .....	28
2.4 Imágenes satélite de sensores pasivos .....	29
2.4.1 ASTER L1T .....	29
2.4.2 SENTINEL 2 .....	31

2.4.3 LANDSAT 8.....	32
2.5 Aplicación de la teledetección en la identificación de zonas de alteración hidrotermal. ....	32
2.5.1 Espectroscopia de reflectancia aplicada. ....	32
2.5.2 Mecanismos de absorción. ....	33
2.5.3 Procesos vibracionales. ....	34
2.5.4 Rasgos espectrales (Firmas espectrales). ....	34
2.5.5 Componentes de las firmas espectrales. ....	35
2.5.6 Espectrometría de reflectancia de minerales de alteración hidrotermal	37
2.5.7 Comportamiento espectral de minerales típicos de alteraciones hidrotermales .....	37
2.5.8 Química de los minerales.....	39
CAPÍTULO 3 .....	42
METODOLOGÍA .....	42
3.1 Tratamiento digital de imágenes satélite. ....	42
3.2 Procesamiento de datos .....	42
3.2.1 Composición de imágenes en color natural .....	42
3.2.2 Preprocesamiento para las imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI, SENTINEL 2.....	43
3.3 Construcción de máscaras. ....	47
3.4 Procesamiento de imágenes satelitales.....	50
3.4.1 Combinaciones RGB. ....	50
3.4.2 Cocientes de bandas.....	52
3.4.3 Índices de identificación litológica SWIR (Índices de Ninomiya). (Exclusivo de ASTER) .....	54
3.4.4 Análisis de componentes principales (ACP) .....	55
3.4.5 Mapeo espectral SAM .....	59
3.5. Muestreo digital para la identificación de zonas de alteración hidrotermal. ....	59
3.5.1 Análisis de las firmas espectrales .....	59
3.6 Clasificación SAM .....	69
CAPÍTULO 4 .....	70
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	70
4.1 Análisis visual preliminar de las imágenes satelitales en color natural. ....	70
4.2 Generación de información temática de zonas de alteración hidrotermal...	72
4.3 Composición en falso color RGB.....	74

4.4 Cocientes de bandas .....	75
4.4.1 ASTER.....	75
4.4.2 LANDSAT 8 OLI .....	76
4.4.3 SENTINEL 2 .....	76
4.5 Índices de identificación litológica SWIR.....	77
4.6 Análisis de componentes principales .....	78
4.6.1 ASTER L1T .....	78
4.6.2 LANDSAT 8 OLI .....	81
4.6.3 SENTINEL 2 .....	82
4.7 Mapeo espectral SAM .....	83
4.7.1 ASTER.....	83
4.7.2 LANDSAT 8 OLI. ....	89
4.7.3 SENTINEL 2. ....	96
4.8 Zonas de interés prospectivo .....	102
4.8.1 ASTER LIT.....	103
4.8.2 LANDSAT 8 OLI .....	105
4.8.3 SENTINEL 2 .....	106
CONCLUSIONES .....	107
RECOMENDACIONES .....	109
REFERENCIAS .....	110

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Mapa de Ubicación de la zona de estudio .....	4
<b>Figura 1.2.</b> Mapa Geológico Cordillera Occidental del Ecuador Entre 3° - 4°S ...	6
<b>Figura 1.3.</b> Mapa de estructuras geológicas del Distrito Minero Zaruma- Portovelo. ....	8
<b>Figura 1.4.</b> Mapa Litológico de la zona de estudio.....	10
<b>Figura 1.5.</b> Mapa Geomorfológico de la zona de estudio .....	11
<b>Figura 1.6.</b> Mapa hidrológico de la zona de estudio .....	12
<b>Figura 1.7.</b> Mapa de la metalogenia de los Andes Ecuatorianos .....	14
<b>Figura 2.1.</b> Componentes de la teledetección .....	20
<b>Figura 2.2.</b> Tipos de radiación por las cuales se da la teledetección .....	21
<b>Figura 2.3.</b> Esquema de una onda electromagnética.....	23
<b>Figura 2.4.</b> Principales bandas espectrales que contiene el espectro electromagnético .....	24
<b>Figura 2.5.</b> Principales ventanas atmosféricas .....	26
<b>Figura 2.6.</b> Ventanas atmosféricas adecuadas para la observación de la tierra desde el espacio.....	26
<b>Figura 2.7.</b> Tipos de reflexión.....	27
<b>Figura 2.8.</b> Tipos de sensores remotos para teledetección.....	28
<b>Figura 2.9.</b> Descripción de las bandas ASTER L1T .....	30
<b>Figura 2.10.</b> Descripción de las bandas de SENTINEL 2.....	31
<b>Figura 2.11.</b> Descripción de las bandas LANDSAT 8 OLI .....	32
<b>Figura 2.12.</b> Características de absorción de los minerales. ....	34
<b>Figura 2.13.</b> Componentes de una firma espectral.....	35
<b>Figura 2.14.</b> Rangos mayores de absorción. ....	36
<b>Figura 2.15.</b> Principales rasgos de absorción de los minerales.....	36
<b>Figura 2.16.</b> Firmas espectrales de minerales .....	38
<b>Figura 2.17.</b> Resumen de los minerales activos en el infrarrojo con características de absorción SWIR .....	39
<b>Figura 2.18.</b> Composición química de la clorita con magnesio y hierro. ....	40
<b>Figura 2.19.</b> Firmas espectrales de las Alunitas ricas en K, Na, Ca y NH <sub>4</sub> .....	41
<b>Figura 3.1.</b> Imágenes ASTER, LANDSAT 8 y SENTIENEL 2 en color natural.	43

<b>Figura 3.2.</b> Cambios en los picos de absorción al aplicar corrección atmosférica (IARR) .....	45
<b>Figura 3.3.</b> Desarrollo del algoritmo ISAC .....	46
<b>Figura 3.4.</b> Diagrama de flujo del algoritmo ISAC .....	46
<b>Figura 3.5.</b> Cálculo del NDVI en ENVI.....	48
<b>Figura 3.6.</b> Enmascaramiento de zonas urbanas mediante la herramienta ROI de ENVI .....	49
<b>Figura 3.7.</b> Máscara de la zona de estudio .....	49
<b>Figura 3.8.</b> Combinaciones de bandas en ASTER .....	51
<b>Figura 3.9.</b> Reducción de la dimensionalidad por medio de ACP .....	56
<b>Figura 4.1.</b> Análisis visual en color natural. ....	70
<b>Figura 4.2.</b> Firmas espectrales seleccionadas usadas para la clasificación SAM	71
<b>Figura 4.3.</b> Zonas propensas a generar falsas anomalías .....	72
<b>Figura 4.4.</b> Comparación entre una imagen cruda y una imagen procesada.....	73
<b>Figura 4.5.</b> Componentes de la clasificación de áreas de interés.....	74
<b>Figura 4.6.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita .....	83
<b>Figura 4.7.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita .....	84
<b>Figura 4.8.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita. ....	84
<b>Figura 4.9.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita. ....	85
<b>Figura 4.10.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.....	85
<b>Figura 4.11.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.....	86
<b>Figura 4.12.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.....	86
<b>Figura 4.13.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.....	87
<b>Figura 4.14.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita. ....	87
<b>Figura 4.15.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita .....	88
<b>Figura 4.16.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita. ....	88
<b>Figura 4.17.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.....	89
<b>Figura 4.18.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita. ....	89
<b>Figura 4.19.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita. ....	90
<b>Figura 4.20.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita. ....	90
<b>Figura 4.21.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita. ....	91
<b>Figura 4.22.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.....	91
<b>Figura 4.23.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.....	92
<b>Figura 4.24.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.....	92

<b>Figura 4.25.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.....	93
<b>Figura 4.26.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita.....	93
<b>Figura 4.27.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita. ....	94
<b>Figura 4.28.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita.....	94
<b>Figura 4.29.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.....	95
<b>Figura 4.30.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Limonita. ....	95
<b>Figura 4.31.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita. ....	96
<b>Figura 4.32.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita. ....	96
<b>Figura 4.33.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita. ....	97
<b>Figura 4.34.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita. ....	97
<b>Figura 4.35.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.....	98
<b>Figura 4.36.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.....	98
<b>Figura 4.37.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.....	99
<b>Figura 4.38.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita. ....	99
<b>Figura 4.39.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.....	100
<b>Figura 4.40.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita. ....	100
<b>Figura 4.41.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita. ....	101
<b>Figura 4.42.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.....	101
<b>Figura 4.43.</b> Rasgos espectrales de mayor similitud para Limonita. ....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Umbral para la selección de píxeles de vegetación leñosa .....	48
<b>Tabla 3.2.</b> Ratios de bandas usados para cartografiar tipos de alteración hidrotermal .....	53
<b>Tabla 3.3.</b> Ratios de bandas usados para cartografiar minerales de alteración hidrotermal .....	53
<b>Tabla 3.4.</b> Ratios de bandas usados para cartografiar minerales de alteración hidrotermal .....	54
<b>Tabla 3.5.</b> Índices de Ninomiya empleados para la detección de minerales de alteración hidrotermal .....	55
<b>Tabla 3.6.</b> Subgrupos de Bandas de ASTER L1T usados en la determinación de los tipos de alteración hidrotermal. ....	58
<b>Tabla 3.7.</b> Subgrupos de Bandas de LANDSAT 8 OLI usados en la determinación de óxidos e hidroxilos. ....	58
<b>Tabla 3.8.</b> Subgrupos de Bandas de SENTINEL 2 usados en la determinación de óxidos e hidroxilos. ....	58
<b>Tabla 3.9.</b> Principales minerales presentes en los distintos tipos de alteración hidrotermal .....	69
<b>Tabla 4.1.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración Argílica Avanzada. ....	78
<b>Tabla 4.2.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración Fílica .....	79
<b>Tabla 4.3.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración Propilítica.....	79
<b>Tabla 4.4.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos. ....	80
<b>Tabla 4.5.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Hidroxilos.....	81
<b>Tabla 4.6.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos. ....	81
<b>Tabla 4.7.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Hidroxilos.....	82
<b>Tabla 4.8.</b> Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos. ....	82

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXOS</b> .....	116
<b>ASTER L1T</b> .....	119
<b>Anexo A</b> Composiciones RGB .....	120
<b>Anexo B</b> Cocientes de bandas.....	125
<b>Anexo C</b> Índices de identificación litológica SWIR .....	127
<b>Anexo D</b> Componentes principales para identificación de los tipos de alteración hidrotermal .....	129
<b>Anexo E</b> Mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos .....	131
<b>LANDSAT 8 OLI</b> .....	136
<b>Anexo F</b> Composiciones RGB .....	137
<b>Anexo G</b> Cocientes de bandas .....	139
<b>Anexo H</b> Componentes principales para identificación de los tipos de alteración hidrotermal .....	142
<b>Anexo I</b> Mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos .....	144
<b>SENTINEL 2</b> .....	149
<b>Anexo J</b> Composiciones RGB .....	150
<b>Anexo K</b> Cocientes de bandas .....	152
<b>Anexo L</b> Componentes principales para identificación de alteración hidrotermal y óxidos.....	154
<b>Anexo M</b> mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos .....	156



**“TELEDETECCIÓN ESPACIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
IMÁGENES SATELITALES TIPO ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI Y  
SENTINEL 2 PARA DETECCIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE  
MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL”**

**RESUMEN**

El presente estudio se desarrolló en el distrito minero Zaruma Portovelo, provincia de El Oro. El objetivo fue determinar zonas de alteración hidrotermal mediante la aplicación de teledetección espacial por medio de imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2. La detección de zonas con presencia de alteración hidrotermal se realizó mediante técnicas de realce espectral como: Composiciones RGB, Cocientes de bandas, Índices de Identificación Litológica (exclusivo de ASTER), Análisis de Componentes Principales y el Método Angular Espectral (SAM). El análisis SAM requirió de un proceso a detalle, debido a que se realizó una comparación entre las firmas espectrales extraídas de cada imagen satelital con las firmas que ofrece el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Los mejores resultados son los derivados de la imagen ASTER L1T, debido a que esta cuenta con una mejor resolución y sensibilidad espectral en sus bandas, específicamente en la región del SWIR.

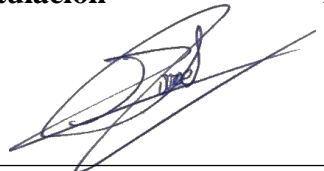
**Palabras clave:** ASTER L1T, LANDSAT 8, SENTINEL 2, teledetección espacial, alteración hidrotermal.



Ing. Víctor Omar Delgado Inga  
**Director del Trabajo de Titulación**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Director de Escuela**



Iván Israel Mogrovejo Barrera  
**Autor**

**"SPATIAL REMOTE SENSING USING ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI  
AND SENTINEL 2 SATELLITE IMAGERY FOR DETECTION OF  
AREAS WITH HYDROTHERMAL ALTERATION MINERALS".**

**ABSTRACT**

The present study was developed in the Zaruma Portovelo mining district, province of El Oro. It aims to determine areas of hydrothermal alteration through the application of spatial remote sensing by means of satellite images ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI, and SENTINEL 2. The detection of areas with presence of hydrothermal alteration was performed using spectral enhancement techniques such as RGB Compositions, Band Quotients, Lithological Identification Indices (exclusive of ASTER), Principal Component Analysis, and the Spectral Angular Method (SAM). The SAM analysis required a detailed process because a comparison was made between the spectral signatures extracted from each satellite image with the signatures provided by the United States Geological Survey (USGS). The best results are those derived from the ASTER L1T image because it has a better resolution and spectral sensitivity in its bands, specifically in the SWIR region.

**Keywords:** ASTER L1T, LANDSAT 8, SENTINEL 2, Remote Sensing, Hydrothermal alteration.



---


Ing. Víctor Omar Delgado Inga  
**Thesis Director**



---

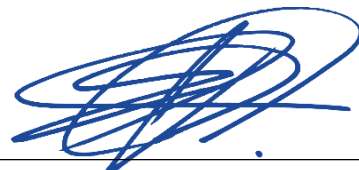
Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**School Director**

Translated by



---

Iván Israel Mogrovejo Barrera  
**Author**



---

Language Unit

Iván Israel Mogrovejo Barrera

Trabajo de Titulación

Ing. Víctor Omar Delgado Inga

Octubre, 2021

**TELEDETECCIÓN ESPACIAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DE  
IMÁGENES SATELITALES TIPO ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI Y  
SENTINEL 2 PARA DETECCIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE  
MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL**

**INTRODUCCIÓN**

La teledetección espacial en las últimas décadas se ha constituido como una poderosa herramienta para el estudio y observación de la tierra, esto debido al acelerado desarrollo tecnológico en cuanto a la disponibilidad, calidad de datos y métodos de procesamiento de información espectral obtenida por medio de imágenes satelitales de sensores remotos pasivos multiespectrales e hiperspectrales. En el ámbito geo minero, la teledetección espacial se ha convertido en una herramienta necesaria para la adquisición de información preliminar en etapas iniciales como la prospección minera regional. Es decir, mediante la aplicación de esta herramienta estamos en la posibilidad de realizar mapeos para la identificación y delimitación de potenciales zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal, mapeo litológico y geomorfológico, mapeo de desechos mineros, zonificación de áreas con presencia de drenajes ácidos, etc.

En la actualidad existe una gran cantidad de sensores remotos enfocados en la observación terrestre, para nuestro caso de estudio se optó por el uso imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2. Las mismas son de libre acceso y se encuentran disponibles en la página de la USGS (*Earth Explorer*). La efectividad en el uso de imágenes satelitales radica en la adecuada selección de las mismas, es decir, las imágenes a usar deben cumplir con las resoluciones adecuadas para lograr nuestro objetivo. Para nuestro caso en particular, las imágenes deben gozar de una buena resolución espectral, espacial y de un reducido ciclo temporal.

El mapeo de zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal se fundamenta en la espectroscopia de reflectancia. Esta técnica usa las ondas de energía de las regiones del espectro electromagnético a fin de analizar la respuesta espectral de los materiales contenidos en la superficie. R. Clark et al. (1990); Hauff (2008) y Hunt (1977) manifiestan que los minerales de alteración hidrotermal muestran sus rasgos espectrales característicos en la región de SWIR, por lo tanto, la región SWIR es sensible a moléculas y radicales como OH, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub> y a enlaces del catión OH como Al-OH, Mg-OH y Fe-OH, permitiendo su identificación ya sea que estos se encuentren en estado cristalino como amorfo.

El presente estudio tiene como finalidad determinar zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal, mediante procesamiento e interpretación de imágenes satelitales de sensores pasivos ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI y SENTINEL 2 en el distrito minero Zaruma Portovelo, Provincia de El Oro. Con la identificación y delimitación de las zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal, lo que se pretende es generar “*targets*” o áreas objetivo de prospección con la finalidad de que las empresas mineras de la zona y potenciales nuevas empresas cuenten con información temática referente al potencial mineralógico de esta zona de estudio, ya sea para la prospección de su propia concesión minera o la prospección de una nueva zona.

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES

#### 1.1 Ubicación

El cantón Zaruma se encuentra ubicado al sureste de la provincia de El Oro a 1200 m.s.n.m, asentada sobre el callejón interandino en las estribaciones de la Cordillera Vizcaya que se desprende de la Cordillera de Chilla. La palabra Zaruma viene de las palabras quichuas SARA que significa “maíz” y UMA que significa “cabeza”, nombre que traducido al castellano sería “cabeza de maíz”, mismo que se le atribuye por el color similar que tiene el maíz de la zona con el oro de las minas. (SNGR, 2012). Según datos del INEC (2010), el cantón Zaruma, tiene una densidad poblacional que representa el 4.01% de la provincia, es decir unos 24.097 habitantes, de los cuales, la población urbana son 9.677 y 14.420 al sector rural. Las actividades que concentran a la población económicamente activa son la pesca, silvicultura, ganadería con el 27.7% y la actividad minera y canteras con el 24.6%. El cantón Portovelo, se encuentra limitado al norte con el cantón Zaruma, al sureste con la Provincia de Loja y al Oeste con el cantón Piñas”(GAD Municipal de Portovelo, 2012, p. 5). Según las proyecciones del INEC (2010) para el año 2015 el cantón Portovelo cuenta con una población de 13.417 habitantes, de los cuales el 66% está asentado en la zona urbana y el 34% en la rural.

La mayoría de la Población Económicamente Activa (PEA) está concentrada en dos actividades de las cuales: el 40.42% de la PEA se dedica a la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca. El 30.23% de la PEA se dedica a la explotación de minas y canteras.

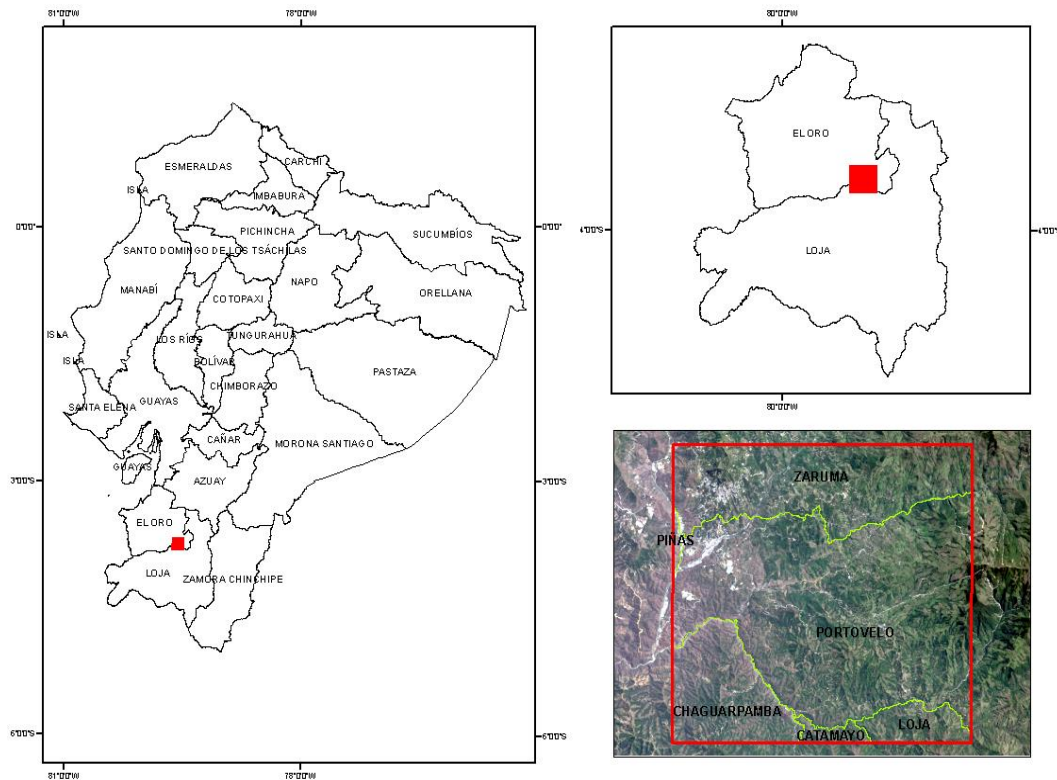
#### Acceso

La zona de estudio tiene conexión vial con el resto del país mediante el eje vial de primer orden Machala-Saracay-Piñas-Portovelo-Zaruma. El cantón Portovelo tiene conexión con la provincia de Loja mediante una vía de tercer orden denominada Portovelo-Zambi-Las Chinchas, por su lado Zaruma se conecta por medio eje vial tipo lastre Zaruma-Portovelo-Las Chinchas-Catamayo-Loja.

#### Clima

El clima del distrito minero Zaruma-Portovelo es subtropical semi húmedo, con una temperatura promedio de 21.8°C, una humedad relativa del 84% y una media de

precipitaciones de 102 mm/año. La zona cuenta con dos estaciones climáticas muy marcadas. La primera, una húmeda con presencia de fuertes precipitaciones, tiene lugar en los meses de diciembre hasta mayo. La segunda una estación seca propia de los meses de junio a noviembre (ARCOM, 2019; Carrión, 2010).



**Figura 1.1.** Mapa de Ubicación de la zona de estudio

**Fuente:** (CONALI, 2019), (LANDSAT 8, 2020)

## 1.2 Geología regional

El distrito minero Zaruma-Portovelo está localizado en el sureste de la faja mineralizada aurífera polimetálica Zaruma-Portovelo (Bonilla, 2009). A continuación, detallaremos las unidades geológicas presentes en la zona.

### **Rocas metamórficas (M)**

Estas rocas conforman el terreno Chaucha-Chauín, aflorando en el extremo suroriental del Distrito minero Zaruma-Portovelo, exactamente al S de la falla Piñas-Portovelo se dice que son la continuación al N del complejo metamórfico del Oro (Bonilla, 2009). Generalmente se encuentran cubiertas por rocas volcánicas más jóvenes, pero en la zona NE del sistema de falla Jubones ocurren en forma de

ventanas erosionales en los sectores de San Pablo de Cebadas, Manu, río San Luis, río Chicola, río Daucay, río Palmas (Carrión, 2010; Dunkley y Gaibor, 1997).

## **Oligoceno**

### **Grupo Saraguro (E-Ms)**

El grupo Saraguro pertenece a la edad eocénica y ocupa la zona centro sur del área SW de los Andes Ecuatorianos. Está constituida por tobas soldadas de flujo de ceniza de composición dacítica a riolítica, lavas andesíticas, materia volcánico retrabajado y rocas sedimentarias (Dunkley y Gaibor, 1997). (Carrión, 2010) acota que el grupo Saraguro descansa inconformemente sobre, o esta fallado contra, la Unidad Pallatanga y rocas metamórficas.

## **Pleistoceno**

### **Formación Tarqui (Rr)**

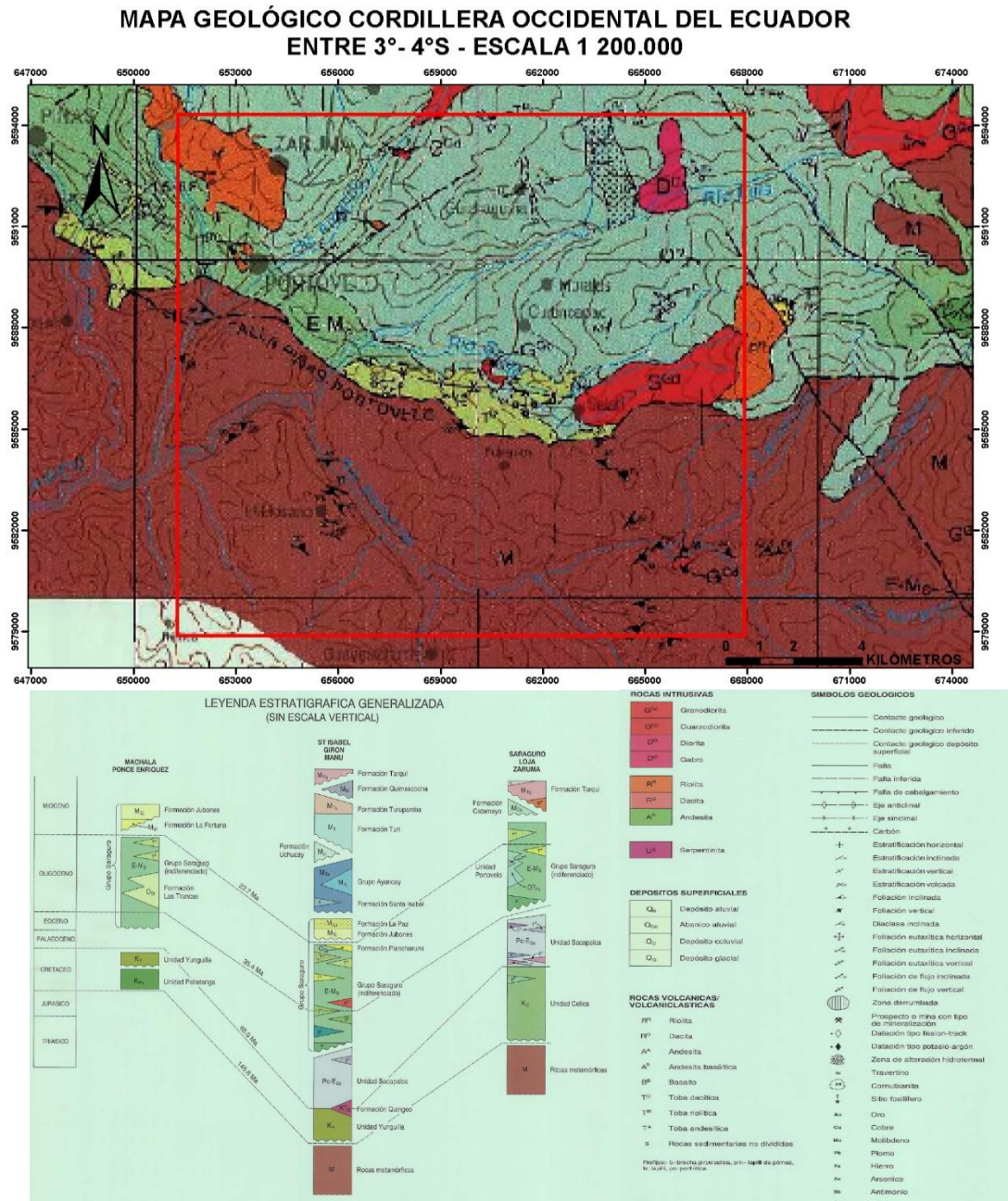
La zona presenta Riolitas asociadas a la formación Tarqui, se caracterizan por estar cubierta por una capa de depósitos volcánicos, poco consolidados y alterados. La formación está constituida principalmente por piroclastos, aglomerados riolíticos o andesíticos, tobas, cenizas volcánicas e ignimbritas (Dunkley y Gaibor, 1997; Núñez, 2003).

**Intrusivos (Granodioritas G<sup>Gd</sup>)** Se encuentran distribuidos formando un cinturón de sentido NW-SE, siendo las granodioritas y las dioritas las dominantes. Estas rocas intruyen la formación Portovelo en la zona NW y la formación Saraguro en la zona SE. Los granitoides presentan granos medios a grueso, se evidencia un enfriamiento brusco (tal como vidrio cloritizado intersticial y fino crecimiento granofríco y holocristalino), indicativo de un emplazamiento subvolcánico (alto nivel). Al W de Zaruma existen riolitas correspondientes a una fase magmática extrusiva que pertenecen a rocas efusivas con presencia de fenocristales de feldespatos, cuarzo, plagioclasa, hornblenda, todo ello dentro de una masa fluidal de vidrio volcánico (Bonilla, 2009; Ordóñez, A & Puglla, 2013).



**Paleoceno**

**Sacapalca (Pc-Esa).** Están localizadas al E del Complejo Metamórfico del Oro, cubriendo la parte S del terreno Alao. La unidad Sacapalca está constituida por lavas andesíticas, brechas tobáceas, conglomerados, lutitas lacustres y rocas piroclásticas (Bonilla, 2009).



**Figura 1.2.** Mapa Geológico Cordillera Occidental del Ecuador Entre 3° - 4°S

**Fuente:** Modificado de (Dunkley y Gaibor, 1997)



### 1.2.1 Estructura regional

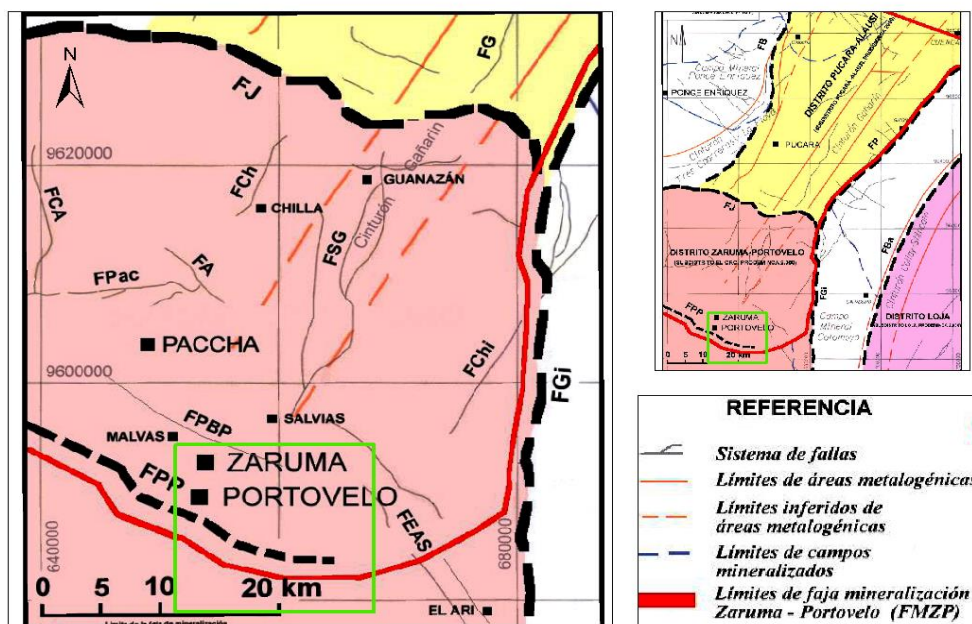
En el distrito Zaruma-Portovelo presentan estructuras dominantes de segundo orden (generalmente con rumbo E-W, NE-SW y NW-SE), presentando un rumbo casi paralelo, entre ellas tenemos: Falla Jubones y Falla Piñas-Portovelo al N y S respectivamente. Al E se localiza la mega estructura de rumbo Andino Girón y lineamientos menores entre ellos el cinturón Gañarín (Bonilla, 2009).

- La Falla Jubones se localiza en los terrenos de Chaucha, específicamente en la zona de Uzhcurrumi, se caracteriza por presentar un aparente movimiento inverso, puntualmente, se dice que es una falla inversa con cabalgamiento o desplazamiento hacia el N y buzamiento S. Se detalla que transporto rocas metamórficas sobre el Grupo Saraguro (Bonilla, 2009).
- Piñas-Portovelo es un sistema de tipo fallas/cabalgamiento que presenta un rumbo E-SE, tiene un descenso en bloque norte y separa el Grupo Saraguro del Complejo Metamórfico El Oro, definiendo el límite S del conjunto de filones cuarzosos auríferos en el distrito Zaruma-Portovelo (Bonilla, 2009; Tutivén, 2017).
- La estructura regional Girón comprende pliegues cerrados, fallas inversas y cabalgamientos con rumbos NNE a N. Se la interpreta como una falla normal, aunque en muchos lugares se observa una convergencia NW de carácter inverso (Dunkley y Gaibor, 1997).
- El cinturón de Gañarín tiene un rumbo NNE, en esta región se la puede observar desde el margen SO de Zaruma hasta el margen NE. La falla Salvias-Guanazán está incluida en el Cinturón Gañarín de orientación NNE-SSO, el cual comprende fallas sin-deposicionales, áreas de alteración hidrotermal y una concentración de intrusiones subvolcánicas riolíticas y andesíticas (Bonilla, 2009; Dunkley y Gaibor, 1997).

Bonilla (2009), establece estructuras de tercer orden o subordinadas presentes en el distrito minero Zaruma-Portovelo.

- Falla de orientación WNW-ESE. Falla Puente Buza-Palestina, situada 5 km al N de Zaruma. Es aproximadamente paralela a la falla Piñas-Portovelo, representando la continuación N de la mineralización del distrito Zaruma-Portovelo, pero con un cambio de rumbo sinestral.
- Fallas N-S: Falla Cerro Azul de 10 km de longitud

- Sistema de Fallas Salvias-Guanazán de 20 km de longitud.
- Fallas NE-SW: -Falla Chilla de 4 km de longitud
- Falla Chinchilla de 12 km de longitud
- Fallas NW-SE: -Falla Atahualpa
- Sistema de fallas el Ari-Salvias.
- Fallas E-W: Falla Paccha de 12 km de longitud.



**Figura 1.3.** Mapa de estructuras geológicas del Distrito Minero Zaruma-Portovelo.

**Fuente:** Bonilla (2009).

*Nota.* Mapa de estructuras geológicas del Distrito Minero Zaruma-Portovelo. Megaestructuras regionales: fallas Jubones (FJ), Girón (FGi), Piñas-Portovelo (FPP); estructuras subordinadas locales: fallas Gañarín (FG), Cerro Azul (FCA), Chilla (FCh), Paccha (FPac), Atahualpa (FA), Chinchilla (FChl), Puente Buza-Palestina (FPBP), y los sistemas subordinados de fallas Salvias-Guanazán (FSG) y El Ari-Salvias (FEAS). Fuente: Modificado de (Bonilla, 2009).

### 1.3 Geología local

#### Formación Celica (Cretáceo)

La formación Celica aflora en la zona Noreste de Zaruma, es separada de la Serie Tahuín por la falla regional de Piñas-Portovelo. Dominada por una litología andesítica con gran variedad de texturas y dacítica altamente meteorizada, y lavas andesíticas a andesito-basálticas, presenta también materiales tobáceos

interestratificados que en la mayoría de los casos son andesitas y piroclastos de origen continental. La denominada andesita de Portovelo (andesita porfirítica), contiene fenocristales principales que generalmente son plagioclasas y hornblendas. Una de las características más relevantes de esta andesita de Portovelo son las que contienen la mayor cantidad de mineralización de tipo hidrotermal (Kennerley, 1980).

#### **Formación Tarqui (Pleistoceno)**

Constituida principalmente por riolíticas y en menor proporción riolitas. Se observa caolín como producto de alteración de las rocas citadas.

#### **Formación Tahuín (Precámbrico? - Paleozoico Superior)**

Se encuentra separada de la formación Celica por medio de la falla regional Piñas-Portovelo, esta formación muestra un incremento en el metamorfismo de S a N, razón por la cual se la ha dividido en dos grupos que son:

#### **Gneises de San Roque (Precámbrico? (Paleozoico Inferior))**

Están compuestos por gneises de grano fino pasando a gneises de grano medio a grueso con un marcado desarrollo local de migmatitas. Está conformado también por cuarcitas y esquistos de cuarzo, feldespato y biotita.

#### **Esquistos de Capiro (Paleozoico inferior)**

Se encuentra compuesta por varias unidades litológicas, desde rocas con escaso metamorfismo hasta rocas de medio grado de metamorfismo. También se encuentran rocas escasamente metamorfizadas compuestas por limonitas y lutitas de color gris oscuro a negro intercaladas con areniscas fino-granulares hasta color de conglomeráticas de tono medio a claro. Dentro de los esquistos de Capiro es característico la presencia de muscovita y sericita, incluso presentándose con un alto contenido de sílice (Kennerley, 1980).

### Riolitas de Zaruma Urcu (Pleistoceno?)

Se encuentran en el oeste de Zaruma y forman dos colinas de considerable altura, que probablemente representen cuellos volcánicos o conductos por donde se expulsó la riolita.

### Intrusivos (Paleozoico Superior Cretácico Superior – Terciario- Inferior)

Son cuerpos intrusivos de tipo ácido a intermedio, los mismos que constan de varias facies que comprenden alaskita, cuarzo-diorita y granito. Estos intrusivos intruyeron en la formación Tahuín formando una aureola de contacto. La mineralización de Portovelo está relacionada con un cuerpo intrusivo de carácter ácido, post cretácico.

### Depósitos aluviales (Cuaternario)

Localizados a lo largo de los ríos Pindo, Calera y Amarillo.

### Depósitos coluviales (Cuaternario)

Se localizan en las inmediaciones del río Luis por la zona de Tulpas.

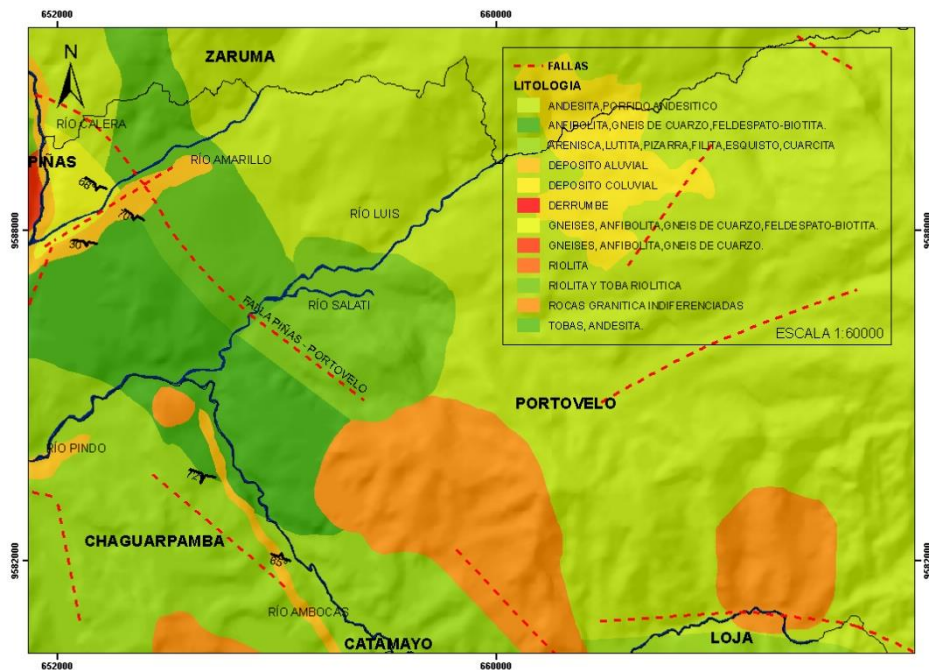


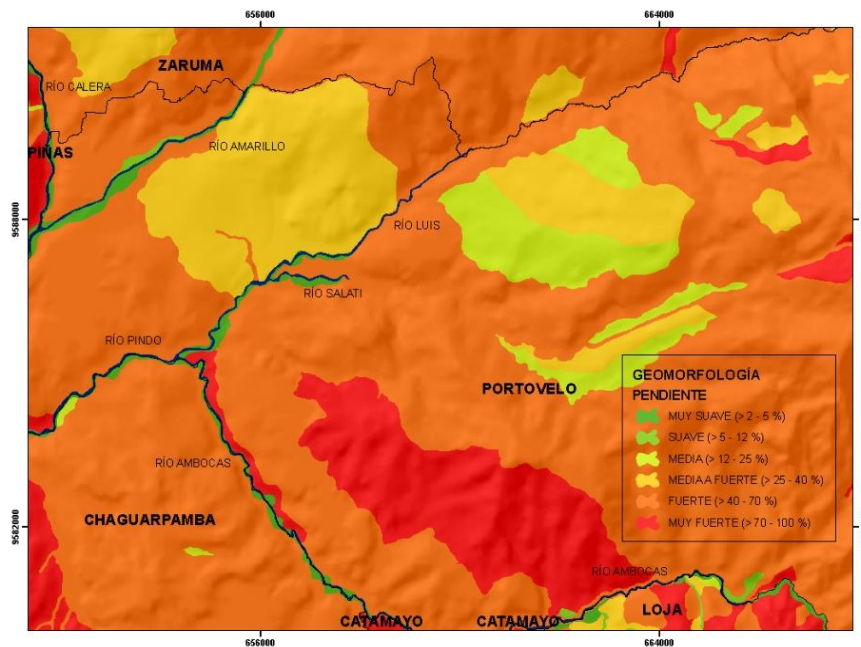
Figura 1.4. Mapa Litológico de la zona de estudio

Fuente: (CONALI, 2019), (MAGAP, 2005). Elaboración: Propia

### 1.3 Geomorfología

El distrito minero Zaruma-Portovelo presenta una fisiografía característica de la Cordillera Occidental, específicamente en la unidad geomorfológica Vertiente Occidental, la misma que presenta variaciones altitudinales que van desde los 615 hasta los 1750 m.s.n.m. Zaruma se asienta sobre una zona montañosa constituida por materiales volcánicos (lava, piroclastos) pertenecientes a la formación Celica y rocas metavolcánicas del Grupo Alamor. Estas rocas presentan lineamientos de erosión, evidenciando un relieve ondulado dominante con pendientes que varían entre el 40% y 70% (Olivia, Aldo ; Ruiz, 2015).

La falla Piñas-Portovelo divide en dos morfologías. Al Norte encontramos terrenos abruptos, mientras que al Sur evidenciamos una disminución altitudinal que van tomando características de valles (Ordóñez, A & Puglla, 2013). Portovelo se asienta en valles aluviales formados por los drenajes naturales de los ríos Calera y Amarillo. Aguas arriba del río Amarillo el relieve presenta valles en forma de V con elevaciones de hasta 1730m.s.n.m. Al suroccidente las vertientes alcanzan los 270 m de largo y pendientes de alrededor del 55%, el fondo aluvial se ensancha presentando llanuras y terrazas de baja pendiente, con secciones transversales entre 85 y 280 m (Olivia, Aldo ; Ruiz, 2015).



**Figura 1.5.** Mapa Geomorfológico de la zona de estudio

**Fuente:** (CONALI,2019), (SIGTIERRAS, 2010). Elaboración: Propia

## 1.4 Hidrografía

La zona de estudio se encuentra ubicada en las inmediaciones de la cuenca hidrográfica del río Puyango, formada por la afluencia de los ríos Calera, Amarillo y Pindo, además cuenta con el aporte de varias quebradas de gran longitud que están ubicadas perpendicularmente al cauce principal, dando origen a un drenaje de tipo dendrítico. Los ríos antes mencionados, poseen un régimen hidrológico de acuerdo con la estacionalidad de las lluvias, generalmente sus caudales en sequía son de 2.1, 3.5 y 6.4 m<sup>3</sup>/s respectivamente y en épocas lluviosas son de 20, 33, y 56 m<sup>3</sup>/s. Generando caudales en la zona hidrográfica del río Puyango en rangos de 21 - 230 m<sup>3</sup>/s (Arias, 2017; Mora et al., 2016).

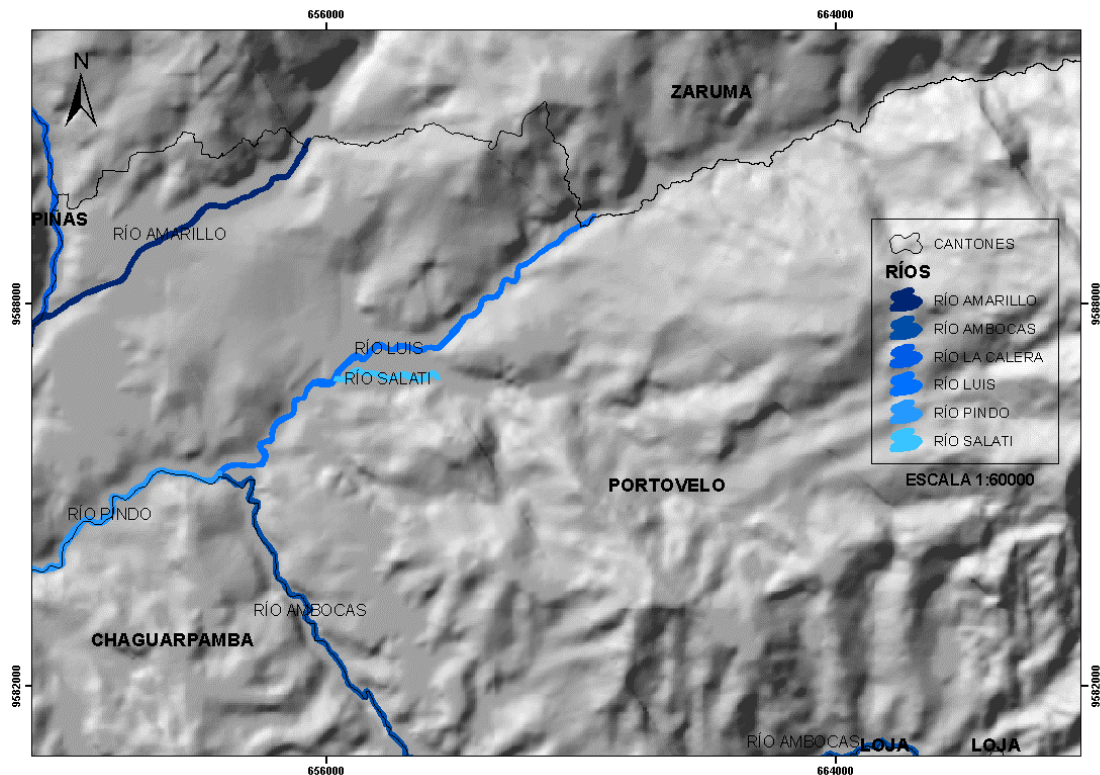


Figura 1.6. Mapa hidrológico de la zona de estudio

Fuente: (CONALI,2019), (SIGTIERRAS, 2010). Elaboración: Propia

## 1.5 Metalogenia

En el Ecuador la parte central y suroeste del territorio posee complejos ígneos pertenecientes al Eoceno y Mioceno tardío, con presencia de mineralización epitermal y pórfidos de cobre. El distrito minero Zaruma Portovelo es un yacimiento epitermal compuesto por un sistema de vetas longitudinales de tipo oro



– polimetálicas, que está relacionadas con el arco magmatismo continental del Mioceno temprano y la subducción de la placa de Fallarón/Nazca (Vikentyev et al., 2005). Las vetas de la zona tienen dirección N, separadas por fallas dextrales de empuje con orientación SE y una inclinación que va de los 40 - 60° SW. Se encuentran emplazadas en rocas volcánicas del grupo Saraguro que datan del Oligoceno al Mioceno temprano (Schütte et al., 2012).

(Vikentyev et al., 2005), establece que en el distrito minero Zaruma Portovelo existen tres etapas mineralizadas, las cuales son:

### **Cuarzo-Pirita**

Esta fase está integrada por dos paragénesis minerales, la primera formada por cuarzo temprano, pirita-clorita-hematita, La segunda compuesta por cuarzo-pirita tardía y calcopirita. La formación mineralógica comienza con una piritización, luego se establecen las vetas y filones de cuarzo blanco lechoso. Los minerales accesorios del cuarzo blanco y gris generalmente son clorita y hematita. El cuarzo, pirita y calcopirita pertenecientes a la etapa tardía con incrustaciones milimétricas de oro nativo.

### **Cuarzo polimetálico**

La fase cuarzo polimetálica tiene importancia económica debido a la paragénesis que presenta, cuenta con dos conjuntos mineralizados: cuarzo-galena-esfalerita y la galena-calcopirita-fahlore<sup>1</sup>, son mineralizaciones propias de zonas con brechas y presencia de cuarzo preexistentes que sufrieron cataclasis. El oro generalmente actúa como relleno de los espacios intergranulares del cuarzo y grietas en la calcopirita I, siendo poco común el oro en la galena. La esfalerita contiene cuarzo en gran cantidad, galena y oro nativo. Se dice que tanto la pirita II, calcopirita II, tenantita-tetraedrita y telúridos cristalizaron a lo largo de toda la etapa. En cuanto a la deposición de oro nativo, se dice que fue constante a lo largo de toda la fase, pero, con mayor incidencia después de la esfalerita-cuarzo junto con calcopirita II, tenantita-tetraedrita y telúridos.

---

<sup>1</sup> Fahlore: contiene una mineralización pálida/tetraedrita/cobre gris

### Cuarzo-Carbonato

Es la etapa concluyente de la mineralización, pues se evidencia que escasamente el cuarzo y la calcita contienen pirita.

En el segmento sur del distrito encontramos rocas intrusivas tanto dioritas como granodioritas con una mineralización de tipo vetas epitermal Au y metales básicos de sulfuración intermedia. La zona presenta dos tipos de alteración, la primera es una de tipo pórfido – potásica y diseminados de biotita, magnetita, cuarzo, turmalina, con vetas mineralizadas con calcopirita y vetas de pirita con cuarzo. La segunda son vetas epitermales con un halo argílico (illita, esmectita) con una mineralización de oro con cuarzo - calcita, contiene esfalerita, galena, pirita, calcopirita. Por otro lado, las vetas al Norte de Zaruma se caracterizan por su contenido de turmalina, magnetita, biotita y cuarzo que fueron precipitados por fluidos de alta temperatura generalmente relacionados con pórfidos (Schütte et al., 2012).

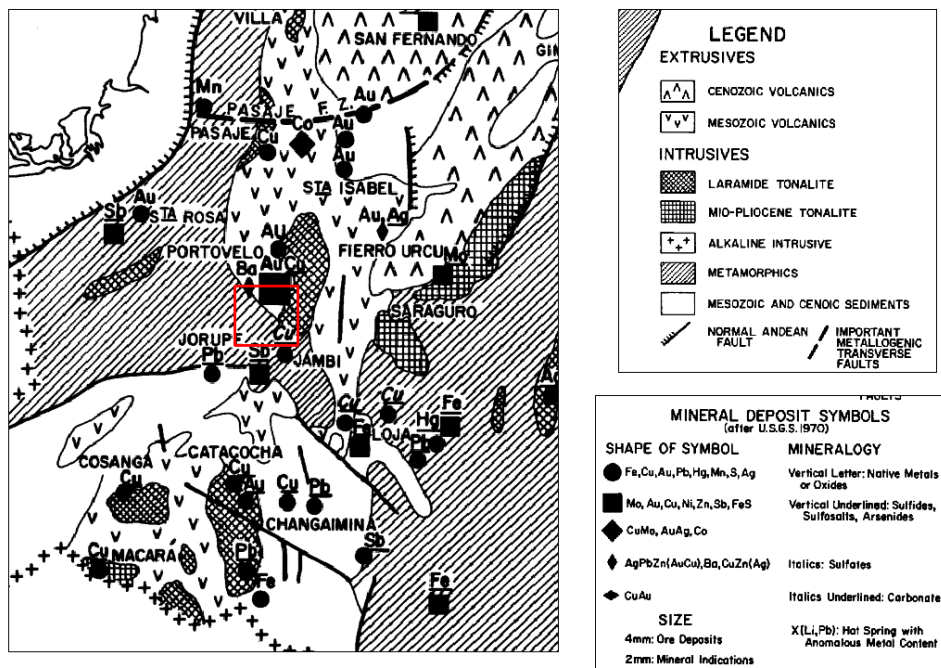


Figura 1.7. Mapa de la metalogenia de los Andes Ecuatorianos

Fuente: Modificado de (Goossens, 1972)



## CAPÍTULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Alteración hidrotermal

La génesis de los yacimientos hidrotermales viene dada por la circulación ya sea vertical o lateral de soluciones gaseosas-líquidas por debajo de la superficie terrestre. Los sistemas hidrotermales están conformados por tres componentes. El primero, es una fuente de calor, la misma que proporcionará la energía (magnética, metamórfica, radiogénica) al sistema. El segundo, es una fase líquida proveniente de fluidos ya sea magmáticos/juveniles, metamórficos y aguas meteóricas que presentan elevadas presiones y temperaturas. Finalmente, el tercer componente es el tiempo, el cual debe ser lo suficientemente prolongado para dar origen a la formación de concentraciones anómalas de minerales metálicos (Pirajno, 2009).

Un proceso de alteración hidrotermal se lo define como el metasomatismo de la roca original, debido a las transformaciones químicas, mineralógicas y texturales que se da durante la interacción fluido-roca en medio de un desequilibrio físico-químico, posteriormente el sistema tiende a reequilibrarse formando nuevos conjuntos minerales que son estables en las nuevas condiciones (Townley, 2006). Un conjunto de minerales define la naturaleza físico-química del sistema, se dice que estos son estables en conjunto y su tiempo de formación es más o menos el mismo, diferenciándose así de las asociaciones minerales, en las cuales el grupo mineral no tiene el mismo tiempo de origen, y no presentan equilibrio (Pirajno, 2009).

##### 2.1.1 Factores que controlan la alteración hidrotermal

###### Temperatura

Durante la interacción fluido hidrotermal-roca es mayor el metasomatismo cuanto más elevada sea la temperatura del fluido.

###### Presión

La presión controla eventos de segundo orden como el fracturamiento hidráulico para dar origen a la generación de brechas hidrotermales, explosiones hidrotermales (Cueva & Hernández, 2015).

### **Composición del fluido**

Entre más ácido sea el fluido mayor será la capacidad de alterar los minerales originales de la roca (Smirnov, 1982).

### **Permeabilidad de la roca**

Relacionada con la capacidad de las rocas para dejar fluir los líquidos o gases a través de ellas, entre mayor filtración más factible será la entrada de los fluidos hidrotermales y más intensa será la alteración. Se ve favorecida por el incremento de la temperatura, presión y disminuye cuando se incrementa la concentración de las soluciones. La permeabilidad depende del tamaño de los granos, la configuración de los poros y la dirección del desplazamiento del fluido respecto a la estructura de la roca (Smirnov, 1982).

### **Composición de la roca**

En grados de alteración bajos la composición de la roca es importante, debido a que existen minerales que ofrecen resistencia a ser alterados. En niveles intensos de alteración la mineralogía resultante es independiente a la composición de la roca original (Cueva & Hernández, 2015).

## **2.1.2 Procesos resultantes de la alteración hidrotermal**

### **Deposición directa**

Es la precipitación y deposición directa desde los fluidos hidrotermales en la roca huésped, para que se desarrolle este evento el macizo rocoso debe presentar características estructurales (fallas, diaclasas, fracturas, fisuras) que faciliten el traslado de los fluidos o cavidades (poros, oquedades) que permitan su deposición (Cueva & Hernández, 2015).

### **Reemplazo**

Los minerales existentes en las rocas originales generalmente son inestables en las nuevas condiciones que establecen los fluidos hidrotermales, razón por cual tienden a ser reemplazados por asociaciones minerales estables en dichas circunstancias. La porosidad efectiva (conectividad entre poros) de la roca huésped influye positivamente en la cinética del reemplazo debido a que ofrece mayor superficie de contacto (Cueva & Hernández, 2015; Smirnov, 1982).

## **Lixiviación**

En el contacto fluido hidrotermal-roca se da paso a la extracción de cationes metálicos en la roca original, generando así un lavado o lixiviación de sus componentes, a este proceso se lo considera un intercambio químico irreversible (Cueva & Hernández, 2015).

### **2.1.3 Tipos de alteración hidrotermal**

#### **Potásica**

Es una alteración producida en núcleos de zonas alteradas ligadas al emplazamiento de plutones, altas temperaturas (350°C - 550°C), en pH neutro o alcalino y no presenta hidrólisis (El H<sup>+</sup> o el OH<sup>-</sup> se consumen a lo largo de la reacción con los minerales de silicato), es propia de depósitos epitermales y pórfidos de cobre, los minerales resultantes son biotitas (verdes y ricas en Fe), feldespato potásico para los sistemas porfídicos y adularia en los epitermales. Es común encontrar sulfuros como piritita, calcopiritita y molibdenita (Cueva & Hernández, 2015; Pirajno, 2009).

#### **Propilítica**

Se caracteriza principalmente por la integración de H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y S a los componentes originales, además de presentar metamorfismo de H<sup>+</sup>, contiene minerales como epidota, clorita, carbonatos, albita, feldespato potásico y piritita, además de presentar sericita, óxidos de Fe, montmorillonita y zeolita en lugares puntuales. Esta alteración es el resultado de un halo gradual y distal de una alteración potásica, presenta asociaciones minerales como actinolita-biotita en contacto con la zona potásica, pasando a actinolita - epidota en la zona propilítica. Sus campos de presión y temperatura definen a precisión sus especies minerales, esta propiedad es de vital importancia para direccionar la búsqueda de Au, debido a que es un indicativo de la proximidad a las fuentes de calor y ebullición de un sistema epitermal (Pirajno, 2009; Townley, 2006).

#### **Fílica o cuarzo-sericítica**

La alteración fílica se origina dentro de un amplio rango de temperaturas (300°C - 400°C) y pH de 5 a 6, presenta el conjunto mineral cuarzo-sericita-piritita, con asociaciones minerales de feldespato potásico, caolinita, calcita, biotita, apatita. Esta alteración se clasifica en dos partes, la primera dentro del grupo potásico

debido al aumento del feldespato y/o biotita. La segunda, de tipo argílico, debido al incremento de minerales de arcilla.

La alteración sericítica es propia de yacimientos tipo pórfidos y mesotermales de metales preciosos y sulfuros masivos. Se basa fundamentalmente en el desequilibrio producido en los feldespatos bajo la acción de iones  $H^+$ ,  $OH^-$ , K y S, dando como resultado la formación de cuarzo, mica blanca, pirita y pequeñas porciones de calcopirita. Paralelamente a este proceso se da también la lixiviación del Na, Mg, Ti, Fe y K (Pirajno, 2009).

### **Argílica intermedia**

Se forma a condiciones de pH de 4 – 5, presenta una alteración por hidrólisis mayor respecto a la propilítica. Contiene montmorillonita – illita, clorita y arcillas del grupo caolín, existe también presencia de cuarzo. La caolinita se establece a temperaturas entre los 150°C- 200°C, se localiza cercana a la zona fílica, mientras que las arcillas como la montmorillonita se centran en las zonas exteriores. El feldespato K no muestra alteración alguna, en tanto que el Ca, K, Mg, Na sufren una lixiviación parcial (Pirajno, 2009; Townley, 2006).

### **Argílica avanzada**

Esta alteración contiene cuarzo residual con presencia o no de minerales como alunita, jarosita, caolín, pirofilita y pirita. Es producto de una intensa actividad ácida, con una lixiviación casi total de cationes alcalinos, destrucción de feldespatos y fases de silicatos máficos. Generalmente ocurre dentro de un amplio intervalo de temperatura y a un pH de 1- 3.5 (pH<2 domina el cuarzo y pH>2 alunita). La ruptura de los enlaces de aluminio presente en los silicatos origina sulfato de Al (alunita) y óxidos de Al (diásporo) (Pirajno, 2009).

## **2.2 Fundamentos de teledetección**

La teledetección es una ciencia multidisciplinaria encargada de la adquisición de información por medio de sensores terrestres, espaciales, aéreos transportados o sensores in situ y su posterior procesamiento. La adquisición de datos se fundamenta en la energía electromagnética, debido a que los objetos en superficie reflejan, absorben y emiten energía a lo largo de las regiones del espectro

electromagnético, permitiendo así la identificación, clasificación y delimitación espacial de los mismos (Campbell & Wynne, 2011).

Según Chuvieco & Huete (2016) la adquisición y posterior interpretación de información satelital se fundamenta en seis componentes

### **1) Fuente de energía**

Se basa en la radiación electromagnética que detecta el sensor, siendo la fuente de energía más común la emitida por el sol.

### **2) Cubierta terrestre**

Son todos los objetos y componentes ambientales presentes en la superficie terrestre que reciben la energía proveniente del sol y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas y químicas.

### **3) Sistema sensor**

Compuesto por el sensor y la plataforma que lo contiene, su función es captar la energía proveniente de las distintas coberturas terrestres, codificar, grabar y enviar a un sistema de recepción.

### **4) Sistema de recepción – comercialización**

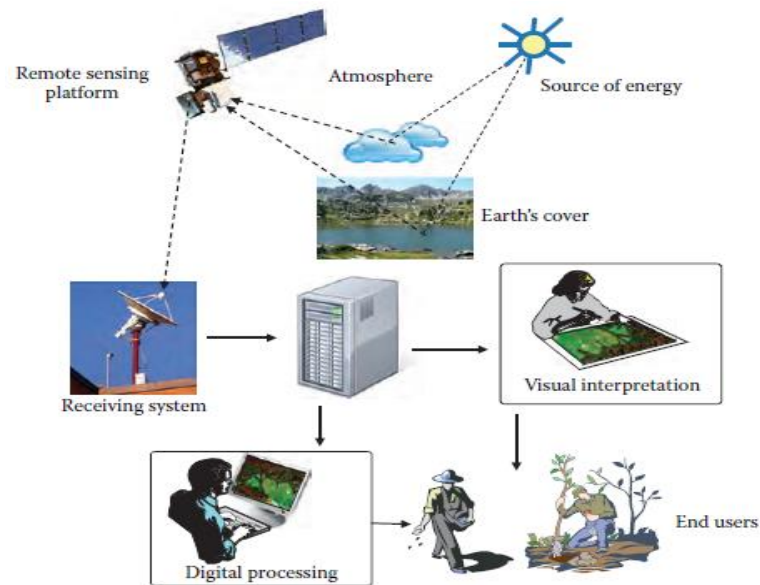
Se refiere a la estación que recibe la información proveniente de la plataforma satelital, en donde se graba en un formato adecuado, se realizan correcciones y finalmente se distribuye a los usuarios.

### **5) Intérprete**

Convierte los datos en información temática de interés por medio de técnicas visuales o digitales.

### **6) Usuario final**

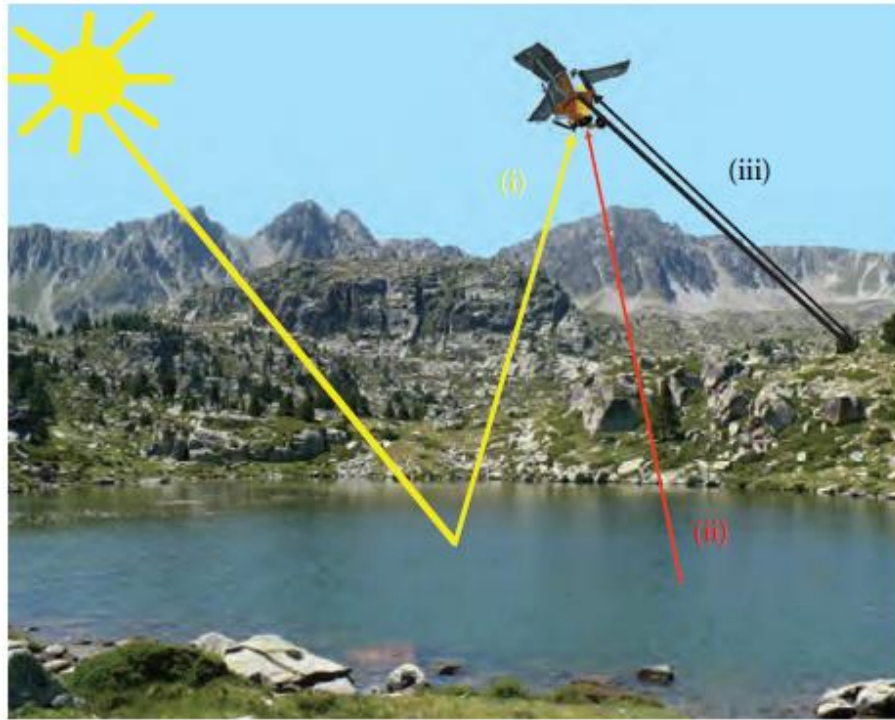
Usa la información extraída de acuerdo a su área de interés.



**Figura 2.1.** Componentes de la teledetección

**Fuente:** (Chuvienco & Huete, 2016)

(Chuvienco & Huete, 2016) establecen una semejanza entre el mecanismo de percepción de un sensor y el ojo humano. La comparación parte de que para que sea factible la visión, nuestros sentidos primero tienen que descifrar la información proveniente del objeto. Por lo tanto, el ojo es capaz de distinguir un objeto sólo cuando existe la suficiente energía lumínica. Cabe recalcar que la energía lumínica no la proporciona el objeto, si no el foco energético que lo ilumina (sol). En base a este ejemplo se establece que un sistema de teledetección está compuesto fundamentalmente por tres componentes: sensor (ojo), objeto observado y el flujo energético que permite la detección. Por lo tanto, la adquisición de información se da por tres vías: reflexión, emisión y emisión-reflexión.



**Figura 2.2.** Tipos de radiación por las cuales se da la teledetección

**Fuente:** (Chuvienco & Huete, 2016)

*Nota:* Tipos de radiación: (i) reflexión, (ii) emisión, (iii) emisión-reflexión.

La reflexión es la forma más importante en teledetección, debido a que proviene directamente de la luz solar, el sol ilumina la superficie y esta refleja esa energía acorde a sus características físicas y químicas. La interacción entre superficie y sensor no es total debido a la presencia de la atmósfera que absorbe o dispersa una parte de la energía. La emisión se caracteriza por la energía emitida por la superficie u objeto, por lo tanto, se necesita de un sensor que sea capaz de generar su propio flujo energético y de captar la emisión producida por la superficie. La emisión - reflexión es una combinación de las dos formas. En teledetección el flujo energético que existe constituye una forma de radiación electromagnética. La energía se transporta de un lugar a otro ya sea por convección, conducción y radiación, siendo esta última la base de los sistemas de teledetección (Chuvienco & Huete, 2016).

### 2.2.1 Energía electromagnética

La radiación electromagnética se explica a través de dos teorías que compaginan entre sí. La primera expuesta por Huygens y Maxwell que la conciben como un haz

ondulatorio. La segunda expuesta por Planck, Einstein que la describen como una unidad discreta de energía, fotones o cuantos con masa igual a cero.

En base a la teoría ondulatoria, la energía electromagnética se transmite siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz, con presencia de dos campos de fuerzas ortogonales entre sí (eléctrico y magnético). El flujo energético está compuesto por tres propiedades. La primera es la longitud de onda ( $\lambda$ ) definida como la distancia que existe entre los picos de una onda. La segunda es la frecuencia ( $\nu$ ) haciendo referencia al número de ciclos en los que se pasa por un punto fijo en una unidad de tiempo. Finalmente, la tercera es la amplitud que es definida como la altura de cada pico, generalmente es medida en niveles de energía (Watts por metro cuadrado por micrómetro) (Chuvienco & Huete, 2016).

$$c = \lambda \nu \quad (1)$$

Donde:

$c$ : Velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s<sup>-1</sup>).

$\lambda$ : longitud de onda en micrómetros ( $1 \mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ ).

$\nu$ : Frecuencia en Hertz (1Hz = 1 ciclo por segundo).

Basándonos en la teoría cuántica podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón (es necesario conocer su frecuencia).

$$Q = h \nu \quad (2)$$

Donde:

$Q$ : Energía radiante de un fotón (Julios)

$\nu$ : Frecuencia.

$h$ : Constante de Planck ( $6.6 \times 10^{-34}$  J s)

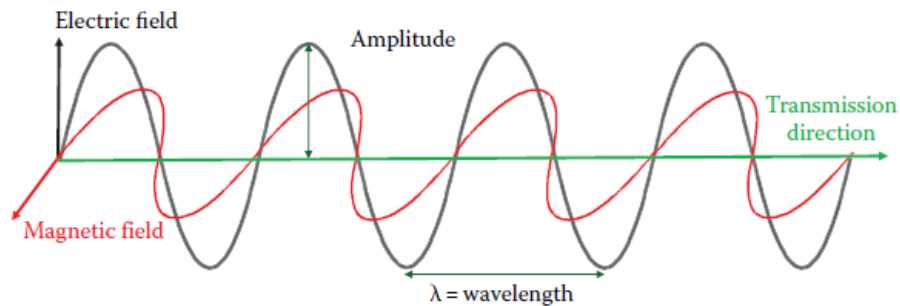
Sustituyendo (2) en (1) obtenemos:

$$Q = h(c/\lambda)$$

De esta expresión se deduce que a mayor longitud de onda o menor frecuencia el contenido energético será menor y viceversa. Esta deducción nos indica que las



radiaciones de ondas largas son más difíciles de detectar en relación con las cortas. Razón por la cual, las ondas largas requieren de medios de detección especializados (Chuvienco & Huete, 2016).



**Figura 2.3.** Esquema de una onda electromagnética

**Fuente:** (Chuvienco & Huete, 2016)

### 2.2.2 Espectro electromagnético

El espectro electromagnético se define como una gama de energías que se producen por la interacción entre materia y energía en forma de ondas electromagnéticas. La posición que ocupa esa energía dentro del rango del espectro puede ser expresada en electronvoltios (eV), longitud de onda (cm,  $\mu\text{m}$ ) o frecuencia (Hz). La energía se produce cuando una partícula con masa (electrón, ion, molécula) se acelera. Por ejemplo, en niveles moleculares, la generación de energía se da cuando los átomos son acelerados a estados vibratorios superiores. Finalmente, la energía puede presentarse en regiones: nucleares (partículas subatómicas), químicas (ion, molécula), térmica o mecánica (molécula o partícula mayor) (E. Clark & Rilee, 2010).

Las bandas espectrales más utilizadas en teledetección se clasifican en los siguientes grupos:

#### **Espectro visible (0.4 – 0.7 $\mu\text{m}$ )**

Es la única radiación electromagnética que puede percibir el ojo humano, debido a que coincide con las longitudes de onda en donde es mayor la radiación solar. En este rango la luz se divide en prismas o rejillas de difracción, generalmente

conocidos como colores primarios Azul ( $0.4 - 0.5 \mu\text{m}$ ), Verde ( $0.5 - 0.6 \mu\text{m}$ ) y Rojo ( $0.6 - 0.7 \mu\text{m}$ ). Cabe recalcar que un color primario no se forma a partir de mezclas de los otros dos, pero los demás colores fundamentalmente se forman por la combinación de los primarios.

### Infrarrojo cercano ( $0.7 - 1.2 \mu\text{m}$ )

Más conocido como el infrarrojo fotográfico, se encuentra fuera del rango de percepción humana. Esta porción del espectro es usada generalmente para determinar el estado fitosanitario de las plantas.

### Infrarrojo medio ( $1.2 - 8 \mu\text{m}$ )

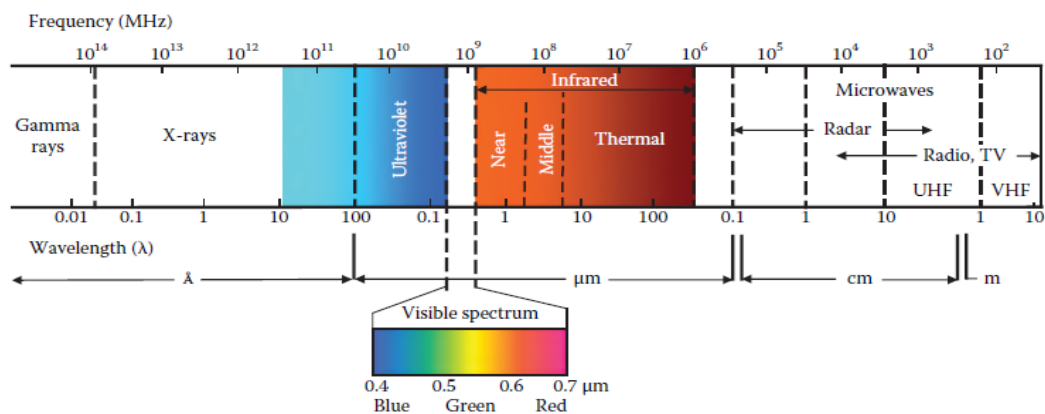
En el rango de ( $1.2 - 2.5 \mu\text{m}$ ) se localiza la región del SWIR (infrarrojo de onda corta), esta porción del espectro es de vital importancia en la detección de minerales de alteración hidrotermal, debido a q estos muestran sus características espectrales en este rango, también sirve para estimaciones de suelo y vegetación.

### Térmico ( $8 - 14 \mu\text{m}$ )

Localizado en la porción emisiva del espectro terrestre, se usa principalmente para detectar el calor proveniente de los tipos de cubiertas terrestres. En geología se usa para hacer caracterización litológica.

### Micro – ondas ( $> 1\text{mm}$ )

Las longitudes de onda más grandes de este rango se utilizan generalmente en las comunicaciones por radio. Mientras que las pequeñas guardan cierta similitud con las termales.



**Figura 2.4.** Principales bandas espectrales que contiene el espectro electromagnético

**Fuente:** (Chuvienco & Huete, 2016)

### **2.2.3 Interacciones de la energía electromagnética con la atmósfera**

La atmósfera terrestre está compuesta por Nitrógeno, Oxígeno, Argón, vapor de agua, Ozono, Dióxido de Carbono, polvo y aerosoles. Estos componentes generan impactos negativos ya sea en la calidad de las imágenes o en la adquisición de datos, debido a que alteran la radiación originalmente emitida entre los objetos y el sensor. El CO<sub>2</sub>, ozono y vapor de agua provocan que la energía electromagnética sea absorbida, dispersada y emitida (Chuvieco & Huete, 2016).

Campbell & Wynne (2011) describen las alteraciones de la energía electromagnética de la siguiente manera. La absorción se produce cuando la atmósfera impide el paso ya sea total o parcial el flujo de radiación. La dispersión se refiere a la redirección de la energía, debido a la presencia de partículas en suspensión o presencia de gases atmosféricos. El porcentaje de dispersión depende básicamente del tamaño de las partículas, su abundancia, longitud de onda de la radiación y la profundidad de la atmósfera a la cual fluye.

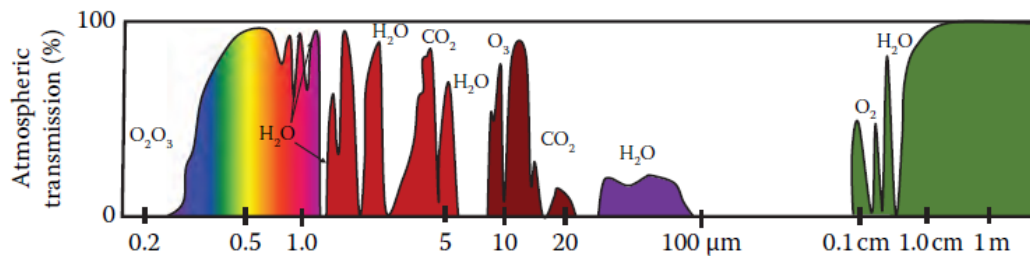
La emitida afín a los cuerpos calientes, relacionada con la refracción que es la curvatura de los rayos de luz en la zona de contacto entre los dos medios que emiten luz. Por último, la refracción se produce en la atmósfera a medida que la luz atraviesa sus diversas capas, cabe recalcar que cada capa presenta características de brillo, humedad y temperaturas distintas. Siendo estos cambios los que producen la curvatura de los rayos.

Campbell & Wynne (2011) y Chuvieco & Huete (2016) afirman que la atmósfera tiende a ser selectiva sobre las longitudes de onda que llegan a incidir sobre ella, siendo esta una limitante al momento de realizar procesos de teledetección. Para facilitar el proceso de teledetección, se han establecido determinadas bandas espectrales en las cuales es factible la observación de la superficie terrestre, estas bandas son las denominadas ventanas atmosféricas. La selección de las bandas se realiza en base a un análisis de los espectros de absorción de los gases atmosféricos, teniendo como característica fundamental que en ellas la transmisividad de la atmósfera es lo suficientemente alta para que la radiación fluya libremente (atmósfera clara).

Ultravioleta y Visible	0.30 - 0.75 $\mu\text{m}$
	0.77 - 0.91 $\mu\text{m}$
Infrarrojo Cercano	1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$
	2.05 - 2.4 $\mu\text{m}$
Infrarrojo Termal	8.0 - 9.2 $\mu\text{m}$
	10.2 - 12.4 $\mu\text{m}$
Microondas	7.5 - 11.5 mm
	20.0 + mm

**Figura 2.5.** Principales ventanas atmosféricas

**Fuente:** (Campbell & Wynne, 2011)



**Figura 2.6.** Ventanas atmosféricas adecuadas para la observación de la tierra desde el espacio

**Fuente:** (Chuvienco & Huete, 2016)

### 2.2.4 Interacciones de la energía electromagnética con las superficies

La energía electromagnética al contacto con la superficie terrestre es reflejada, absorbida o transmitida. Cada uno de estos procesos está directamente relacionado con la naturaleza del objeto, la longitud de onda y el ángulo de iluminación. Siendo la energía reflejada la base de la teledetección.

#### Reflexión

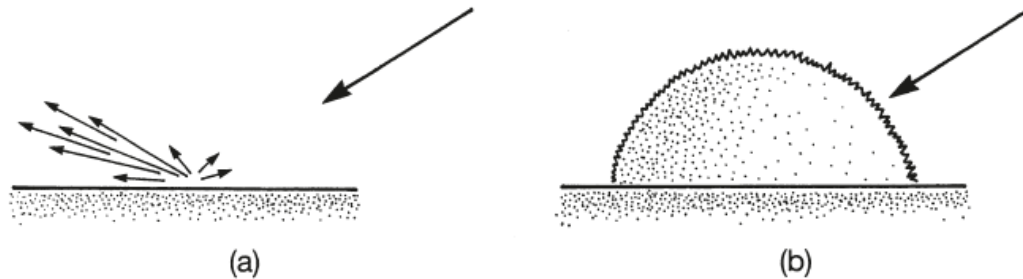
Este proceso tiene lugar cuando la luz es desviada al momento de chocar contra una superficie no transparente. La magnitud de la reflexión está en directa relación con la morfología de la superficie, existiendo dos escenarios posibles.

##### a) Reflexión especular

Es aquella que redirige toda o casi toda la radiación incidente en una sola dirección, en donde, el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión. Este tipo de reflexión es propia de espejos, metales lisos y en masas de aguas tranquilas.

## b) Reflexión difusa

Es característica de superficies rugosas, en donde la energía es dispersada más o menos equitativamente en todas las direcciones.



**Figura 2.7.** Tipos de reflexión

Fuente: (Campbell & Wynne, 2011)

*Nota: a) Reflexión especular, b) Reflexión difusa.*

## 2.3 Teoría general de los sensores

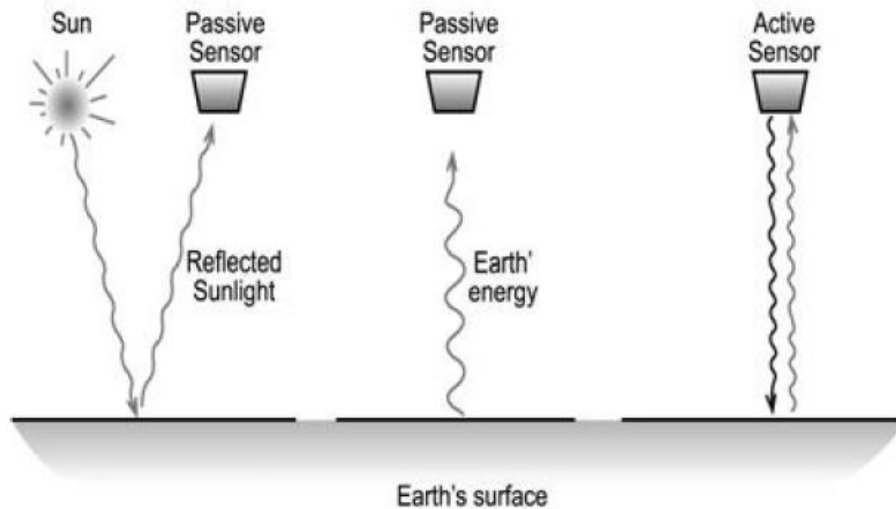
(Chuvieco & Huete, 2016) clasifican a los sensores remotos en función de la fuente de energía que usan. Existen dos tipos de sensores los activos y pasivos.

### Sensores activos

Son aquellos que poseen su propia fuente de energía, de modo que el sensor está en la capacidad de emitir energía electromagnética hacia la superficie terrestre, una vez detectado un objeto hace el registro de la energía reflejada por él. Como ejemplo de estos sensores tenemos el RADAR y el LIDAR.

### Sensores pasivos

Son sensores que registran la energía emitida y/o reflejada por la superficie terrestre. Su fuente de energía es externa, generalmente es el sol. Este tipo de sensores han sido los más difundidos y entre los usos más frecuentes es el monitoreo de la superficie terrestre. Ejemplos de estos sensores tenemos ASTER, LANDSAT 8, SENTINEL 2, los mismos que son empleados para el desarrollo de esta tesis.



**Figura 2.8.** Tipos de sensores remotos para teledetección.

**Fuente:** (Peguero, 2016)

### 2.3.1 Resolución de los sensores pasivos

Es la capacidad que tiene un sensor para la diferenciación de coberturas u objetos presentes en el área observada. Para realizar este proceso, el sensor se basa en las diferencias de radiación obtenidas (resolución radiométrica), resolución de la captura (resolución espacial), la cantidad de bandas espectrales con las que trabaja (resolución espectral) y la variación de tiempo empleado para volver a captar una misma área (resolución temporal). Generalmente, los sensores usados en la exploración minera priorizan la resolución espacial, espectral y aquellos que contienen un reducido ciclo temporal. Por ejemplo, los minerales de alteración hidrotermal se mapean mejor en las bandas de infrarrojo de onda corta, debido a que sus características espectrales que se acoplan mejor a esas longitudes de onda. (Chuvieco & Huete, 2016).

#### Resolución radiométrica

Se refiere a la sensibilidad del sensor para detectar las variaciones de la radiancia espectral que recibe. Por lo tanto, entre mayor sea la resolución radiométrica, mayor será la capacidad de diferenciación del sensor. Esta propiedad es aprovechada por la capacidad de cómputo, debido a que usa toda la resolución radiométrica disponible para la diferenciación de coberturas que presentan reflectividades similares.

**Resolución espacial**

Se refiere al objeto más pequeño que pueda ser identificado en la imagen, es decir muestra el nivel de detalle de la imagen del sensor expresado en el tamaño del píxel. Está estrechamente relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de los resultados obtenidos en la interpretación.

**Resolución espectral**

Indica el número y ancho de las bandas espectrales que contiene el sensor. Por lo tanto, un sensor es mejor cuantas más bandas espectrales posea, además de que estas deben de ser lo más estrechas posibles.

**Resolución temporal**

Referida a la periodicidad o tiempo de revisita que tiene el sensor a un determinado lugar.

**2.4 Imágenes satélite de sensores pasivos****2.4.1 ASTER L1T**

El Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzada del Espacio (ASTER) es un generador de imágenes multiespectrales, que fue lanzado a bordo de la plataforma EOS Terra a cargo de la Administración Espacial Aeronáutica de los Estados Unidos (NASA) en diciembre de 1999, está compuesto por cuatro telescopios, que cubren 14 bandas de frecuencia. De estos cuatro telescopios, tres de ellos apuntan hacia el nadir, y uno apunta hacia atrás (duplicando la frecuencia de la banda 3 del nadir). El sensor tiene una resolución temporal de 16 días para las 14 bandas y un tiempo de 5 días para las bandas del visible e infrarrojo cercano (Geological Survey, 2020).

Consta de tres subsistemas ópticos, los cuales son: Radiómetro visible e infrarrojo cercano (VNIR), Radiómetro infrarrojo de onda corta (SWIR), Radiómetro infrarrojo termal (TIR). Los mismos cuentan con una resolución espacial de 15, 30 y 90 m respectivamente.

**Nivel de procesamiento L1T**

El nivel L1T, se crea a partir de correcciones geométricas y radiométricas de los datos de nivel AST\_L1A. El nivel L1T se logra por la aplicación de modelos

terrestres y satelitales, puntos de control y modelos de elevación, dando como resultado un mapa rotado hacia el norte (Geological Survey, 2020). Los procesos antes mencionados tienen la finalidad de entregar al usuario una imagen con una proyección cartográfica definida en Universal Transverse Mercator (UTM) y una disminución de errores topográficos debido al relieve de la zona.

<b>Label</b>	<b>Telescope Pointing</b>	<b>Wavelength (µm)</b>	<b>Description</b>	<b>Resolution (m)</b>
VNIR_Band1	Nadir	0.520–0.600	Visible green/yellow	15 (8 bit)
VNIR_Band2		0.630–0.690	Visible red	
VNIR_Band3N		0.760–0.860	Near infrared	
VNIR_Band3B	0.760–0.860	Backward		
SWIR_Band4	Nadir	1.600–1.700	Short-wave infrared	30 (8 bit)
SWIR_Band5		2.145–2.185		
SWIR_Band6		2.185–2.225		
SWIR_Band7		2.235–2.285		
SWIR_Band8		2.295–2.365		
SWIR_Band9	2.360–2.430			
TIR_Band10	Nadir	8.125–8.475	Long-wave infrared or thermal infrared	90 (12 bit)
TIR_Band11		8.475–8.825		
TIR_Band12		8.925–9.275		
TIR_Band13		10.250–10.950		
TIR_Band14	10.950–11.650			

**Figura 2.9.** Descripción de las bandas ASTER L1T

**Fuente:** (Geological Survey, 2020)

### **Características de la imagen a utilizar**

Satélite: TERRA

Sensor: ASTER

Local Granule ID: AST\_L1T\_00307222004154430\_20150505084914\_70972

Fecha de adquisición: 22 de julio de 2004

Fecha de descarga: 27 de octubre de 2020

Latitud: 3°42'04.68"S

Longitud: 79°37'07.32"W

Proveedor: USGS, a través de su página de descarga de datos:

<https://earthexplorer.usgs.gov/>



### 2.4.2 SENTINEL 2

La agencia espacial europea (ESA) define a las imágenes SENTINEL 2 de la siguiente manera. El satélite es parte de una constelación de satélites europea que tiene como finalidad la observación de la tierra, fue lanzado el 23 de junio de 2015, por medio del cohete Vega. Consta de una franja ancha de escaneo multiespectral y una alta resolución espacial, temporal y radiométrica. Las imágenes SENTINEL 2, del nivel de procesamiento L1c tienen una cobertura de 100 x 100 km. La resolución de la imagen depende de las bandas, las mismas que pueden ser de 10, 20 o 60 m respectivamente ESA (2015).

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength [micrometers]	Resolution [meters]
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

**Figura 2.10.** Descripción de las bandas de SENTINEL 2

**Fuente:** (Luca Congedo, 2016)

### Características de la imagen a usar

Agencia: ESA

Plataforma: SENTINEL- 2B

ID: L1C\_T17MPR\_A014108\_20191118T153715

Dirección de la órbita: Órbita descendente

Fecha de adquisición: 18 de noviembre de 2019.

Fecha de descarga: 29 de octubre de 2020.

Tipo de producto: S2MSI1C

Proveedor: USGS, a través de su página de descarga de datos:

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

### 2.4.3 LANDSAT 8

El satélite LANDSAT 8, fue construido por la empresa “Orbital Sciences Corporation” en Gilbert, Arizona. El satélite opera en una órbita a 705 km sobre el Ecuador, tiene una resolución temporal de 16 días. El satélite cuenta con dos sensores: “Operational Land Image” (OLI) con longitudes de onda que van desde los 0.433 hasta los 2.290  $\mu\text{m}$ . Consta de 9 bandas (B1 – B9) de onda corta con una resolución espacial de 30 m (excepto la pancromática B8 que su resolución es de 15m). El “Thermal Infrared Sensor” (TIRS) tiene longitudes de onda de 10.60 hasta 12.51  $\mu\text{m}$  y una resolución espacial de 100 m (U.S. Geological Survey, 2016).

Landsat 8 Bands	Wavelength [micrometers]	Resolution [meters]
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100 (resampled to 30)
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100 (resampled to 30)

**Figura 2.11.** Descripción de las bandas LANDSAT 8 OLI

**Fuente:** (Luca Congedo, 2016)

### Características de la imagen a usar

Proveedor: USGS/ESPA

ID = "LC08\_L1TP\_010063\_20200827\_20200905\_01\_T1"

Dirección de la órbita: Órbita descendente

Fecha de adquisición: 27 de agosto de 2020.

Fecha de descarga: 05 de septiembre de 2020.

## 2.5 Aplicación de la teledetección en la identificación de zonas de alteración hidrotermal.

### 2.5.1 Espectroscopia de reflectancia aplicada

La espectroscopia de reflectancia es una técnica que usa las ondas de energía de las regiones del espectro electromagnético (Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo

medio) con la finalidad de analizar la respuesta espectral de los materiales contenidos en una superficie. Las ondas pueden ser emitidas, reflejadas o dispersadas ya sea por un sólido, líquido o un gas (Clark, 1999).

La espectroscopia de reflectancia de superficies permite caracterizar los materiales en función de la respuesta que estos emiten de acuerdo a sus enlaces químicos, además de contar con la capacidad de evaluar materiales tanto cristalinos como amorfos. La ventaja fundamental de esta técnica es su marcada sensibilidad a los cambios químicos y/o estructurales (materiales), provocando variaciones de forma y posición en los rangos de absorción a determinadas longitudes de ondas, permitiéndonos investigar a precisión la química de los compuestos (Clark, 1999).

### **2.5.2 Mecanismos de absorción**

(Hunt, 1977) parte de la premisa de que la espectroscopia de reflectancia se basa en la respuesta espectral de los materiales, esto debido a la interacción energía electromagnética – material. Por lo tanto, los átomos y moléculas de los minerales absorben esa energía en función de su estructura atómica, dando a conocer así sus rasgos espectrales característicos.

(Hauff, 2008) y (Hunt, 1977) definen los rasgos de absorción de los minerales en dos de los componentes del espectro electromagnético. Para la región de Visible (0.4 – 0.7  $\mu\text{m}$ ), manifiestan que los rasgos de absorción principalmente se deben a las transiciones electrónicas, transferencia de carga, transferencia electrónica entre elementos, transiciones de banda de conducción y el fenómeno del centro del color. Estos tipos de transiciones se las podría definir como una simple liberación de energía debido al desprendimiento de energía de un electrón al cambiar de nivel energético en un átomo. En la región del SWIR (infrarrojo de onda corta) (1.2 – 2.5  $\mu\text{m}$ ), los rasgos de absorción se manifiestan en función de su composición mineralógica. Por lo tanto, sus rasgos se caracterizan por absorción de energía dentro de la red cristalina de las transiciones de los estados vibracionales, en donde estos estados vibracionales responden a distintos niveles de energía. En definitiva, las transiciones entre niveles de energía y diferencias composicionales se manifiestan por características de absorción en longitudes de onda definidas.

POSITION	MECHANISM	MINERAL GROUP
~1.4 $\mu\text{m}$	OH and WATER	CLAYS, SULFATES HYDROXIDES, ZEOLITES
~1.56 $\mu\text{m}$	$\text{NH}_4$	$\text{NH}_4$ SPECIES
~1.8 $\mu\text{m}$	OH	SULFATES
~1.9 $\mu\text{m}$	WATER	SMECTITE
2.02, 2.12 $\mu\text{m}$	$\text{NH}_4$	$\text{NH}_4$ SPECIES
~2.2 $\mu\text{m}$	Al-OH	CLAYS, SULFATES, MICAS
~2.29	Fe-OH	Fe-CLAYS
~2.31	Mg-OH	Mg-CLAYS, ORGANICS
~2.324	Mg-OH	CHLORITES
~2.35 +/- $\mu\text{m}$	$\text{CO}_3^{-2}$	CARBONATES
~2.35+	Fe-OH	Fe-CHLORITES

**Figura 2.12.** Características de absorción de los minerales.

**Fuente:** (Hauff, 2008)

### 2.5.3 Procesos vibracionales

La disposición de las longitudes de onda es establecida por el catión y la longitud del enlace respectivo. El radio iónico del catión establece la longitud del enlace químico con las moléculas de agua, hidroxilo o carbonatos con las cuales se podría establecer un enlace. Por lo tanto, la espectroscopia se encarga de medir la energía vibracional de los enlaces, ya que estos vibran de diferentes modos y en longitudes de ondas específicas. En definitiva, las longitudes de enlace entre átomo y molécula son uniformes, es posible identificar composiciones y cambios composicionales en los minerales de forma efectiva, basándonos en la longitud de onda y cambios en la misma. Por ejemplo, el enlace Al-OH es característico de la longitud de onda de 2200 nm, el enlace Fe-OH se presenta en el rango de 2280 – 2295 nm (para arcillas) y los enlaces Ca-CO<sub>3</sub> aparecen entre los 2334 nm.

### 2.5.4 Rasgos espectrales (firmas espectrales)

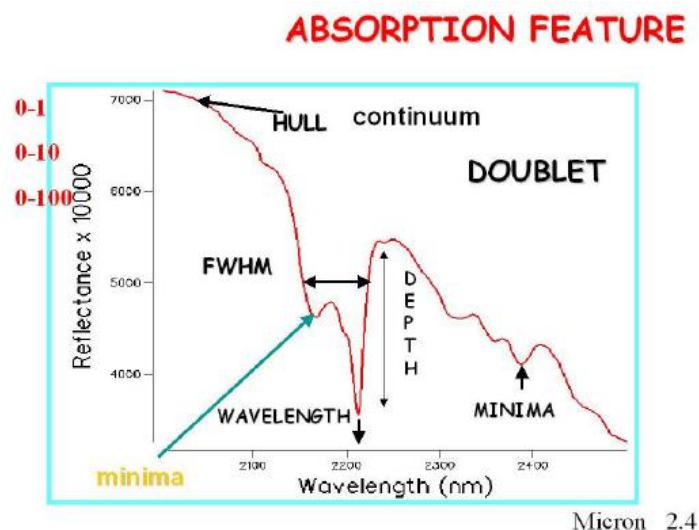
La información espectral de reflectancia proveniente de objetos o superficies detectadas por los sensores son representadas de forma visual mediante un conjunto de pares ordenados, en donde el eje de las abscisas (eje X) contiene las longitudes de ondas, mientras que el eje de las ordenadas (eje y) contiene el porcentaje de reflectancia. Esta representación es conocida con el nombre de espectro de reflectancia o firmas espectrales.

Cada mineral tiene una firma espectral única y distintiva, estas están compuestas por sus rangos de absorción, los cuales representan la composición mineralógica de

la muestra, la concentración de minerales, la estructura cristalina, el contenido de agua y las consideraciones ambientales (generalmente son distorsiones producto de la interacción de la energía reflejada con la atmósfera). En la identificación de minerales, las firmas obtenidas ya sea en campo o por medio de información satelital son comparadas mediante software con firmas referenciales provenientes de bibliotecas espectrales, con la finalidad de generar identificaciones precisas.

### 2.5.5 Componentes de las firmas espectrales

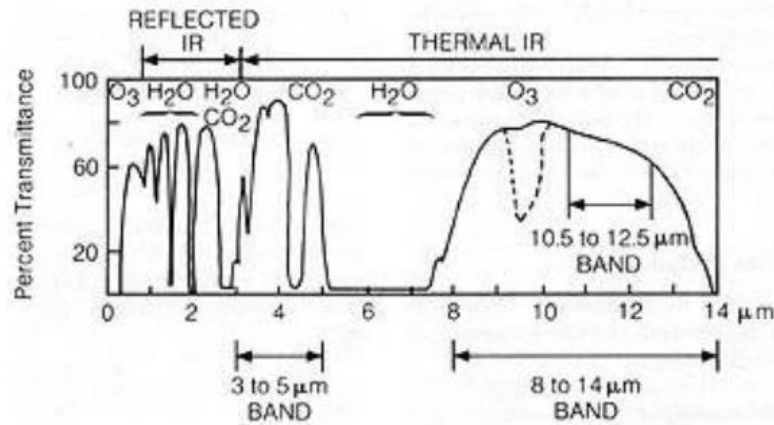
Las firmas espectrales contienen una curva envolvente o continuum de rasgos de absorción con rasgos localizados en longitudes y amplitudes de ondas características, permitiendo la identificación de las variaciones químicas de un compuesto. Los rasgos de absorción son presentados como mínimos (puntos bajos de la gráfica) respecto a la envolvente general de la curva. La profundidad de los rasgos depende de la intensidad de las vibraciones de energía presentes en las longitudes de onda específicas, las cuales son características de cada mineral. Por lo tanto, la intensidad de la profundidad es producto de la concentración del mineral y de las propiedades físicas del mismo. Finalmente, "FWHM" significa "Full Width at Half Maximum" (ancho total a la mitad del máximo). Puede utilizarse para determinaciones de simetría relacionadas con la cristalinidad. (Clark et al.,1990) indica que otro uso del "FWHM" es determinar la posición de una banda y la detección de su desplazamiento.



**Figura 2.13.** Componentes de una firma espectral.

**Fuente:** (Hauff, 2008)

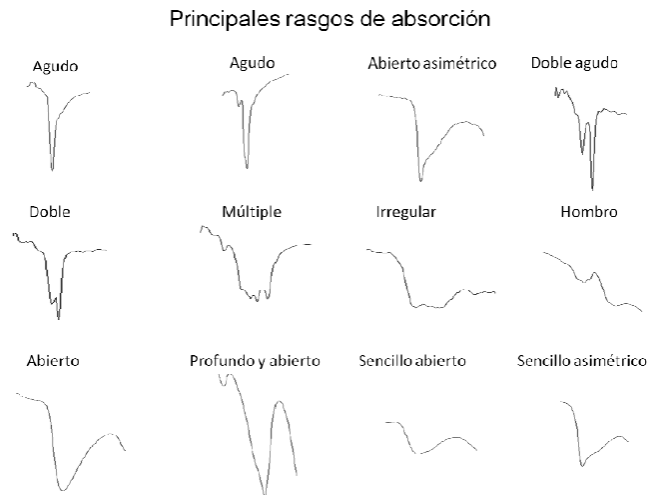
Describiendo a una firma espectral tenemos que los rangos de absorción en una firma espectral cambian de forma y profundidad respecto al eje de las ordenadas y cambian de longitud de onda respecto al eje de las abscisas indicándonos zonas de vibración de moléculas o radicales como OH, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub> y enlaces de catión OH COMO Al-OH, Mg-OH, Fe-OH.



**Figura 2.14.** Rangos mayores de absorción.

**Fuente:** (Hunt, 1977)

Los principales rasgos de absorción que se pueden observar dentro de una firma espectral son la forma y profundidad, ya que estos están en función de las características de la molécula del mineral analizado.



**Figura 2.15.** Principales rasgos de absorción de los minerales

**Fuente:** (Mamani, 2017)

### **2.5.6 Espectrometría de reflectancia de minerales de alteración hidrotermal**

Los yacimientos hidrotermales se encuentran localizados espacial y temporalmente en base a los rasgos característicos que presentan (temperatura y presión de formación, asociaciones minerales y conjuntos minerales), por tal motivo es de vital importancia la comprensión (fuentes y evolución) y caracterización de los conjuntos minerales de alteración (variaciones fisicoquímicas) presentes en los diferentes tipos de alteración hidrotermal, el conocer a detalle las asociaciones minerales es igualmente valioso, debido a que la identificación de un mineral puede indicar la presencia de otros. Cada zona de alteración hidrotermal contiene mezclas complejas de conjuntos minerales ya sean primarios (originales) o los minerales producto del metasomatismo (minerales nuevos).

Los conjuntos minerales de alteración presentan granos finos, incluso algunos de ellos carecen de cristalinidad (ambientes de baja temperatura) complicando su identificación óptica, de modo que muchas de las interpretaciones de minerales y sus relaciones paragenéticas tienden al error.

La espectroscopia de reflectancia surge como una potente herramienta de interpretación mineralógica, especialmente cuando usamos un espectrómetro manual, el cual nos entrega información en tiempo real sobre la presencia y contenido de minerales de alteración. Convirtiéndose así en una herramienta poderosa para la exploración mineral con poca inversión y gran calidad de resultados (Kerr et al., 2011).

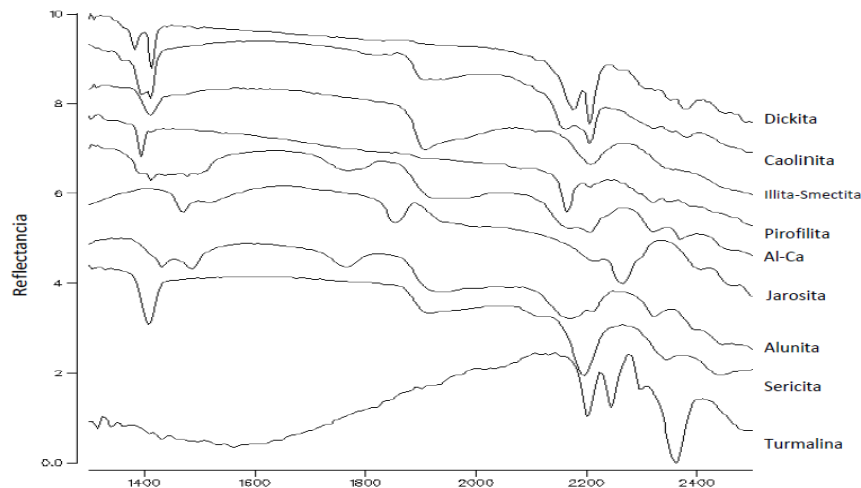
### **2.5.7 Comportamiento espectral de minerales típicos de alteraciones hidrotermales**

Para la detección de minerales de alteración hidrotermal por medio de espectrometría de reflectancia hacemos referencia a que estos presentan sus rasgos espectrales característicos en la región SWIR (infrarrojo medio) del espectro electromagnético.

(R. Clark et al., 1990), (Hauff, 2008) y (Hunt, 1977) en sus respectivas publicaciones afirman que la zona SWIR es sensible a moléculas y radicales como OH, H<sub>2</sub>O, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub> y a enlaces del catión OH como Al-OH, Mg-OH y Fe-OH. La espectroscopia por SWIR detecta las energías vibracionales de los enlaces químicos entre átomos y moléculas en la capa octaédrica del compuesto, permitiendo la detección de materiales tanto cristalinos como amorfos.

(Mamani, 2017) afirma que los minerales de alteración no sólo son identificables en base a sus características distintivas, también pueden ser identificadas por la forma de su firma espectral, la cual contiene información vital como la posición de sus ondas, su intensidad, forma de la depresión relacionada a la absorción y la forma total del espectro.

Para que sea posible la identificación de minerales, su presencia debe ser mayor al 5% de la muestra, salvo la ventaja de que el mineral a mapear sea altamente reflectivo. Cuando se trata con mezclas de minerales afines al infrarrojo medio, se habla que el mineral dominante es fácilmente detectable, pero los demás minerales deberán estar presentes en más del 10% para generar datos confiables. Cuando se trata de minerales escasamente reflectantes su presencia debe ser mayor al 20%.



**Figura 2.16.** Firmas espectrales de minerales

**Fuente:** (SpecMin, 2005)



(Hauff ,2008) en base a su recopilación bibliográfica, publica la lista de minerales identificables dentro del rango del SWIR (ver figura 2.17).

Environment of formation	Standard terminology	SWIR active mineral assemblage (key minerals are in bold)
Intrusion-related	Potassic (biotite-rich), K silicate, biotitic	<b>Biotite</b> (phlogopite), actinolite, sericite, chlorite, epidote, muscovite, anhydrite
	Sodic, sodic-calcic	<b>Actinolite</b> , clinopyroxene (diopside), chlorite, epidote, scapolite
	Phyllic, sericitic	<b>Sericite</b> (muscovite-illite), chlorite, anhydrite
	Intermediate argillic, sericite-chlorite-clay (SCC), argillic	<b>Sericite</b> (illite-smectite), chlorite, kaolinite (dickite), montmorillonite, calcite, epidote
	Advanced argillic	<b>Pyrophyllite, sericite, diaspore, alunite, topaz, tourmaline, dumortierite, zunyite</b>
	Greisen	<b>Topaz, muscovite, tourmaline</b>
	Skarn	<b>Clinopyroxene, wollastonite, actinolite-tremolite, vesuvianite, epidote, serpentinite-talc, calcite, chlorite, illite-smectite, nontronite</b>
	Propylitic	<b>Chlorite, epidote, calcite, actinolite, sericite, clay</b>
High-sulfidation epithermal	Advanced argillic—acid sulphate	<b>Kaolinite, dickite, alunite, diaspore, pyrophyllite, zunyite</b>
	Argillic, intermediate argillic	<b>Kaolinite, dickite, montmorillonite, illite-smectite</b>
	Propylitic	<b>Calcite, chlorite, epidote, sericite, clay</b>
Low-sulfidation epithermal	"Adularia" — sericite, sericitic, argillic	<b>Sericite, illite-smectite, kaolinite, chalcedony, opal, montmorillonite, calcite, dolomite</b>
	Advanced argillic—acid-sulphate (steam-heated)	<b>Kaolinite, alunite, cristobalite</b> (opal, chalcedony), jarosite
	Propylitic, zeolitic	<b>Calcite, epidote, wairakite, chlorite, illite-smectite, montmorillonite</b>
Mesothermal	Carbonate	<b>Calcite, ankerite, dolomite, muscovite (Cr-V-rich), chlorite</b>
	Chloritic	<b>Chlorite, muscovite, actinolite</b>
	Biotitic	<b>Biotite, chlorite</b>
Sediment-hosted gold	Argillic	<b>Kaolinite, dickite, illite</b>
Volcanogenic massive sulfide	Sericitic	<b>Sericite, chlorite, chloritoid</b>
	Chloritic	<b>Chlorite, sericite, biotite</b>
	Carbonate	<b>Dolomite, siderite, ankerite, calcite, sericite, chlorite</b>
Sediment-hosted massive sulfide	Tourmalinite	<b>Tourmaline, muscovite</b>
	Carbonate	<b>Ankerite, siderite, calcite, muscovite</b>
	Sericitic	<b>Sericite, chlorite</b>
	Albitic	<b>Chlorite, muscovite, biotite</b>

**Figura 2.17.** Resumen de los minerales activos en el infrarrojo con características de absorción SWIR

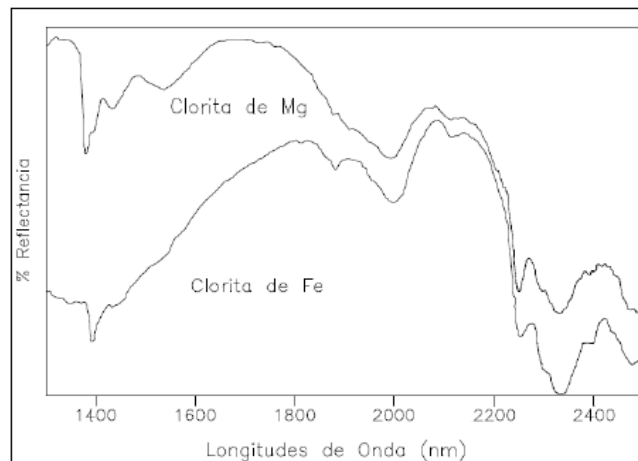
**Fuente:** (Hauff, 2008) Modificado de: (Thompson & Thompson ,1996)

### 2.5.8 Química de los minerales

Partiendo de que en los minerales están presentes varios enlaces químicos y que estos vibran en diferentes rangos energéticos, es mediante la interpretación de la posición de la longitud de la onda que es factible su identificación. La presencia de cationes como Al, Mg, Fe están enlazados a diferentes longitudes con moléculas mayores como OH, H<sub>2</sub>O, CO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub>, permitiéndonos su detección en la región SWIR, debido a sus posiciones específicas y sus longitudes de ondas predecibles. Las posiciones de longitud de onda nos permiten identificar los enlaces moleculares específicos y también nos sirven para identificar las especies minerales. En definitiva, cualquier grupo mineral receptivo al campo infrarrojo o series de soluciones sólidas donde la sustitución química es un factor que determina las especies es detectable por medio de espectrometría infrarroja. Con lo antes expuesto, expresamos que ésta es una técnica apropiada y con grandes ventajas para la elaboración de cartografía en la identificación de minerales (Saldivar, 2020).

(Mamani, 2017) y (Saldivar, 2020) citan ejemplos sobre los cambios que se evidencian en las firmas espectrales en base a las variables químicas que experimentan los minerales. Entre ellos tenemos:

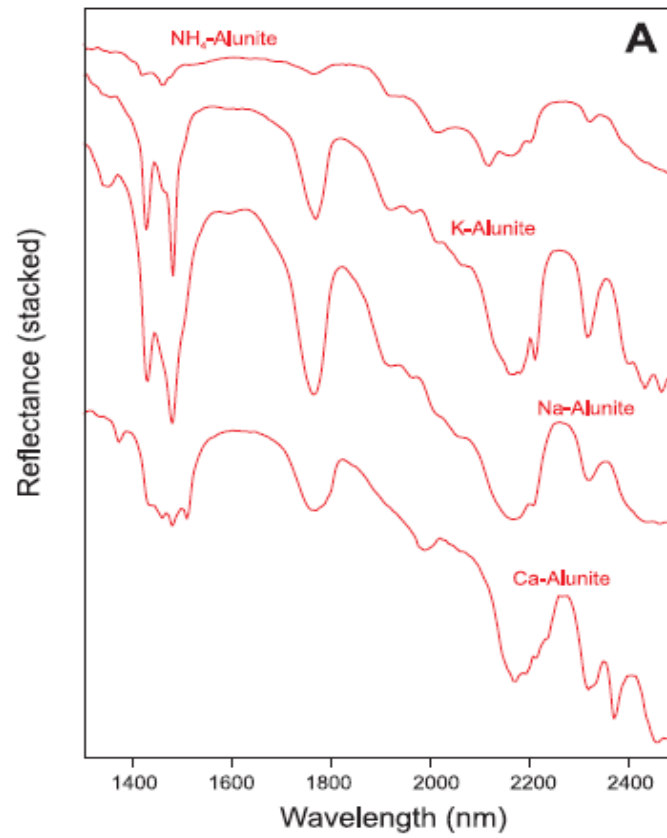
La presencia del hierro en la mayoría de los minerales muestra en su firma espectral una pendiente positiva en los rangos de 1300 -1900  $\mu\text{m}$ . Es posible determinar la presencia de clorita con hierro de una que no lo tiene, esto debido a la variabilidad de los rangos de absorción que muestran sus firmas espectrales, el cambio que se evidencia en el rango de 1400nm – 1850nm.



**Figura 2.18.** Composición química de la clorita con magnesio y hierro.

**Fuente:** (Saldivar, 2020)

Para las alunitas su rasgo característico es debido al enlace Al-OH con una longitud de onda de 1480 nm, cambia a ~1,461nm con presencia de  $\text{NH}_4$ , con Potasio puro (K) ~1,478 nm, con Sodio (Na) 1.496 nm y con Calcio (Ca) a 1510 nm.



**Figura 2.19.** Firmas espectrales de las Alunitas ricas en K, Na, Ca y NH<sub>4</sub>

**Fuente:** (Kerr et al., 2011)

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### Metodología

##### 3.1 Tratamiento digital de imágenes satélite

El tratamiento digital de imágenes se refiere al procesamiento y extracción de información por medio de un computador, ya que este tiene la capacidad de analizar información a lo largo de todo el rango del espectro electromagnético. La metodología del procesamiento informático se basa en recrear la capacidad visual humana y su aprendizaje, de modo que sea posible hacer inferencias y toma de decisiones en base a la disponibilidad de información visual (Gonzalez & Woods, 2002).

Existen tres niveles de tratamiento de información los cuales son:

- **Nivel bajo**

Está relacionado con el pre-procesamiento de las imágenes, los procesos en este nivel son: reducción de ruido, mejora del contraste y nitidez. Por lo tanto, la entrada y salida del proceso son imágenes.

- **Nivel medio**

En este nivel la entrada es una imagen, pero su salida se caracteriza por presentar atributos extraídos de ellas. Por lo tanto, las imágenes pueden ser segmentadas (regiones, objetos) y descritas (caracterización de objetos para reducirlos a una forma adecuada para el procesamiento y clasificación de objetos individuales).

- **Nivel alto**

El nivel superior implica “Dar sentido” a los objetos reconocidos en la imagen, con la consiguiente aplicación de funciones cognitivas asociadas a la visión y experiencia del investigador (generar una clasificación exacta).

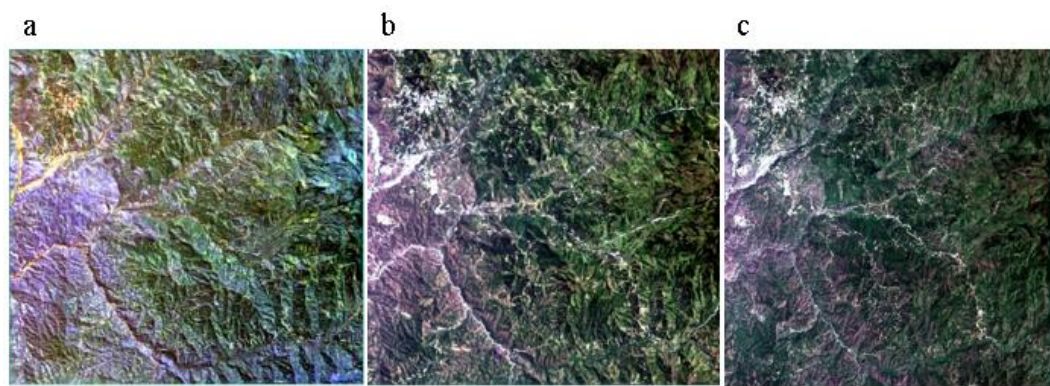
##### 3.2 Procesamiento de datos

###### 3.2.1 Composición de imágenes en color natural

Las composiciones de color en imágenes satelitales, se las realiza por medio de la asignación de los colores primarios (rojo, verde y azul) a un juego de tres bandas distintas de una imagen, en base a un criterio y orden establecido. En definitiva, una composición en color natural, nos permite visualizar la imagen tal cual el ojo

humano la observaría, es decir la vegetación será representada por color verde, cuerpos de agua en azul, etc. (Chuvieco & Huete, 2016).

Para cada sensor existe una combinación de bandas específicas que definen una composición RGB (por sus siglas en inglés) en color natural. Para nuestro caso, tenemos para LANDSAT 8 la combinación 3(Rojo), 2(Verde) y 1 (azul). Para el sensor ASTER, la combinación se expresa mediante la conjugación de las siguientes bandas 1(Rojo), 2\*3 (Verde) y 4 (Azul). Finalmente, para SENTINEL 2 es 4 (Rojo), 3 (Verde) y 2 (Azul).



**Figura 3.1.** Imágenes ASTER, LANDSAT 8 y SENTINEL 2 en color natural.

Fuente: (USGS,2020). Elaboración propia.

*Nota: a) ASTER LIT (2004), b) LANDSAT 8 OLI (2020), c) SENTINEL 2B (2019)*

### **3.2.2 Preprocesamiento para las imágenes satelitales ASTER L1T, LANDSAT 8 OLI, SENTINEL 2**

Las imágenes satelitales empleadas en este trabajo presentan un elevado nivel de preprocesamiento, es decir, los servidores entregan los productos en niveles de radiancia, por lo cual, únicamente es necesaria la aplicación de una corrección atmosférica a la imagen con la finalidad de obtener niveles de reflectancia. Esto implica una corrección de la radiación que cualquier superficie refleja, sobre la radiación que incide sobre la misma, permitiéndonos obtener la reflectancia relativa de la imagen, de modo que sea posible observar los picos de absorción, reflexión que los materiales presentan en las bandas de los sensores (Caiza, 2018).

Caiza (2018) manifiesta que las correcciones antes mencionadas deben ser realizadas en softwares especializados en el manejo de imágenes satelitales multiespectrales o hiperspectrales, debido a que los procesos se realizan mediante procesos matemáticos que implican el paso de niveles digitales (ND) a niveles de

reflectancia. Para nuestro trabajo, las correcciones se realizaron en el software ENVI 5.3.

### 3.2.2.1 Conversión de niveles digitales a reflectancia

La información contenida en una imagen satelital está en niveles digitales, los cuales no representan a una variable biofísica, es decir son valores crudos. Por lo tanto, no se los puede usar para la obtención de índices espectrales, mucho menos compararlos con los obtenidos de bibliotecas espectrales. Esto debido a que los índices espectrales trabajan exclusivamente con valores de reflectancia.

La conversión de niveles digitales a reflectancia se da en dos pasos:

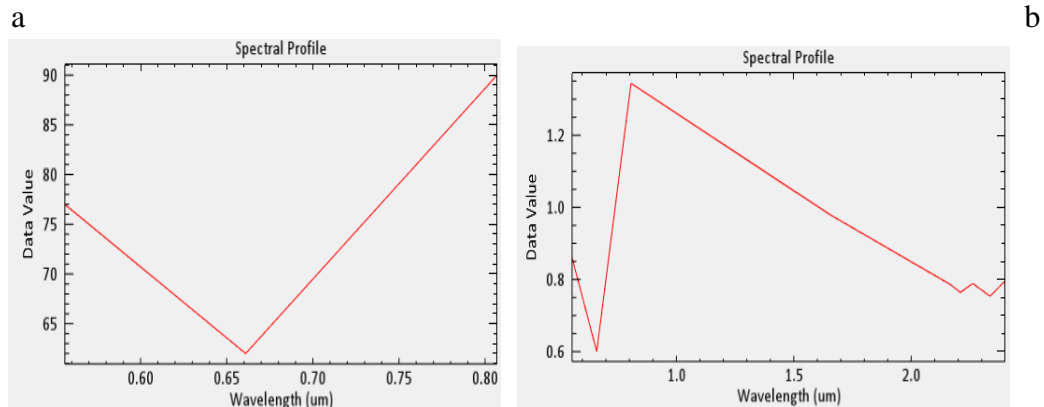
1. Conversión de ND a radiancia (corrección radiométrica).
2. Conversión de radiancia a *reflectancia aparente* (cálculo de reflectancia en el sensor).

Si a los procesos anteriores le sumamos la eliminación de los efectos atmosféricos, se convertiría de una reflectancia en el sensor a una *reflectancia en la superficie terrestre* (corrección atmosférica) (Caiza, 2018).

### 3.2.2.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica se realizó en el software ENVI 5.3, mediante la herramienta *Internal Average Relative Reflectance (IARR)*. El algoritmo *IARR* funciona a partir del análisis de toda la escena y posterior cálculo de un espectro medio, el mismo que será usado como referencia para los demás píxeles. Finalmente, el espectro de referencia obtenido es dividido por el valor de cada píxel de la imagen con el objetivo de pasar de niveles de radiancia a niveles de reflectancia (Visual Information Solutions, 2009).

La corrección atmosférica por medio de la herramienta *IARR* es la más propicia para el desarrollo de mapeo mineralógico, esto debido a que no necesita de un conocimiento previo de las muestras tomadas en campo, simplemente el algoritmo se ejecuta y los datos son reescalados a niveles de reflectancia, sumándose a esto la característica de que todos los espectros tienen casi el mismo albedo (Pour & Hashim, 2015).



**Figura 3.2.** Cambios en los picos de absorción al aplicar corrección atmosférica (IARR)

**Fuente:** Elaboración propia

*Nota:* Los valores de absorción son tomados de la imagen ASTER, en donde: a) imagen cruda, b) imagen corregida.

### 3.2.2.3 Corrección térmica

La corrección de las bandas térmicas se realizó en dos etapas. La primera consiste en una corrección atmosférica térmica (TAC). En segunda instancia se procesan las bandas resultantes del paso uno y se las pasan a valores de emisividad, siendo este valor el indicado para la interpretación litológica y mineralógica del presente trabajo. A continuación, detallamos cada proceso.

- **Thermal Atmospheric Correction (TAC)**

La corrección de bandas térmicas se realiza mediante el algoritmo In-Scene Atmospheric Compensation (ISAC) presente en el programa ENVI. Este algoritmo asume que la atmósfera es uniforme a lo largo de toda la escena y que existe un cuerpo negro dentro de la imagen. El proceso se realiza mediante el análisis de toda la escena con la finalidad de determinar una longitud de onda que contenga el mayor brillo y temperatura. Posteriormente, esta longitud de onda es usada como referencia ante los demás píxeles, por lo tanto, únicamente los espectros que contengan el brillo y temperatura de esa longitud de onda serán procesados en el cálculo de la compensación atmosférica (Visual Information Solutions, 2009).

• In-Scene Atmospheric Compensation (ISAC) algorithm

– Assumes linear relationship between observed radiance and surface-leaving radiance such that:

$$L_{obs}(\lambda; T) = \tau(\lambda) \cdot L_s(\lambda; T) + L_u(\lambda) - \tau(\lambda)[1 - \epsilon(\lambda)]L_d(\lambda)$$

*This term is neglected!*

$$L_s(\lambda; T) = \epsilon(\lambda) \cdot L_{BB}(\lambda; T)$$

Planck Equation for Blackbody (BB)

$$L_{BB}(\lambda; T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} - 1\right)}$$

$$T'(\lambda, L_{obs}) = \frac{c_3}{\lambda \cdot \left[\ln\left(\frac{c_1}{\lambda L_{obs}}\right) - 1\right]}$$

Inverse Planck for "Brightness" Temperatures

Figura 3.3. Desarrollo del algoritmo ISAC

Fuente: (Gorin, 2002)

Donde:

$L_{BB}$  = Radiancia emitida por el cuerpo negro teórico.

$\epsilon$  = Emisividad de la superficie.

$\lambda$  = Longitud de onda.

T = Temperatura.

$c_1$  = Constante de radiación ( $3.72 \times 10^8 \text{ Wm}^{-2}\mu\text{m}^4$ )

$c_2$  = Constante de temperatura ( $1.439 \times 10^4 \mu\text{mk}$ )

• **Emissivity Normalization**

La normalización de la emisividad se utiliza para el cálculo de los valores de emisividad y temperatura de los datos de radiancia térmica infrarroja. El cálculo se realiza mediante la obtención de la temperatura para cada píxel y banda de los datos usando un valor de emisividad fijo. La temperatura más alta de cada píxel, se utiliza para calcular los valores de emisividad utilizando la función de Planck.

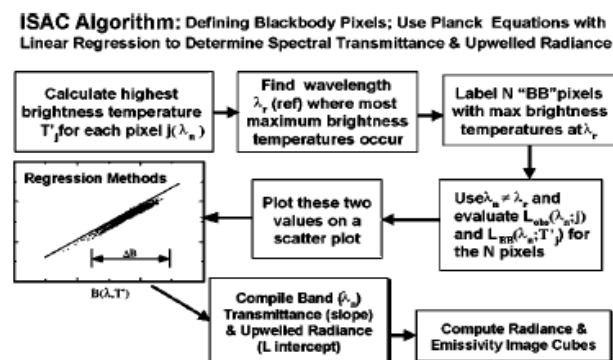


Figura 3.4. Diagrama de flujo del algoritmo ISAC

Fuente: (Gorin, 2002)



### **3.3 Construcción de máscaras**

La construcción de máscaras forma parte del tratamiento digital de imágenes satelitales a nivel medio (segmentación), es decir, entra al procesamiento una imagen y como resultado tenemos la extracción de sus atributos. El proceso de segmentación implica la búsqueda e identificación de zonas homogéneas tomando como base una información determinada. Por lo tanto, el proceso implica la clasificación de zonas en base a sus características espectrales homogéneas (Mather, 2011).

La construcción de máscaras en el presente trabajo tiene como objetivo la identificación y posterior eliminación de valores espectrales de zonas de vegetación, zonas urbanas y construcciones mineras presentes en la zona de estudio. Esto con la finalidad de minimizar la aparición de falsas anomalías debido a la similitud en las firmas espectrales entre una cubierta y otra.

- **Máscara de vegetación**

La construcción de esta máscara se realiza por medio del cálculo del índice de vegetación normalizada (NDVI). El NDVI es un índice mediante el cual se transforman datos multispectrales a una mono banda que contiene una imagen que muestra la vegetación contenida en cada píxel. En consecuencia, los valores altos del NDVI (más brillantes) representan vegetación saludable (alto contenido de clorofila).

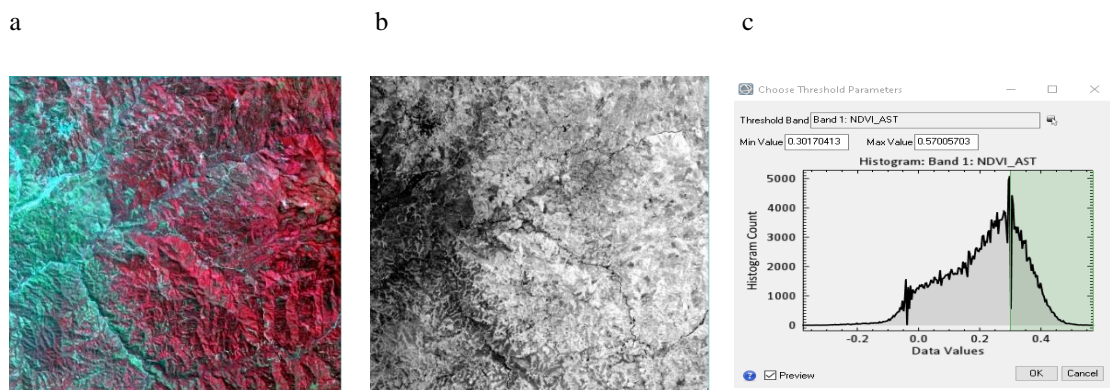
La razón por la cual realizamos este enmascaramiento es debido a que la vegetación genera significativos errores al momento de la ejecución de los procesos espectrales (mapea vegetación como si fueran minerales). Nuestra finalidad es el mapeo de afloramientos y suelo desnudo. Razón por la cual se procedió a realizar muestreos digitales en zonas con presencia de vegetación, obteniéndose un valor mínimo y máximo para toda la escena (estos valores varían para cada sensor). Una vez calculados estos valores, se procede al enmascaramiento de las zonas vegetadas que cumplen con el rango establecido.

**Tabla 3.1.** Umbral para la selección de píxeles de vegetación leñosa

Imagen Satelital	Umbral
ASTER L1T	$0.30 < x \leq 0.57$ $x > 0.30$
LANDSAT 8 OLI	$0.32 < x \leq 0.68$ $x > 0.32$
SENTINEL 2	$0.03 < x \leq 0.40$ $x > 0.03$

**Fuente.** Elaboración propia

*Nota: Los umbrales varían de una imagen con respecto a otra debido a las diferencias en la resolución espacial y espectral que posee cada sensor*

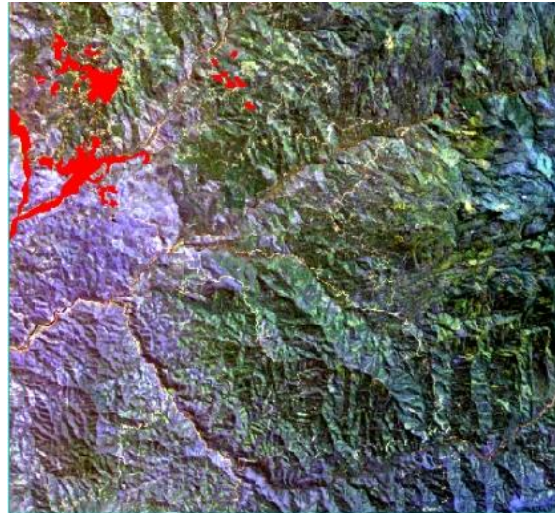
**Figura 3.5.** Cálculo del NDVI en ENVI

**Fuente.** (USGS,2020). Elaboración propia.

*Nota: Imagen ASTER del año 2004. a) Combinación RGB infrarrojo color (3,2,1). La vegetación se aprecia en color rojo. b) NDVI, los píxeles brillantes corresponden a vegetación leñosa. c) Umbral de selección de píxeles.*

- **Máscara de zonas urbanas, mineras**

El enmascaramiento se lo hace por medio de la creación de un área de interés que está en función de la silueta de la zona conflictiva.



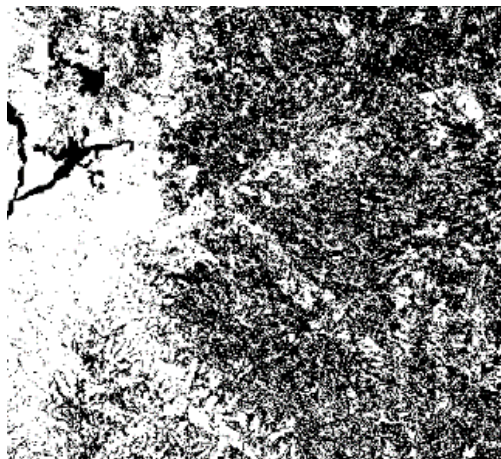
**Figura 3.6.** Enmascaramiento de zonas urbanas mediante la herramienta ROI de ENVI

**Fuente:** (USGS,2020). Elaboración propia

*Nota: Imagen ASTER del año 2004. Las zonas en rojo corresponden a la máscara*

- **Construcción de la máscara**

Para el desarrollo de esta operación es necesario unir los archivos que contienen las máscaras antes elaboradas. Una vez unidos los archivos se le condiciona al software la ejecución de la opción “*Selected areas OFF*”, es decir elimine los valores de los píxeles que contienen esas zonas, de modo que a futuro ya no generen mapeos erróneos.



**Figura 3.7.** Máscara de la zona de estudio

**Fuente:** (USGS,2020). Elaboración propia

*Nota: Imagen ASTER del año 2004. Los píxeles en negro no contienen información, únicamente los píxeles blancos serán utilizados en los mapeos espectrales*

### 3.4 Procesamiento de imágenes satelitales

#### 3.4.1 Combinaciones RGB

Las combinaciones de bandas son utilizadas en teledetección debido a que al asignar un juego de bandas a los canales RGB (rojo, verde y azul), estos realzan la respuesta espectral de los minerales, mostrándolos en distintas coloraciones de acuerdo a su composición. Esta técnica es realizada generalmente para un mapeo preliminar de zonas con presencia de minerales arcillosos y óxidos.

##### 3.4.1.1 RGB para ASTER L1T

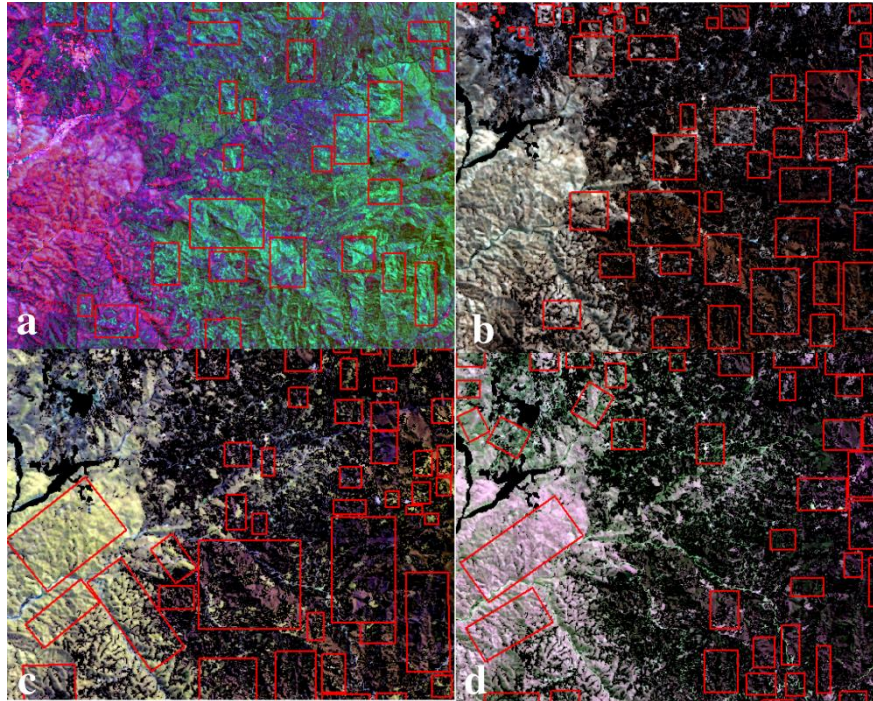
Se ha empleado las siguientes combinaciones en RGB (ver Anexo A):

- Azcurra et al. (2003) plantea la combinación RGB 5-3-1 usado en el mapeo de minerales arcillosos.
- Marquetti et al. (2004) establece la combinación RGB 4-6-9, el mismo que es empleado para mapeo de minerales arcillosos.
- Di Tommaso & Rubinstein (2005) plantean la combinación RGB 4-6-1 para mapeo de minerales arcillosos y óxidos
- Sekandari et al. (2020) establece la combinación RGB 6-2-8 para la discriminación litológica de unidades que contienen Al/Fe-OH, Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup> y Mg-Fe-OH/CO<sub>3</sub>.

En la figura 3.8 observamos que los minerales de arcillosos presentan diferentes coloraciones, esto en base a las diferentes combinaciones que se dieron a las bandas de ASTER. Para la combinación RGB 5-3-1 propuesta por (Azcurra et al., 2003) (Figura 3.8a), estos presentan una coloración verde clara. En el RGB 4-6-9 propuesto por (Marquetti et al., 2004) (Figura 3.8b), las zonas de interés se mapean de color marrón, además las zonas que presentan tonalidades rosado pálido (muy cercano al blanco) caracterizándose por la presencia de alteración argílica a fílica. El RGB 4-6-1 de (Di Tommaso & Rubinstein, 2005) (Figura 3.8c) los minerales arcillosos aparecen en tonos morados. Finalmente, el RGB 6-2-8 planteado por (Sekandari et al., 2020), (Figura 3.8d) mapea minerales que contienen Al/Fe-OH mezclados ligeramente con minerales de Mg-Fe-OH/CO<sub>3</sub> y los presenta en color púrpura.

Para el mapeo preliminar de zonas de alteración con presencia de óxidos, nos remitimos a las combinaciones RGB 4-6-1 y RGB 6-2-8 propuestas por (Di

Tommaso & Rubinstein, 2005) y (Sekandari et al., 2020) respectivamente. En la primera combinación, los óxidos se los observa de color amarillo (figura 3.8c), mientras que en la segunda (figura 3.8d), el autor señala que el color verde oscuro se debe a la presencia de minerales Fe+2 / Fe+3.



**Figura 3.8.** Combinaciones de bandas en ASTER

**Fuente:** (USGS, 2020). Elaboración propia.

*Nota:* a) RGB 5-3-1, b) RGB 4-6-9, c) RGB 4-6-1, d) RGB 6-2-8. Los recuadros rojos representan zonas con presencia de minerales arcillosos y presencia de óxidos.

### 3.4.1.2 RGB para LANDSAT 8 OLI

Pour & Hashim (2015) proponen la combinación RGB 10-11-7 (ver Anexo F). La adición de dos bandas termales (10-11), mejoran significativamente la calidad de los resultados debido a que las bandas termales trabajan en función de la temperatura y la emisividad del objeto a mapear. De este RGB el color rojo representa altos valores de emisividad (alto contenido de silicatos), en azul y rosado se mapean unidades que contienen rocas con una emisividad moderada a baja. La contribución de la banda 7 refleja la absorción de rocas en la región del infrarrojo de onda corta (SWIR) debido a la presencia de minerales que contienen enlaces Al-OH, Mg-OH, Si-O-H y presencia de Fe y CO<sub>3</sub>. En definitiva, las áreas en tonalidad azul contienen rocas con pocos minerales de silicato y las zonas amarillas



corresponden a zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal (previa evaluación de sus firmas espectrales).

#### **3.4.1.3 RGB para SENTINEL 2**

La combinación RGB 8-11-12 propuesta para SENTINEL 2, se deriva del RGB 5-6-7 de LANDSAT 8 propuesto por (Cunha, 2015). Para lograr esta combinación en SENTINEL 2, únicamente se ha relacionado las bandas de los sensores de acuerdo a la similitud en sus longitudes de ondas (bandas equivalentes).

El RGB 8-11-12, muestra zonas de vegetación frondosa en color rojo, cuerpos de agua en color negro (en nuestro caso mapea los ríos y las relaveras de la zona). Finalmente, los afloramientos y suelo desnudo se presentan en tonos azules (ver Anexo J).

#### **3.4.2 Cocientes de bandas**

Los cocientes de bandas son técnicas espectrales que consisten en una división del valor numérico digital de una banda para el valor numérico digital de otra. Por lo tanto, en el numerador se colocan las bandas en las cuales el mineral a mapear presenta altas reflectividades, mientras que en el denominador se coloca la banda en la cual se localizan las absorciones. El resultado de este cociente de bandas no es una simple mono banda, si no que refleja valores numéricos digitales elevados (Píxeles brillantes), los cuales contienen firmas espectrales semejantes a los materiales que se quieren mapear. Cabe mencionar que otro beneficio del cociente de bandas es la capacidad que tiene este para minimizar los efectos topográficos derivados de las orientaciones de las pendientes y de los ángulos de iluminación solar (Mamani, 2017; Pour et al., 2018; Sekandari et al., 2020).

##### **3.4.2.1 Cocientes de bandas para ASTER**

Los cocientes de bandas para ASTER son los establecidos para el mapeo y delimitación de los distintos tipos de alteración hidrotermal (Ver tabla 3.2, Anexo B).

**Tabla 3.2.** Ratios de bandas usados para cartografiar tipos de alteración hidrotermal

Tipo de alteración Hidrotermal	Cociente
Argílica avanzada	4/6
Fílica	5/6
Propilítica	5/8

**Fuente:** (Mamani, 2017)

Por otro lado, Caiza (2018) establece el cociente 2/1 para el mapeo de óxidos.

### 3.4.2.2 Cocientes de bandas para LANDSAT 8

Para el mapeo de minerales de alteración, tenemos los siguientes cocientes de banda (ver tabla 3.3, Anexo G).

**Tabla 3.3.** Ratios de bandas usados para cartografiar minerales de alteración hidrotermal

Mapeo	Cociente
Óxidos de hierro	4/2
Hidroxilos contenidos en roca (rocas alteradas con presencia de arcillas y alunitas)	6/7
Minerales arcillosos (illita, caolinita, montmorillonita)	7/5

**Fuente:** (Cunha, 2015). Elaboración propia

Partiendo de los cocientes de bandas es posible hacer combinaciones en falso color, de tal modo que existen varias composiciones, siendo la más destacada para nuestra zona de estudio la propuesta por Kaufmann (1988), en donde se le asignan los cocientes 7/4, 4/3, 5/7 a los canales RGB respectivamente. El RBG de Kaufmann fue modificado para que pueda acoplarse a las longitudes de onda de LANDSAT 8, de modo que la nueva combinación es la siguiente (7/5, 6/7, 6/5) (ver Anexo G (Mapa 14)).

Cunha (2015) establece que en la combinación de Kaufmann las tonalidades rojas estarían relacionadas con zonas de alteración hidrotermal. Por otro lado, Mahboob et al. (2019) establece que las zonas rojas corresponden a la presencia de minerales que contienen hierro.

### 3.4.2.3 Cocientes de bandas para SENTINEL 2

Para el mapeo de minerales de alteración, tenemos los siguientes cocientes de banda (ver tabla 3.4, Anexo K).

**Tabla 3.3.** Ratios de bandas usados para cartografiar minerales de alteración hidrotermal

Mapeo	Cociente
Óxidos de hierro (todos los óxidos de Hierro)	4/2
Hidroxilos (minerales con presencia de hidroxilos)	11/12
Minerales arcillosos (illita, caolinita, montmorillonita)	12/8

**Fuente:** (Van der Meer et al., 2014; Van der Werff & Van der Meer, 2016). Elaboración propia

### 3.4.3 Índices de identificación litológica SWIR (Índices de Ninomiya)

#### (Exclusivo de ASTER)

Los índices de identificación litológica propuestos por (Ninomiya, 2003) permiten resaltar la presencia de minerales de alteración hidrotermal en función de su respuesta espectral, básicamente estos índices se centran en las bandas donde mayor reflexión o absorción presentan los minerales. Los índices de identificación litológica originalmente fueron propuestos para datos del nivel 1B de ASTER (nivel inferior al usado en este trabajo) y sin un preprocesamiento previo (corrección atmosférica).

Trabajos recientes como el de (Testa et al., 2018) aplican estos índices a imágenes ASTER L1T con correcciones atmosféricas obteniendo resultados mejorados frente



a aquellos derivados de imágenes satelitales sin correcciones previas (ver Anexo C).

**Tabla 3.4.** Índices de Ninomiya empleados para la detección de minerales de alteración hidrotermal

Índice	Bandas a usar	Minerales de reconocimiento
OHIa	$(B7/B6) * (B4/B6)$	Muscovita, Illita, Montmorillonita
OHIb	$(B7/B5) * (B4/B5)$	Pirofilita
ALI	$(B7/B5) * (B7/B8)$	Alunita
KLI	$(B4/B5) * (B8/B6)$	Caolinita, Dikita
CLI	$(B6/B8) * (B9/B8)$	Calcita

**Fuente:** (Ninomiya, 2003; Testa et al., 2018). Elaboración Propia

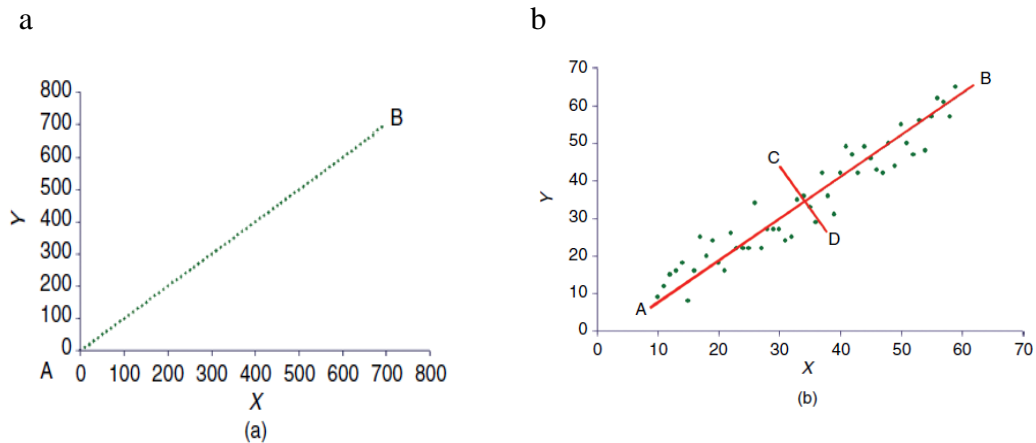
#### 3.4.4 Análisis de componentes principales (ACP)

El análisis de componentes principales es una transformación matemática compleja usada en el procesamiento de imágenes satelitales, que tiene por objetivo la reducción de la dimensionalidad de los datos sin la pérdida de información significativa (Chuvieco & Huete, 2016). La dimensionalidad de los datos es igual al número de bandas a analizar, se dice que las bandas tienen una alta correlación entre sí, razón por la cual existe una alta redundancia en los datos (información repetida).

Cuando dos variables ( $x$ ,  $y$ ) están plenamente correlacionadas, estas se las representa mediante una línea recta inclinada hacia arriba y a la derecha (Imagen 3.9a) ocupando una sola dimensión. Al existir una sola dimensión, la relación entre estos puntos podría darse en términos del segmento AB, es decir re ubicar el eje X a lo largo de esta línea, incluso si X e Y no están completamente correlacionadas podría existir una dirección dominante de dispersión o variabilidad de los datos (Imagen 3.9b).

Una vez reubicado el eje en la dirección dominante de variabilidad (AB) se puede asignar un eje menor (CD) en dirección ortogonal, de modo que CD es el reemplazo del eje Y. Los nuevos ejes (AB, CD) contienen información mucho más relevante sobre las estructuras de datos presentes en las bandas (No tienen correlación),

incluso al ser pequeña la proporción de variabilidad de los datos contenidos en CD, podrían ser eliminados sin una mayor pérdida de información (Mather, 2011).



**Figura 3.9.** Reducción de la dimensionalidad por medio de ACP

**Fuente:** (Mather, 2011)

*Nota a) Plena correlación de los datos. b) Cambio de ejes en función de la variabilidad de los datos.*

El ACP parte del análisis de una matriz varianza - covarianza, de los cuales se extraen los valores propios para cada uno de los componentes ( $\lambda_j$ ), los cuales indican la longitud de los nuevos componentes o la información que retienen. Los valores propios se encuentran en magnitudes descendentes (Generalmente las variaciones de las dos o tres primeras imágenes de las componentes principales representan más del 90% de la variación total en X).

La varianza original extraída de los componentes originales se calcula como la proporción entre el valor propio sobre la sumatoria de todos los valores propios (Chuvieco & Huete, 2016; Mather, 2011).

$$V_j = \frac{\lambda_j}{\sum_{j=1.p} \lambda_j}$$

Donde:

p = número total de las componentes.

El ACP tradicional consiste en realizar la transformación a todo el grupo de bandas que posee en sensor, tornándose este en un problema al momento del análisis de la información obtenida. Razón por la cual, existen numerosas variantes del ACP tradicional, siendo las de mayor interés para nuestro estudio las propuestas por los siguientes autores.

1. *Feature-Oriented Principal Component Selection – FPCS*. (Análisis de Componentes Principales Orientadas ) Propuesto por (Crosta & M. Moore, 1989)
2. *Crosta Technique*. Propuesto por (Loughlin, 1991), siendo esta una adaptación del método de (Crosta & M. Moore, 1989)

El primer método (FPCS) se aplica a un determinado grupo de bandas, las cuales presentan una alta o baja correlación y mediante la transformación de componentes se obtiene información única para cada banda.

Prol Ledesma & Ruiz-Armenta (1995) definen la FPCS como una técnica que permite la identificación de componentes principales que contienen información espectral de materiales específicos, de igual manera, determina la contribución de cada banda original relacionada a la respuesta espectral teórica de los materiales buscados. Para la interpretación de la respuesta espectral teórica, nos basamos en los signos ya sean estos positivos o negativos y en la magnitud de los vectores característicos.

El segundo método, propuesto por (Loughlin, 1991) tiene su máxima aplicabilidad en el mapeo de arcillas, óxidos e hidróxidos de hierro. La marcada destreza de este método se debe a que el análisis de componentes principales se lo realiza a un selecto subgrupo de 4 bandas, las cuales son seleccionadas en base a las posiciones de longitud de onda en donde los minerales a buscar manifiestan sus rasgos espectrales más significativos (reflexión y absorción).

#### **3.4.4.1 Componentes principales para ASTER L1T**

De acuerdo a los rasgos espectrales característicos de los principales minerales de alteración hidrotermal se proponen los siguientes subgrupos (Ver tabla 3.6, Anexo D).

**Tabla 3.5.** Subgrupos de Bandas de ASTER L1T usados en la determinación de los tipos de alteración hidrotermal.

Alteración	Subgrupo (B = banda)
Argílica avanzada	B1, B4, B6 y B7
Fílica	B1, B3, B5 y B6
Propilítica	B1, B3, B5 y B8
Óxidos	B1, B2 y B3

**Fuente:** (Mamani, 2017). Elaboración propia.

#### 3.4.4.2 Componentes principales para LANDSAT 8 OLI

Para el análisis de componentes principales se usan las bandas 2,3,4,5,6 y 7. La exclusión de las bandas 1,8 y 9 se debe a que estas no contienen información relevante para nuestro caso de estudio (Ver Tabla 3.7, Anexo H).

**Tabla 3.6.** Subgrupos de Bandas de LANDSAT 8 OLI usados en la determinación de óxidos e hidroxilos.

Objetivo a mapear	Subgrupo (B = banda)
Óxidos de hierro	B2, B4, B5 y B6
Hidroxilos	B2, B5, B6 y B7

**Fuente:** (Cunha, 2015). Elaboración propia.

#### 3.4.4.3 Componentes Principales para SENTINEL 2

Para el análisis de componentes principales se usan las bandas 2,3,4,5,6,7, 8a, 11, 12. La exclusión de las bandas 1,9,10 se debe a que estas no contienen información relevante para nuestro caso de estudio (Ver Tabla 3.8, Anexo L).

**Tabla 3.7.** Subgrupos de Bandas de SENTINEL 2 usados en la determinación de óxidos e hidroxilos.

Objetivo a mapear	Subgrupo (B = banda)
Óxidos de hierro	B2, B4, B8a y B11
Hidroxilos	B2, B8a, B11 y B12

**Fuente:** (Hu et al., 2018). Elaboración propia

### 3.4.5 Mapeo espectral SAM

El método SAM es un método de comparación automática que está basado en el coeficiente de similitud proporcional ( $\cos \theta$ ), este coeficiente se caracteriza por medir la diferencia que existe entre las curvas espectrales de referencia y las curvas espectrales presentes en la imagen satelital. El valor que puede tomar  $\theta$  es  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ , en donde  $\cos(0^\circ)$  es 1, por lo tanto, significa similitud y  $\cos(90^\circ)$  es 0 por lo tanto no refleja similitud. El algoritmo SAM toma a los espectros como vectores en un espacio n-dimensional (n es el número de bandas a analizarse), cada vector espectral tiene asociado una dirección y un módulo, siendo el módulo directamente proporcional a la iluminación solar. En términos generales, la clasificación SAM se realiza en base a la diferencia angular entre los espectros de los vectores de la imagen y los vectores de referencia (Mather, 2011). La fórmula que emplea el algoritmo es la siguiente:

$$\cos(\theta) = \frac{\sum_{i=1}^N r_i t_i}{(\sum_{i=1}^N r_i^2)^{0.5} (\sum_{i=1}^N t_i^2)^{0.5}}$$

Donde:

$\theta$ : Ángulo comprendido entre los vectores

n: Número de bandas.

r: Vector de referencia.

t: Vector de la escena.

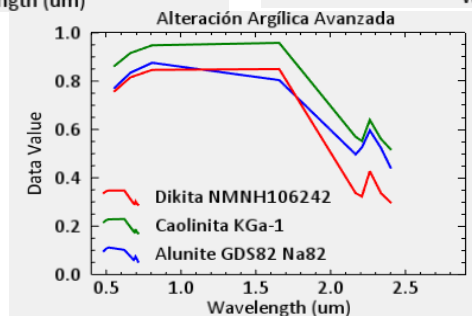
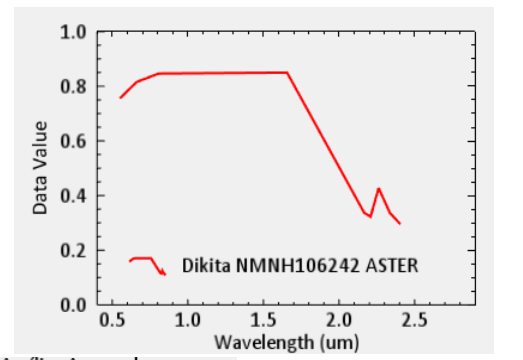
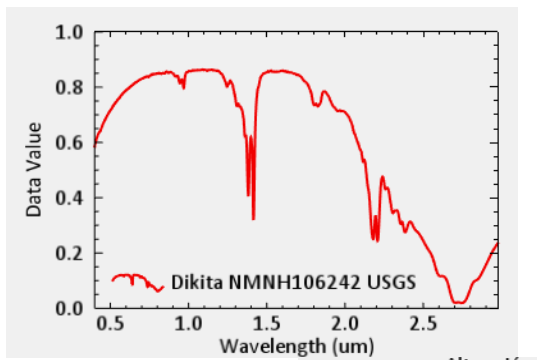
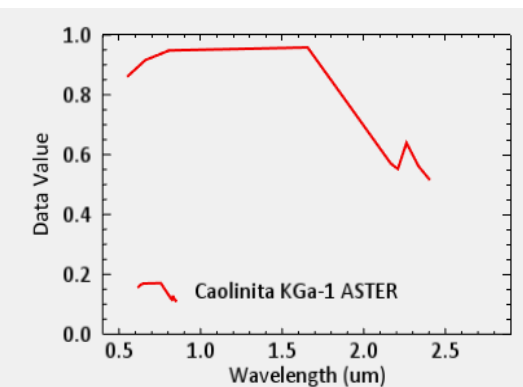
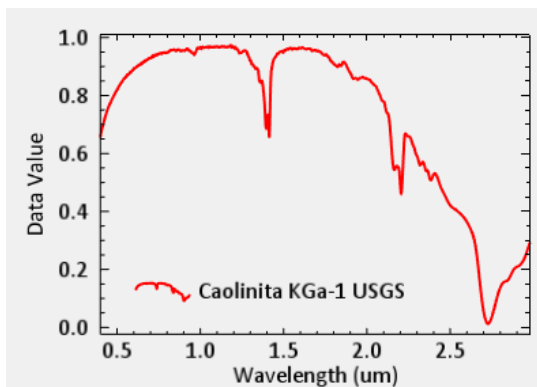
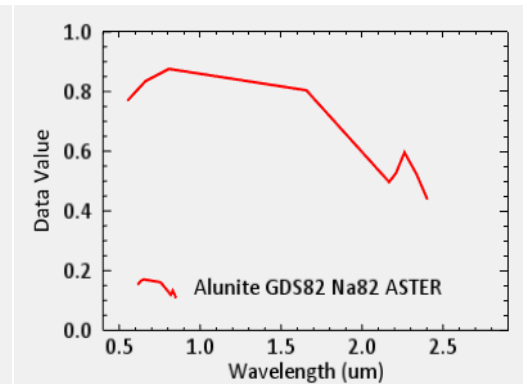
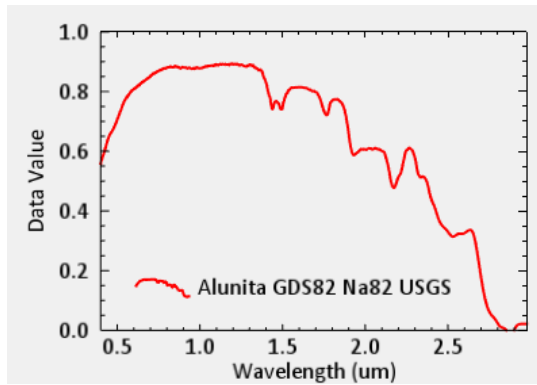
## 3.5. Muestreo digital para la identificación de zonas de alteración hidrotermal.

### 3.5.1 Análisis de las firmas espectrales

#### 3.5.1.1 Reporte espectral para ASTER L1T

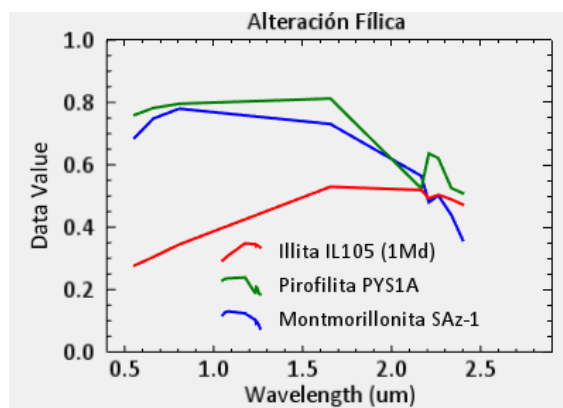
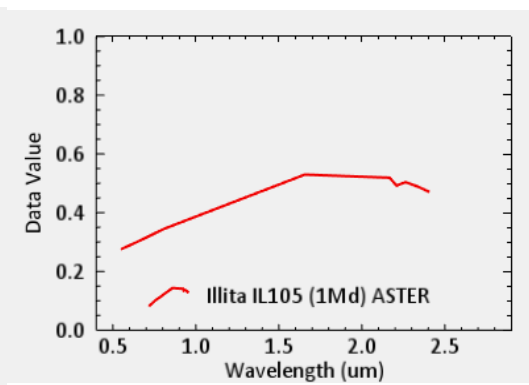
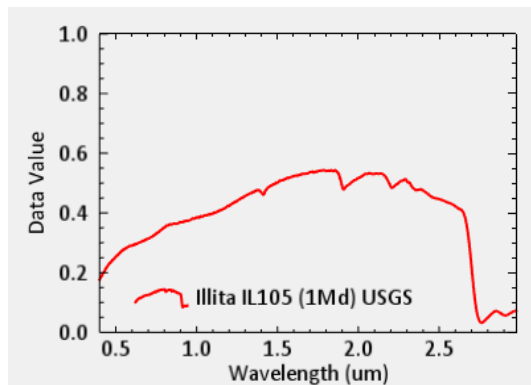
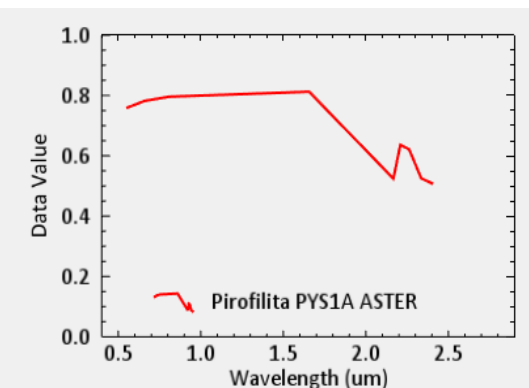
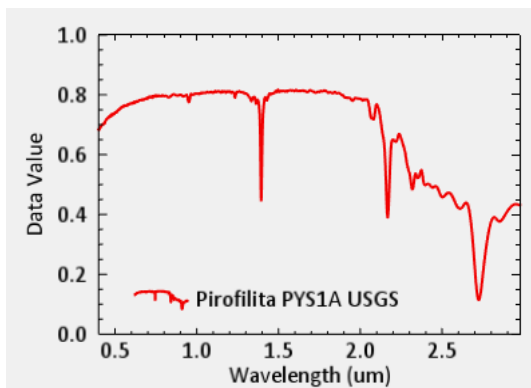
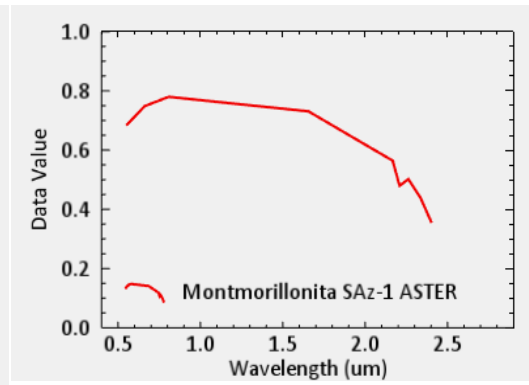
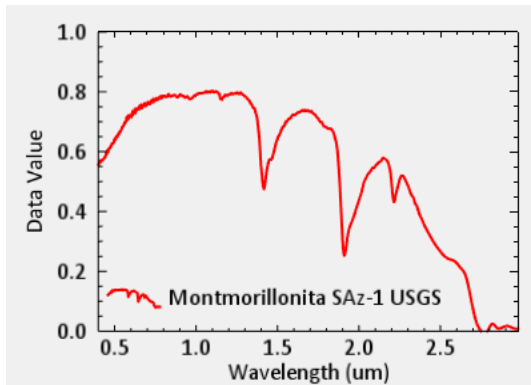
Firma espectral de la USGS

Reensamble para ASTER



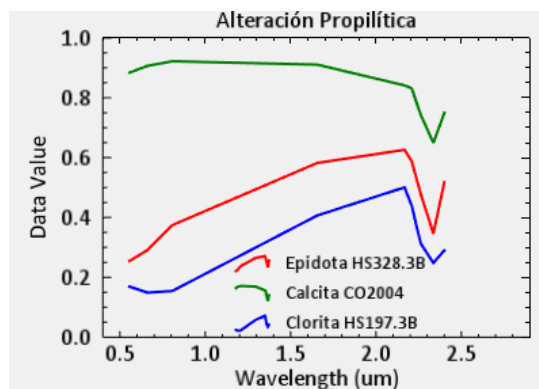
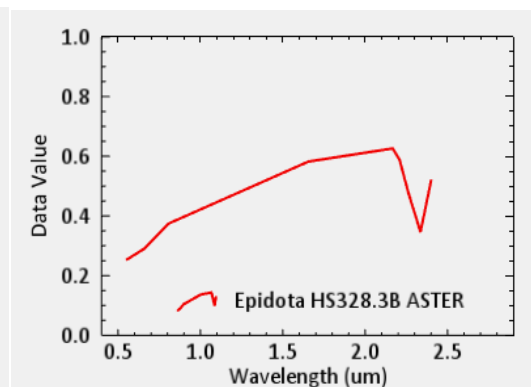
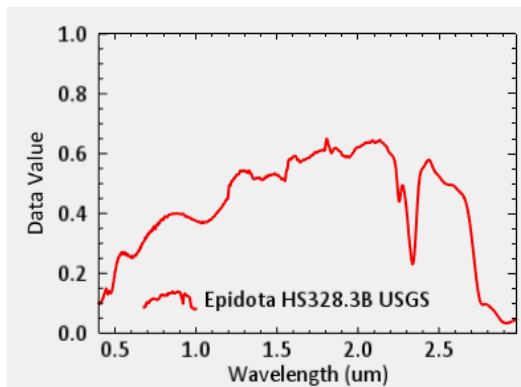
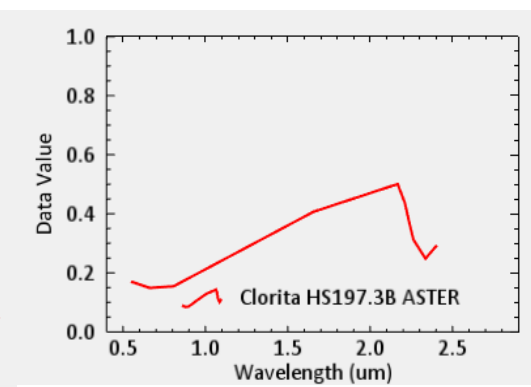
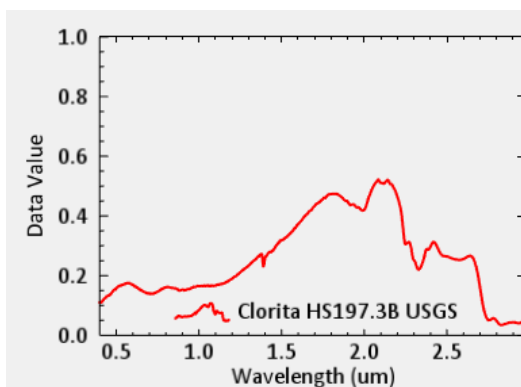
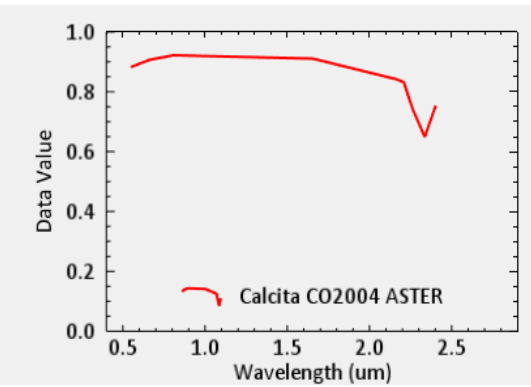
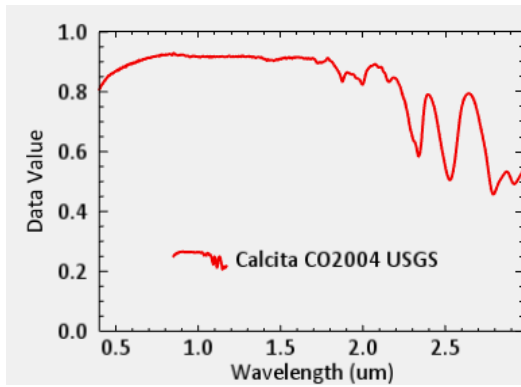
Firma espectral de la USGS

Reensamble para ASTER



Firma espectral de la USGS

Reensamble para ASTER

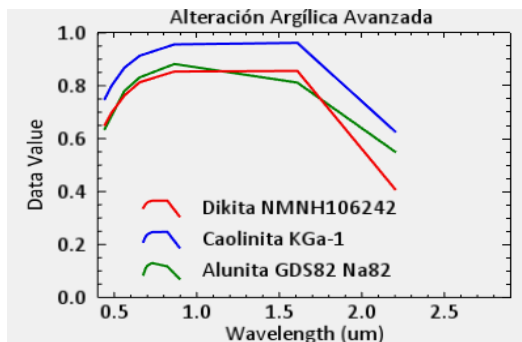
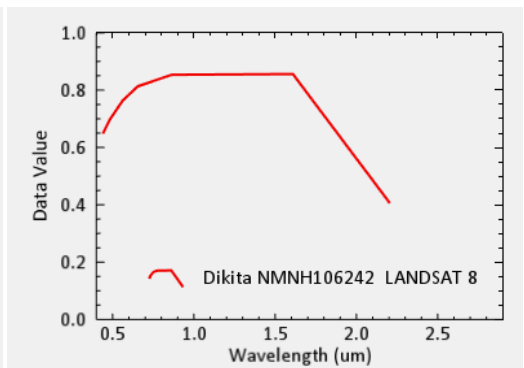
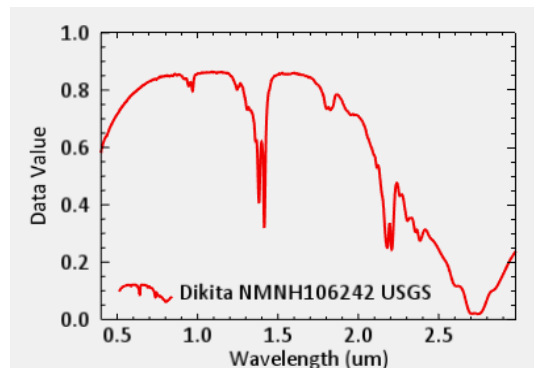
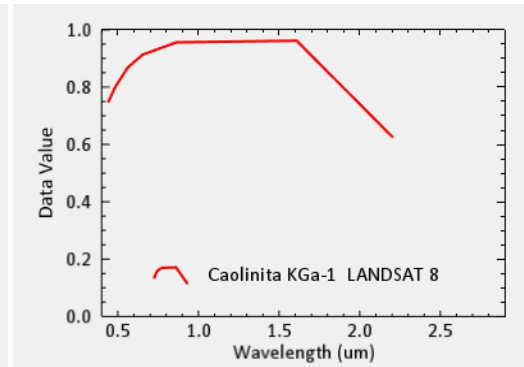
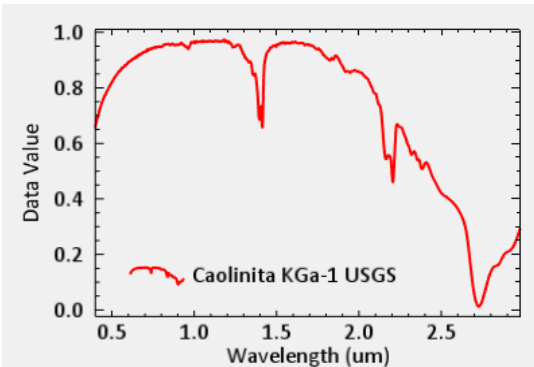
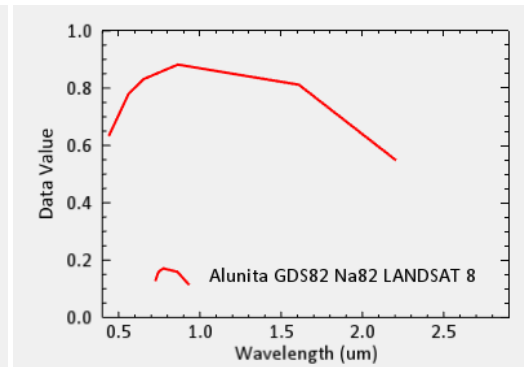
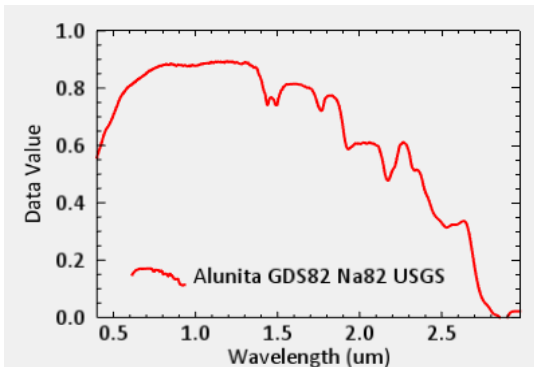




### 3.5.1.2 Reporte espectral para LANDSAT 8 OLI

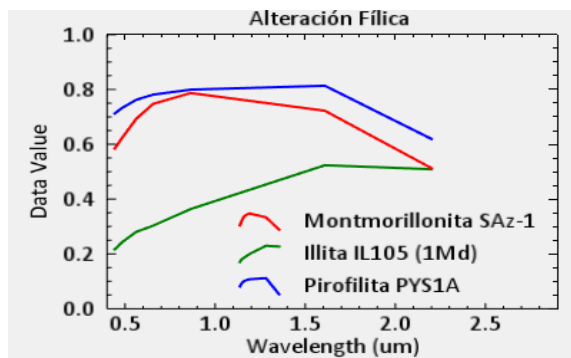
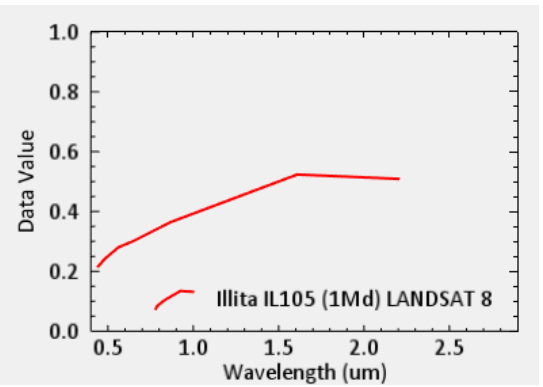
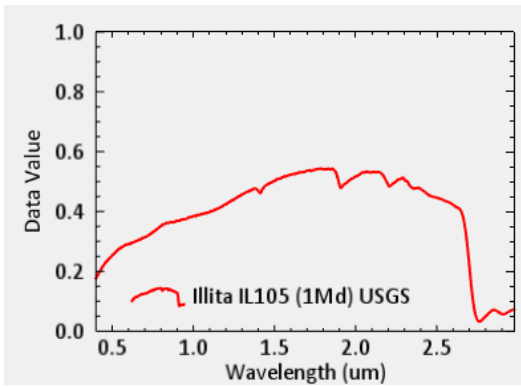
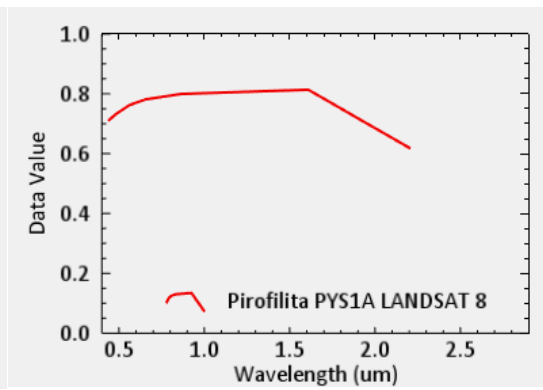
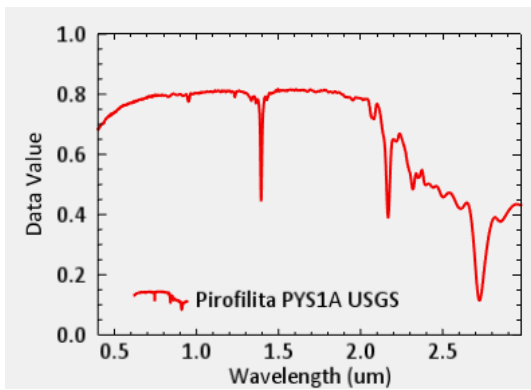
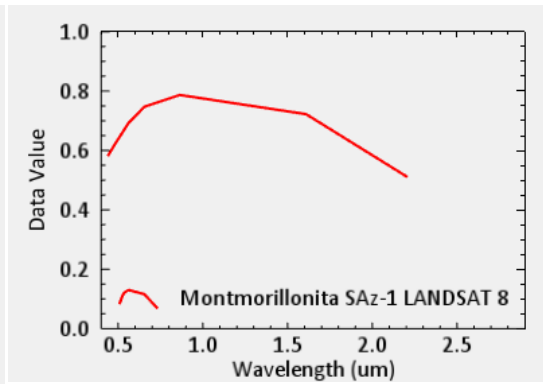
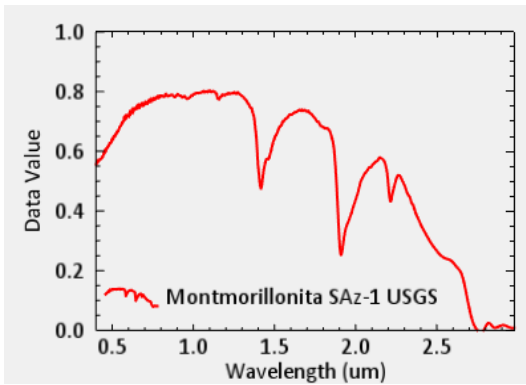
Firma espectral de la USGS

Reensamble para LANDSAT 8



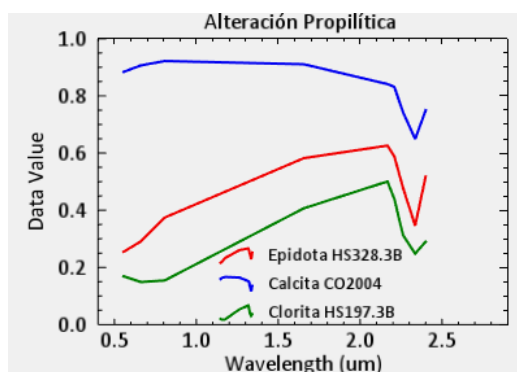
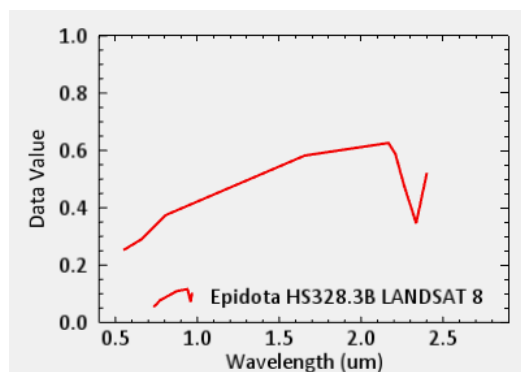
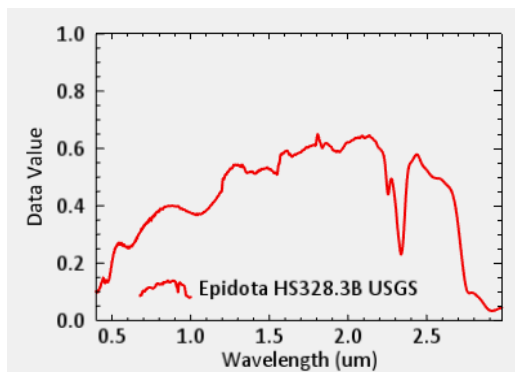
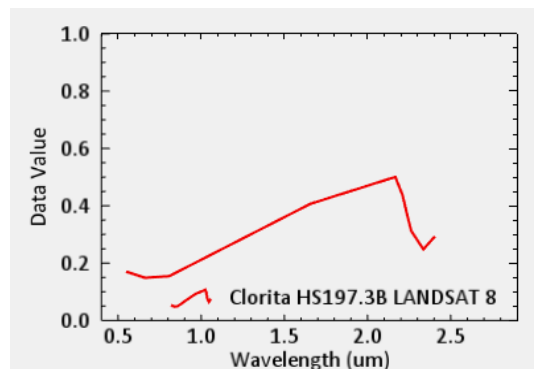
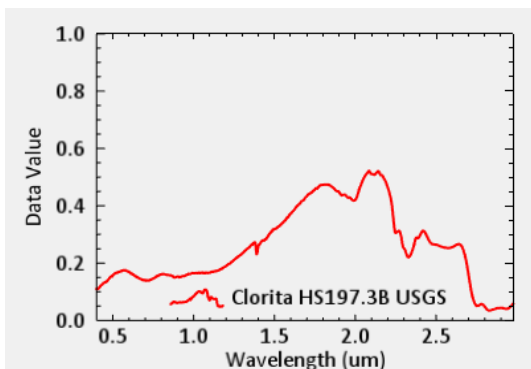
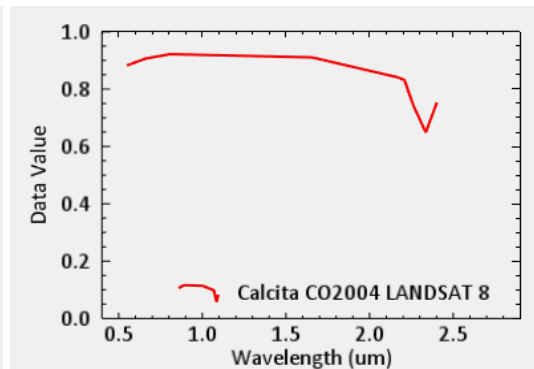
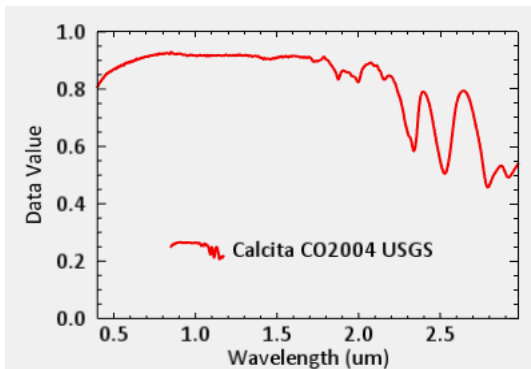
Firma espectral de la USGS

Reensamble para LANDSAT 8



Firma espectral de la USGS

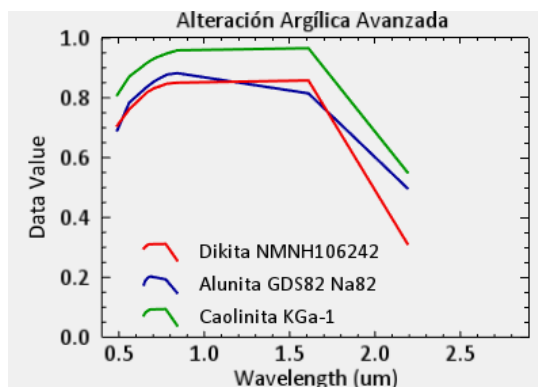
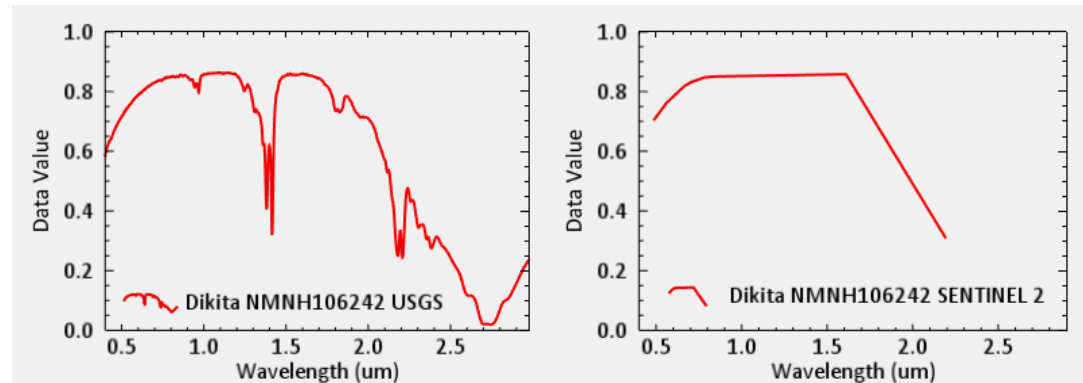
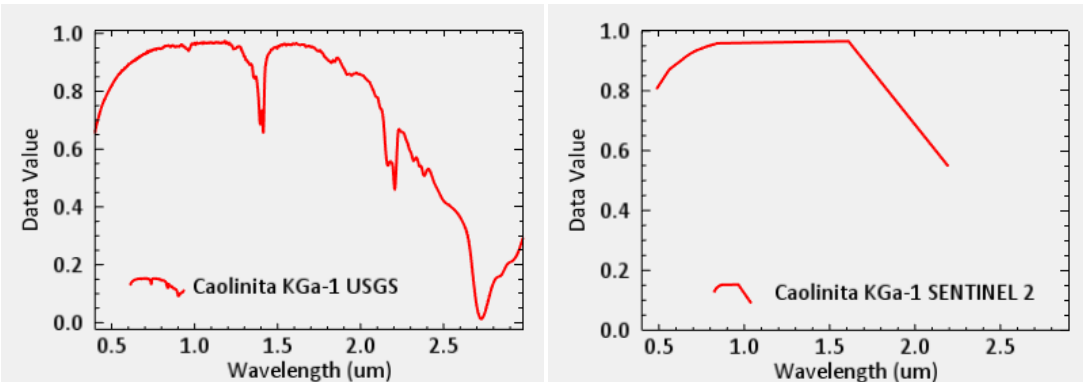
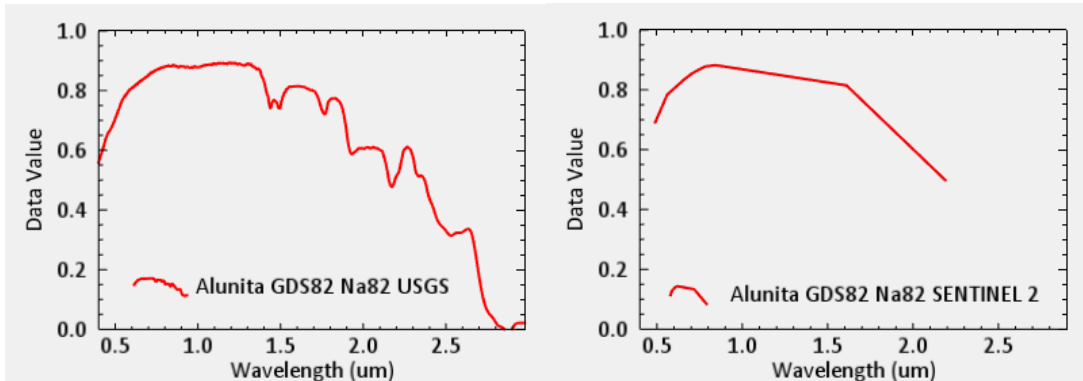
Reensamble para LANDSAT 8



### 3.5.1.3 Reporte espectral para SENTINEL 2

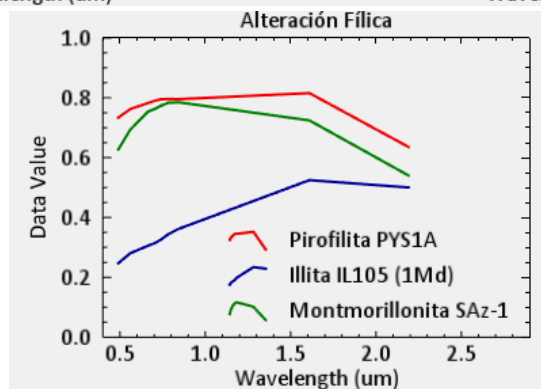
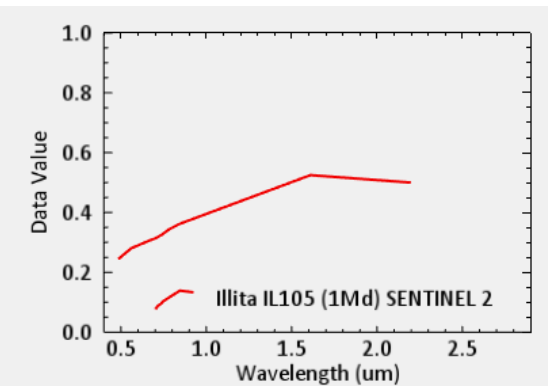
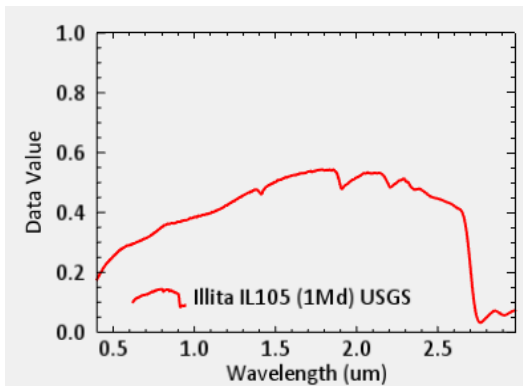
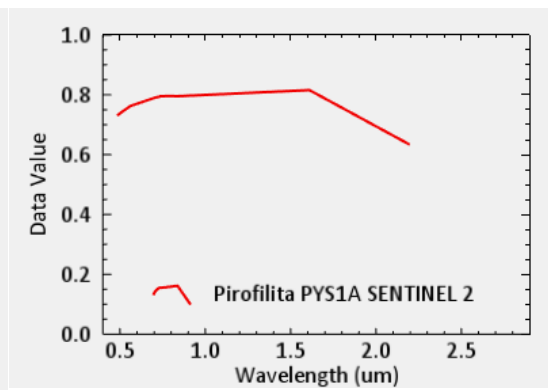
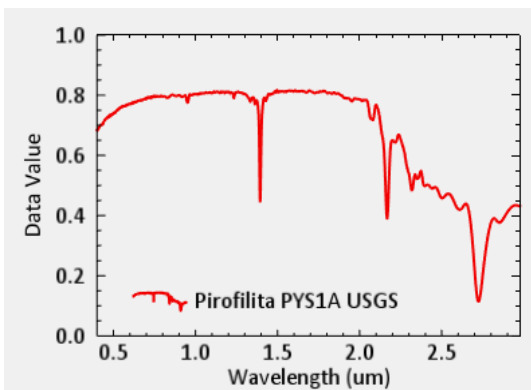
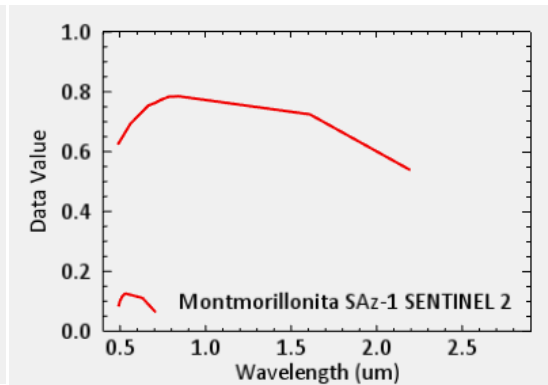
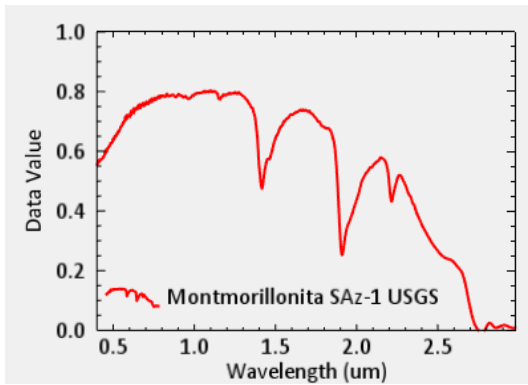
Firma espectral de la USGS

Reensamble para SENTINEL 2



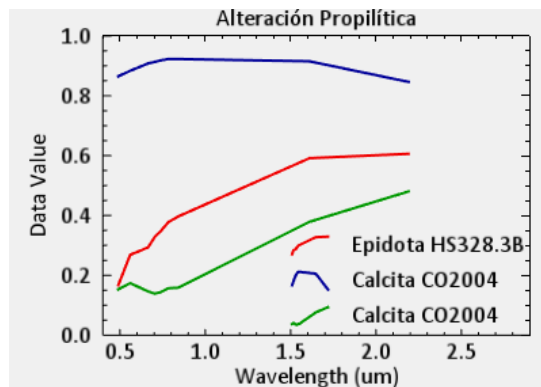
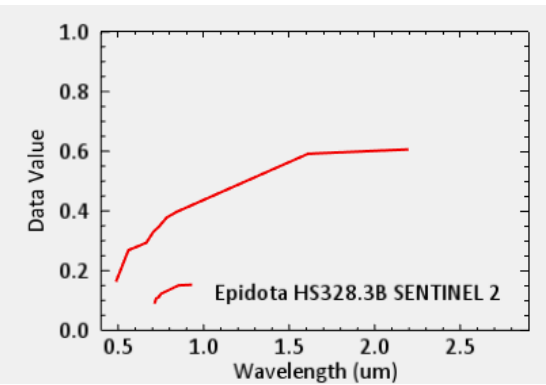
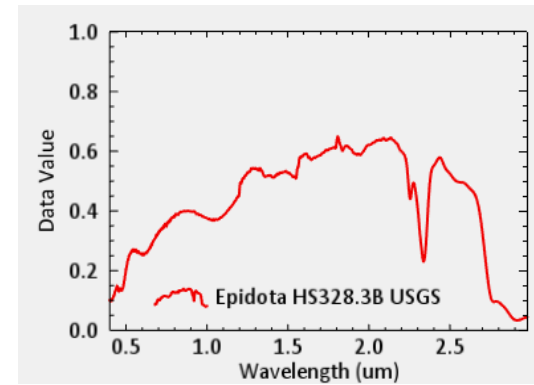
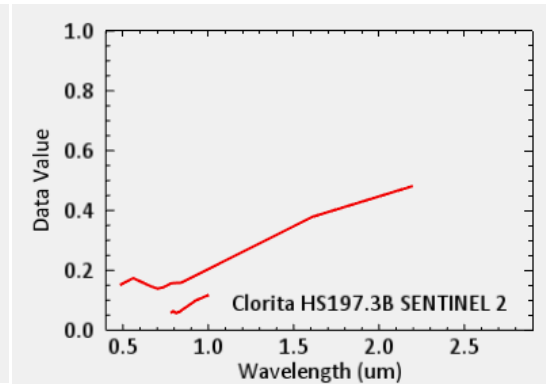
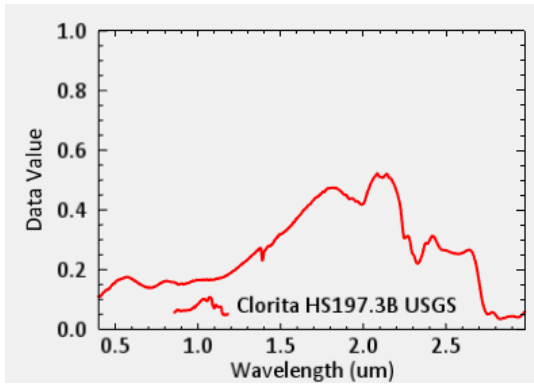
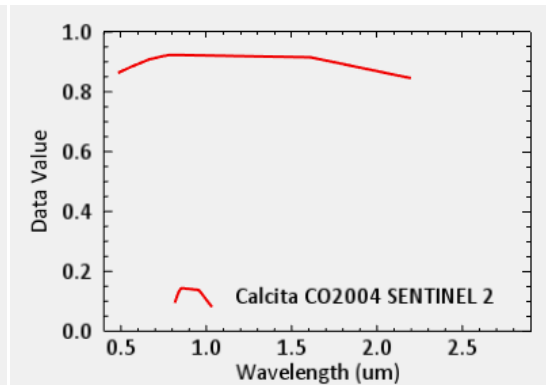
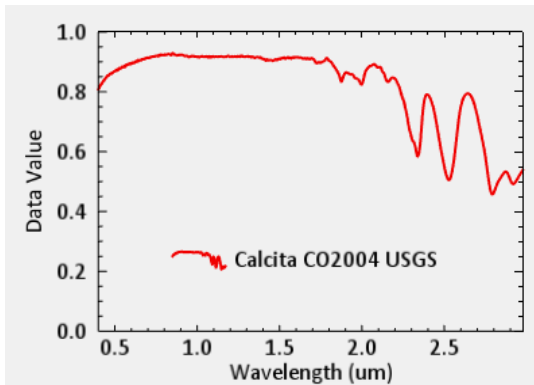
Firma espectral de la USGS

Reensamble para SENTINEL 2



Firma espectral de la USGS

Reensamble para SENTINEL 2



### 3.6 Clasificación SAM

Para la clasificación espectral por medio del método SAM, se ha elaborado mapas de distribución de minerales en base a la tabla 3.9 (Ver anexo E (ASTER), Anexo I (LANDSAT 8) y Anexo M (SENTINEL 2)), en donde se detallan los principales minerales presentes de acuerdo al tipo de alteración hidrotermal. Del mismo modo, se detallan también los principales óxidos presentes en las zonas de alteración.

**Tabla 3.8.** Principales minerales presentes en los distintos tipos de alteración hidrotermal

Alteración hidrotermal	Minerales característicos
Argílica avanzada	Alunita, Caolinita, Dikita
Fílica	Pirofilita, Montmorillonita, Illita
Propilítica	Epidota, Clorita, Calcita
Óxidos	Hematita, Jarosita, Goetita, Limonita

**Fuente:** (Mamani, 2017)

## CAPÍTULO 4

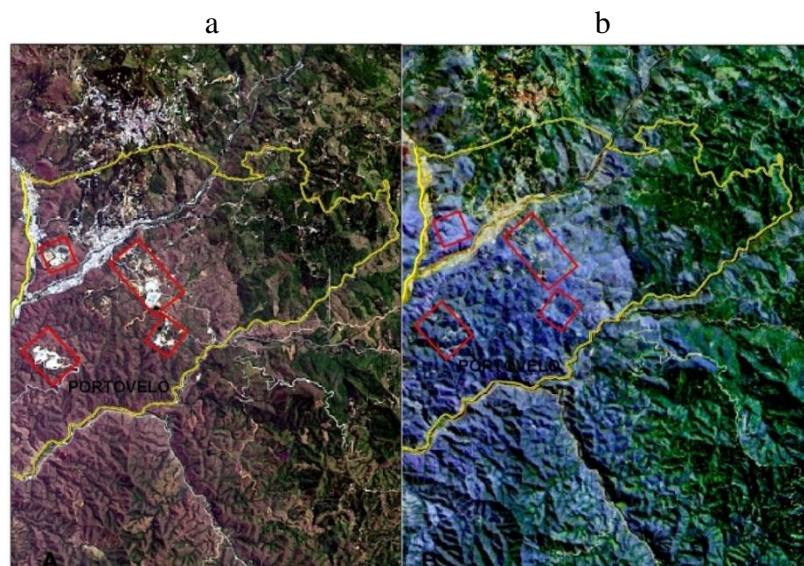
### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 4.1 Análisis visual preliminar de las imágenes satelitales en color natural

La razón fundamental para el desarrollo de este análisis es la marcada diferencia temporal que existe entre las imágenes satelitales. Específicamente, tenemos que la imagen ASTER data del año 2004, mientras que las imágenes LANDSAT 8 y SENTINEL 2 son actuales (2020, 2019 respectivamente). Siendo la imagen LANDSAT la más actual, se la ha tomado como referencia (ver imagen 4.1).

Para el año 2020, tenemos un marcado crecimiento urbano, rural y de construcciones mineras en general, de modo que la información creada a partir de ASTER podría situarse en lugares que actualmente corresponden a la urbe, relaveras, escombreras, etc. Esto debido al crecimiento y desarrollo de la población y de las actividades mineras de la zona.

A modo de ejemplo (ver figura 4.1), claramente se puede evidenciar el asentamiento y crecimiento de relaveras en la zona oeste de Portovelo desde el año 2004 hasta el 2020.



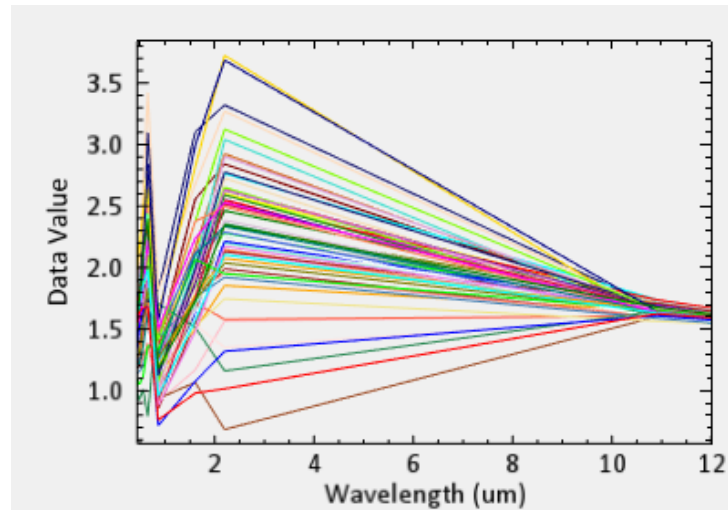
**Figura 4.1.** Análisis visual en color natural.

**Fuente:** Elaboración propia.

*Nota: a) Imagen LANDSAT 8 del 2020, b) ASTER del 2004. Los recuadros rojos representan las zonas en las cuales se ha dado el asentamiento de zonas de relaveras en Portovelo a lo largo de los últimos dieciséis años.*



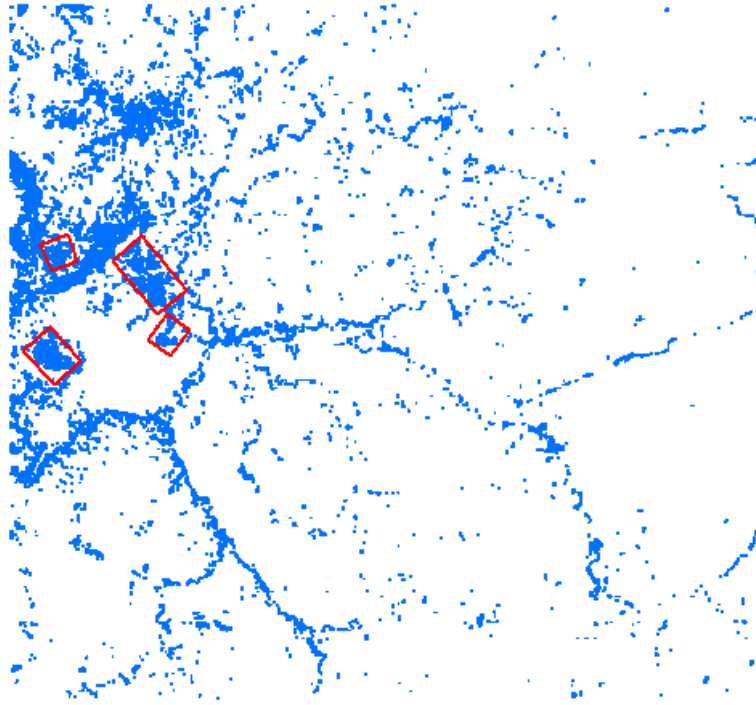
La Figura 4.1 únicamente representa un ejemplo puntual en donde se evidencia el desarrollo que se ha dado durante los últimos años. Resultaría una tarea realmente exhaustiva realizar un enmascaramiento de todas las zonas de conflicto antes mencionadas por medio del método tradicional (sección 3.3). Razón por la cual, se optó por la toma de muestras de 68 firmas espectrales (ver figura 4.2) de los lugares más propensos a generar falsas anomalías, siendo estas relaveras, escombreras, zonas urbanas, construcciones mineras, caminos, etc.



**Figura 4.2.** Firmas espectrales seleccionadas usadas para la clasificación SAM

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez obtenidas estas firmas espectrales se procedió a realizar una clasificación SAM de modo que se obtenga todos aquellos píxeles que contienen información espectral semejante a las firmas seleccionadas. Finalmente, se obtuvo un archivo “*shape*” de alta precisión (ver figura 4.3) en donde se mapearon todas aquellas zonas antes mencionadas para posteriormente eliminar las anomalías que se intersecan con esos lugares mediante una selección por localización.



**Figura 4.3.** Zonas propensas a generar falsas anomalías

**Fuente:** Elaboración propia

*Nota: Resultado de la clasificación SAM para la obtención de zonas con tendencia a generar falsas anomalías. Los recuadros rojos representan las zonas tomadas como ejemplo en la figura 4.1.*

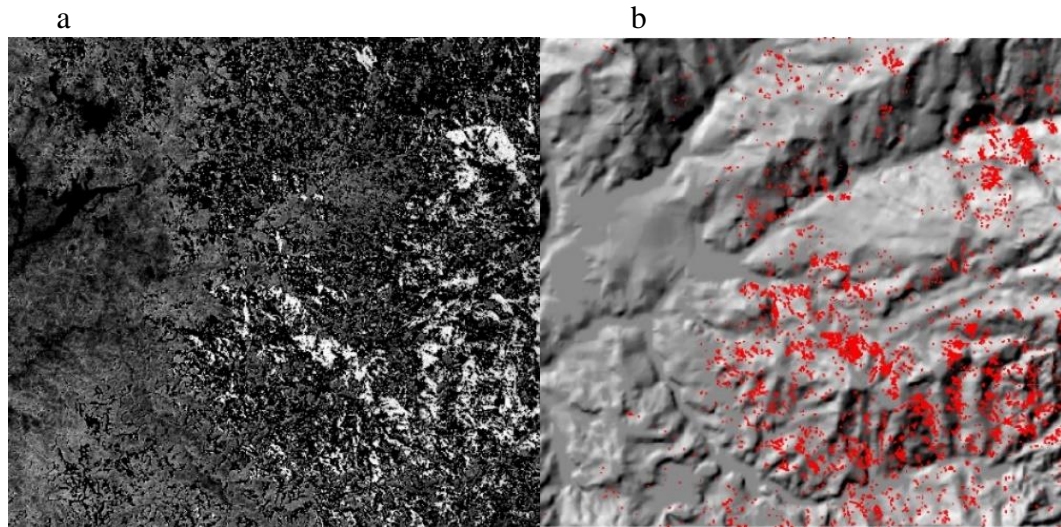
#### **4.2 Generación de información temática de zonas de alteración hidrotermal**

Los mapas presentados en la sección de Anexos contienen un alto nivel de procesamiento digital, es decir, para la obtención de estos mapas se ha realizado los siguientes procesos:

1. Técnicas de realce espectral
2. Segmentación de imágenes.

Como bien es conocido, las técnicas de realce espectral se obtienen en tonos oscuros o claros (ver figura 4.4a). Generalmente, los niveles claros son los que contienen la mayor información de interés. En nuestro caso de estudio, se optó por mejorar la visualización de estas imágenes por medio de una clasificación de píxeles que contengan información relevante con un rango de confiabilidad del 98%. Con esta clasificación pasamos de una imagen en tonos grises a imágenes en donde

únicamente se visualizarán aquellas zonas de mayor concentración de minerales de alteración hidrotermal u óxidos.



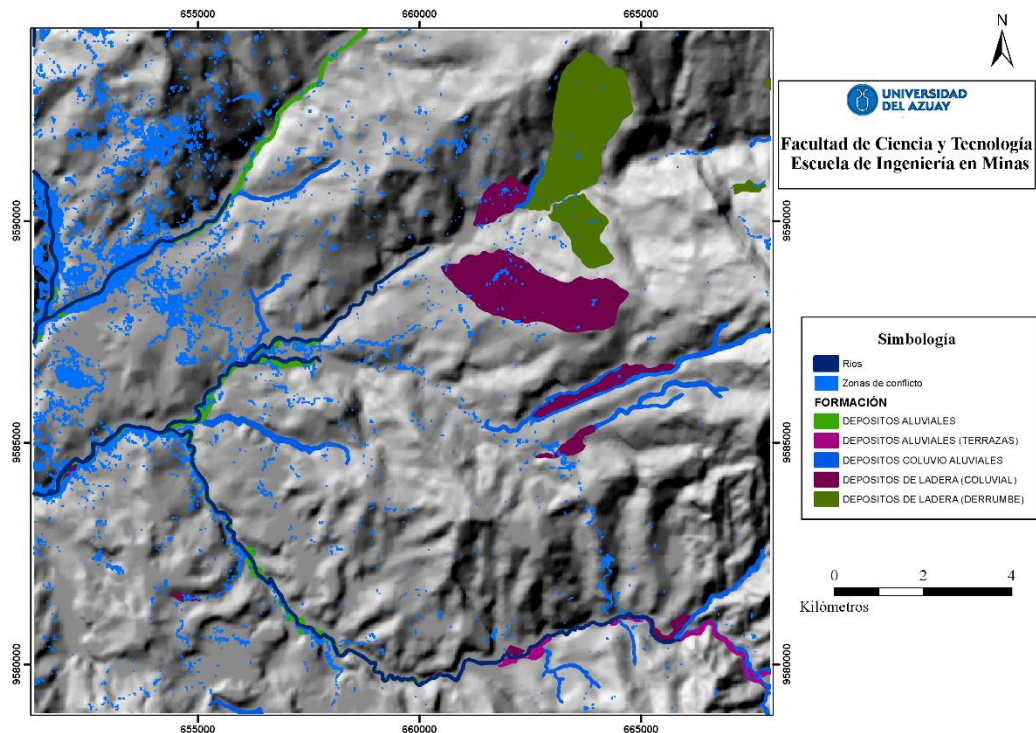
**Figura 4.4.** Comparación entre una imagen cruda y una imagen procesada.

**Fuente:** Elaboración propia

*Nota: a) Imagen producto del cociente 4/6 de las bandas de ASTER en donde se evidencian la alteración argílica avanzada en blanco. b) Imagen producto de la segmentación al 98% de confianza y una clasificación de anomalías en base a criterios geológicos, hidrológicos y de localización.*

### 3. Clasificación de áreas de interés.

En esta etapa se realizó una clasificación de las áreas de interés, tomando como base criterios geológicos, hidrológicos y criterios relacionados con la localización de zonas de conflicto dentro del área de estudio (ver figura 4.5). En cuanto a la geología se dejaron únicamente las anomalías que se presentan en macizos rocosos, es decir, se eliminaron las anomalías localizadas en depósitos cuaternarios. Para la clasificación hidrológica, nos referimos a la eliminación de todas aquellas anomalías presentes en los cauces de los ríos. Finalmente, se procedió a la eliminación de zonas conflictivas en base al archivo creado (ver figura 4.5).



**Figura 4.5.** Componentes de la clasificación de áreas de interés.

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3 Composición en falso color RGB

Partiendo de un análisis visual de las composiciones color en RGB generados para cada imagen satelital, se observa que todos presentan similitud en cuanto a las zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal y óxidos. De los RGB propuestos los que más información relevante aportan a nuestra área de estudio son los RGB 6-2-8 de ASTER (mapea Al/Fe-OH mezclados ligeramente con minerales de Mg-Fe-OH/CO<sub>3</sub> y los presenta en color púrpura), el RBG 10-11-7 de LANDSAT 8 (mapea presencia de minerales que contienen enlaces Al-OH, Mg-OH, Si-O-H y presencia de Fe y CO<sub>3</sub>) y el RGB 8-11-12 de SENTINEL 2 (Cuerpos de agua, afloramientos y suelos desnudos).

En cuanto al RGB de ASTER y LANDSAT 8, podemos decir que serían los más precisos para el mapeo de zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal y óxidos, debido a que estas combinaciones mapean minerales en los que están presentes varios tipos de enlaces químicos, siendo esto lo más idóneo, ya que una zona de alteración muy difícilmente presenta minerales puros o tiene sus grupos minerales bien distribuidos espacialmente.

Para la combinación RGB de SENTINEL 2, tenemos que muestra de manera detallada los cuerpos de agua, afloramientos y suelo desnudo. Por tal razón, este RGB es fundamental en el mapeo preliminar de zonas con presencia de minerales de alteración ya que nos muestra de manera puntual las zonas en las cuales se deben centrar los esfuerzos (afloramientos, suelo desnudo).

En cuanto al RGB de Kaufmann (7/5, 6/7, 6/5), dejamos planteada la posibilidad de que las zonas rojas pueden ser óxidos o minerales de alteración hidrotermal. En base a análisis de firmas espectrales, las zonas rojas efectivamente contienen los dos grupos minerales citados, incluso se tratan de oxihidróxidos (Fe-OH, Al/Fe-OH), llevándonos a decir que los datos generados por los RGB de ASTER (6-2-8) y LANDSAT 8 (10-11-7) concuerdan con el RGB de Kaufmann para zonas de mezclas de minerales.

#### **4.4 Cocientes de bandas**

##### **4.4.1 ASTER**

- La mayor concentración de la alteración argílica avanzada (cociente 4/6) se localiza en la formación Saraguro (Tobas, lavas andesitas y material volcánico) y en las zonas de intrusivos (granito, granodioritas) con una disposición Nornoroeste – Sursuroeste (NNO - SSO) (ver Anexo B). Dentro de esta alteración se encuentran las áreas mineras (Porvenir, Asunción y Santa Martha), así como también en zonas en donde el otorgamiento de la concesión está en la etapa de trámite (Bonito, El Dorado, El Sol, Melin, Leonor, Arahi, Genesis y Surmine 01).
- La mayor concentración de alteración Fílica (cociente 5/6) se localiza en el Grupo Tahuín (limonitas, lutitas, muscovita, sericita), Intrusivos y Formación Saraguro. La zona anómala tiene una disposición Noroeste – Sureste (NO - SE) (ver Anexo B). Dentro de esta alteración se encuentran la mayor parte de concesiones mineras, específicamente en la zona NO del área de estudio, mientras que en la zona NE se encuentran todas concesiones en trámite.
- La mayor concentración de alteración propilítica (5/8) se localiza en la Formación Saraguro, Grupo Tahuín y en los Intrusivos. Con una disposición

Centro-Sur en su mayoría, además de presentarse en zonas Noroeste-Noreste (NNE-NE) y Nornoroeste - Noroeste (NNO - NO) (ver Anexo B).

- Los óxidos (cociente 2/1) se localizan Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, Formación Saraguro y Riolitas de Zaruma Urcu. Los óxidos se encuentran dispersos a lo largo de toda el área de estudio, pero están presentes en mayor cantidad en el Suroeste (SO), Nornoroeste (NNO), Sursureste (SSE) de la zona de estudio (ver Anexo B).

#### **4.4.2 LANDSAT 8 OLI**

- Los hidroxilos contenidos en roca (cociente 6/7) se localizan en la Formación Saraguro, Grupo Tahuín, Riolitas de Zaruma Urcu y en los Intrusivos. Tienen una disposición Centro-Sur en su mayoría, también se localizan en la zona Norte (N), Noroeste (NO) y Noreste (NE) del área de estudio (ver Anexo G).
- Los minerales arcillosos (cociente 7/5) se localizan en preferentemente en el Grupo Tahuín, la formación Saraguro, Riolitas de Zaruma Urcu presentan poca presencia de minerales arcillosos. Estos minerales se encuentran al Suroeste (SO), Noroeste (NO) y Sureste (SE) del área de estudio (Ver Anexo G).
- Los óxidos (cociente 4/2) se localizan en el Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, Formación Saraguro y Riolitas de Zaruma Urcu. Los óxidos se encuentran dispersos a lo largo de toda el área de estudio, pero están presentes en mayor cantidad en zonas Norte (N), Centro-Sur, Noroeste (NO), Sursureste (SSE) y en el Estenordeste (ENE) (ver Anexo G).

#### **4.4.3 SENTINEL 2**

- Los hidroxilos contenidos en roca (cociente 11/12) se localizan en la Formación Saraguro, Grupo Tahuín, Riolitas de Zaruma Urcu y en los Intrusivos. Tienen una disposición Centro-Sur en su mayoría, también se localizan en la zona Norte (N), Noroeste (NO) y Noreste (NE) del área de estudio. (ver Anexo K).
- Los minerales arcillosos (cociente 12/8) se localizan en preferentemente en el Grupo Tahuín, la formación Saraguro, Riolitas de Zaruma Urcu presentan poca presencia de minerales arcillosos. Estos minerales se encuentran al

Suroeste (SO), Noroeste (NO) y Sureste (SE) del área de estudio (Ver Anexo K).

- Los óxidos (cociente 4/2) se localizan en el Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, Formación Saraguro y Riolitas de Zaruma Urcu. Los óxidos se encuentran dispersos a lo largo de toda el área de estudio, pero están presentes en mayor cantidad en el Sureste (SE), Centro-sur, Nornoroeste (NNO) de la zona de estudio (ver Anexo K).

#### **4.5 Índices de identificación litológica SWIR**

- **OHIa**

La mayor concentración de Muscovita, Illita, Montmorillonita, se localiza en la zona Nordeste (NE), Sureste (SE), la zona Centro Sur, al Noroeste (NO) y al Suroeste (SO). Es decir, emplaza en las formaciones Saraguro, Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, Rolitas de Zaruma Urcu y la zona de Intrusivos (ver Anexo C).

- **OHIb**

La mayor concentración de Pirofilita, se localiza en la zona Estenordeste (ENE), Sureste (SE) y la zona Centro Sur. Es decir, emplaza en las formaciones Saraguro, Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, y la zona de Intrusivos (ver Anexo C).

- **ALI**

La mayor concentración de Alunita, se localiza en la zona central de la zona de estudio de Norte a Sur, Noreste (NE), Sureste (SE) y Suroeste (SO). Es decir, se emplaza en las formaciones Saraguro, Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro, Rolitas de Zaruma Urcu y la zona de Intrusivos (ver Anexo C).

- **KLI**

La mayor concentración de Caolinita, Dikita, se localiza al Norte (N), Noreste (NE), Zona central y al Sureste (SE). Es decir, se emplaza en las formaciones Saraguro, Grupo Tahuín, Grupo Tahuín Capiro y la zona de Intrusivos (ver Anexo C).

- **CLI**

La mayor concentración de Calcita, se localiza al Nornoreste (NNE), Sureste (SE) y Suroeste (SO) de la zona de estudio. Es decir, se emplaza en las formaciones Saraguro, Grupo Tahuín y en la zona de intrusivos (ver Anexo C).

#### 4.6 Análisis de componentes principales

##### 4.6.1 ASTER L1T

- **Alteración Argílica Avanzada**

**Tabla 4.1.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración argílica avanzada.

<b>Vectores propios</b>	<b>Band 1</b>	<b>Band 4</b>	<b>Band 6</b>	<b>Band 7</b>
<b>PC1</b>	0.456314	0.569759	0.490655	0.475826
<b>PD2</b>	0.845507	-0.0424	-0.420043	-0.326932
<b>PC3</b>	0.266252	-0.815848	0.28708	0.425544
<b>PC4</b>	-0.077497	0.089273	-0.707395	0.696863

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.1 tenemos que: La alteración argílica avanzada se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 4 presenta un alto positivo (0.089273) y la banda 6 presenta un pico de absorción (-0.707395) De acuerdo con las características espectrales de la alteración argílica avanzada estos minerales se presentarían en tonalidades claras puesto que la banda 4 refleja y la 6 absorbe (ver Anexo D).



- **Alteración Fílica**

**Tabla 4.2.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración Fílica

<b>Vectores propios</b>	<b>Band 1</b>	<b>Band 3</b>	<b>Band 5</b>	<b>Band 6</b>
<b>PC1</b>	0.46307	0.553458	0.491444	0.487579
<b>PC2</b>	0.01441	-0.785159	0.413358	0.460926
<b>PC3</b>	0.87936	-0.277793	-0.172186	-0.34628
<b>PC4</b>	0.109932	-0.006327	-0.746974	0.655671

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.2 tenemos que: La alteración Fílica se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 6 presenta un alto positivo (0.655671) y la banda 5 presenta un pico de absorción (-0.746974) De acuerdo con las características espectrales de la alteración Fílica estos minerales se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 6 refleja y la 5 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo D).

- **Alteración Propilítica**

**Tabla 4.3.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de la alteración Propilítica.

<b>Vectores propios</b>	<b>Band 1</b>	<b>Band 3</b>	<b>Band 5</b>	<b>Band 8</b>
<b>PC1</b>	-0.472149	-0.564992	-0.50043	-0.455444
<b>PC2</b>	-0.031428	0.776932	-0.429771	-0.459006
<b>PC3</b>	0.876519	-0.27757	-0.212323	-0.331041
<b>PC4</b>	0.088325	0.010778	-0.720962	0.687238

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.3 tenemos que: La alteración Fílica se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 8 presenta un alto positivo (0.687238) y la banda 5 presenta un pico de absorción (-0.720962) De acuerdo con las características espectrales de la alteración Propilítica estos minerales se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 8 refleja y la 5 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo D).

- **Óxidos**

**Tabla 4.4.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos.

<b>Vectores propios</b>	<b>Band 1</b>	<b>Band 2</b>	<b>Band 3</b>
<b>PC1</b>	-0.553287	-0.491307	-0.672674
<b>PC2</b>	-0.300301	-0.635592	0.711226
<b>PC3</b>	<b>-0.776977</b>	<b>0.595517</b>	0.204125

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.4 tenemos que: Los óxidos se encuentra en la PC3, esto debido a que la banda 2 presenta un alto positivo (0.595517) y la banda 1 presenta un pico de absorción (-0.776977) De acuerdo con las características espectrales de los óxidos estos minerales se presentarían en tonalidades claras puesto que la banda 2 refleja y la 1 absorbe (ver Anexo D).

#### 4.6.2 LANDSAT 8 OLI

**Tabla 4.5.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Hidroxilos.

Vectores propios	Band 2	Band 5	Band 6	Band 7
PC1	-0.35332	-0.496109	-0.594436	-0.525059
PC2	-0.144175	-0.78704	0.269007	0.536113
PC3	-0.920214	0.29292	0.253672	0.055266
PC4	-0.08709	0.220547	-0.714095	0.658667

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.5 tenemos que: Los hidroxilos se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 7 presenta un alto positivo (0.658667) y la banda 6 presenta un pico de absorción (-0.714095) De acuerdo con las características espectrales de los hidróxidos estos minerales se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 7 refleja y la 6 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo H).

**Tabla 4.6.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos.

Vectores propios	Band 2	Band 4	Band 5	Band 6
PC1	-0.140659	-0.41901	-0.297228	-0.846346
PC2	-0.129238	-0.145095	0.950962	-0.240656
PC3	-0.359398	-0.801836	-0.05107	0.47464
PC4	0.913425	-0.400545	0.068685	0.022373

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.6 tenemos que: Los óxidos se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 2 presenta un alto positivo (0.913425) y la banda 4 presenta un pico de absorción (-0.400545) De acuerdo con las características espectrales de los óxidos estos se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 2 refleja

y la 4 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo H).

#### 4.6.3 SENTINEL 2

**Tabla 4.7.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Hidroxilos.

Vectores propios	Band 2	Band 8a	Band 11	Band 12
<b>PC1</b>	0.233932	0.01311	0.518013	0.822658
<b>PC2</b>	-0.11794	0.935646	0.289577	-0.16371
<b>PC3</b>	-0.95466	-0.15901	0.206383	0.144046
<b>PC4</b>	-0.1414	0.31482	-0.77796	0.525055

**Fuente:** Elaboración propia

Del análisis de la tabla 4.7 tenemos que: Los hidroxilos se encuentra en la PC4, esto debido a que la banda 12 presenta un alto positivo (0.525055) y la banda 11 presenta un pico de absorción (-0.77796) De acuerdo con las características espectrales de los hidróxidos estos se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 12 refleja y la 11 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo L).

**Tabla 4.8.** Vectores propios producto de la transformación de componentes principales para la obtención de Óxidos.

Vectores propios	Band 2	Band 4	Band 8a	Band 11
PC1	0.300623	0.845645	0.021836	0.440493
PC2	0.15866	0.28405	-0.715593	-0.618117
PC3	-0.103801	-0.283734	-0.697194	0.650108
PC4	0.934707	-0.351704	0.037019	0.035444

**Fuente:** Elaboración propia

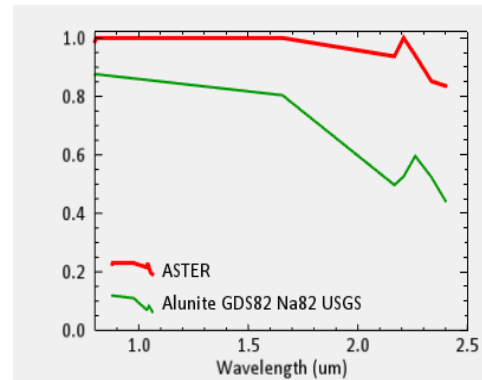
Del análisis de la tabla 4.8 tenemos que: Los hidroxilos se encuentran en la PC4, esto debido a que la banda 2 presenta un alto positivo (0.934707) y la banda 4 presenta un pico de absorción (-0.351704). De acuerdo con las características espectrales de los óxidos estos se presentarían en tonalidades oscuras puesto que la banda 2 refleja y la 4 absorbe. Por lo tanto, se debe obtener el inverso de la componente, es decir -PC4, obteniendo así las zonas correspondientes a esta alteración (ver Anexo L).

## 4.7 Mapeo espectral SAM

### 4.7.1 ASTER

- **Alteración Argílica Avanzada**

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.617	1.617
Alta Reflectancia	2.209	2.262
Alta Absorción	2.167	2.167
Alta Absorción	2.4	2.4



**Figura 4.6.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.617 $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.167  $\mu\text{m}$  y 2.4  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656	1.656
Alta Reflectancia	2.262	2.262
Alta Absorción	2.209	2.209
Alta Absorción	2.4	2.4

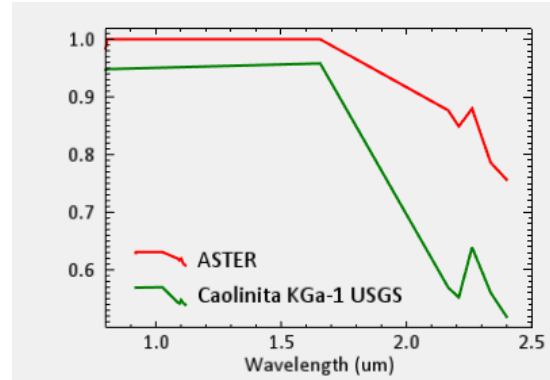


Figura 4.7. Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656µm y 2.262 µm, una alta absorción en 2.209 µm y 2.4 µm.

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656	1.656
Alta Reflectancia	2.262	2.262
Alta Absorción	2.167	2.209
Alta Absorción	2.4	2.4

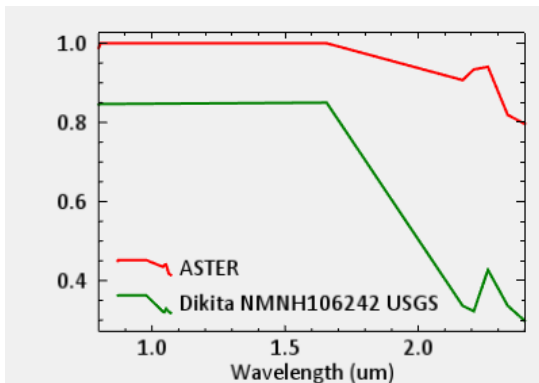


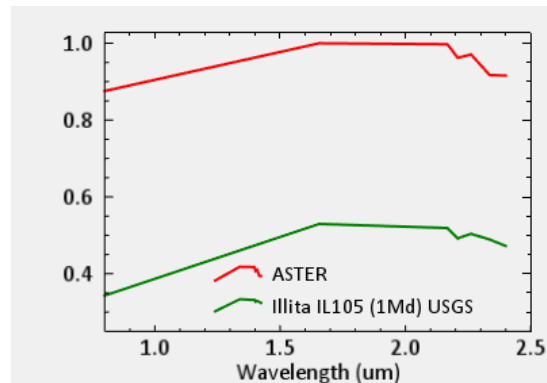
Figura 4.8. Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656µm y 2.262 µm, una alta absorción en 2.4 µm.

- **Alteración Fílica**

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656 – 2.167	1.656 – 2.167
Alta Reflectancia	2.262	2.262
Alta Absorción	2.209	2.209
Alta Absorción	2.336	2.4

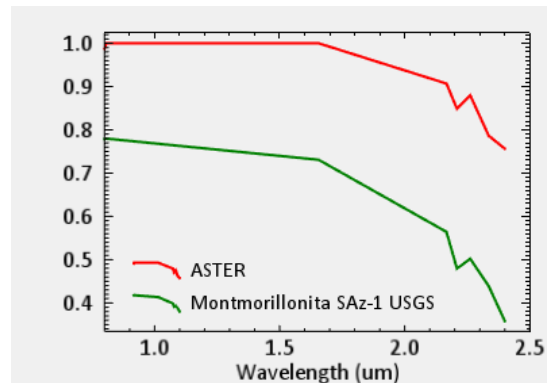


**Figura 4.9.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656µm - 2.16 µm y 2.262 µm, una alta absorción en 2.209 µm.

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656 – 2.167	1.656 – 2.167
Alta Reflectancia	2.262	2.262
Alta Absorción	2.209	2.209
Alta Absorción	2.4	2.4



**Figura 4.10.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656µm - 2.167 µm y 2.262 µm, una alta absorción en 2.209 µm y 2.4 µm.

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656	1.656
Alta Reflectancia	2.209	2.209
Alta Absorción	2.167	2.167
Alta Absorción	2.336	2.4

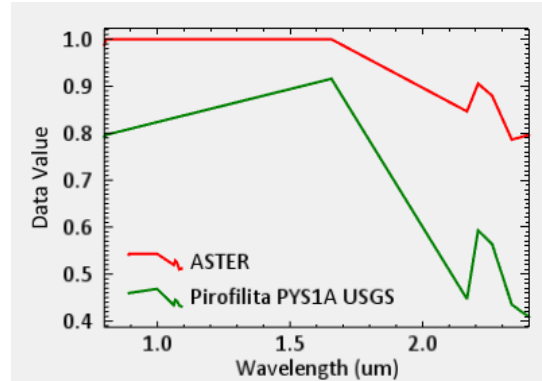


Figura 4.11. Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656µm y 2.209 µm, una alta absorción en 2.167 µm.

- **Alteración Propilítica**

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	2.167	2.167
Alta Reflectancia	2.4	2.4
Alta Absorción	2.336	2.336

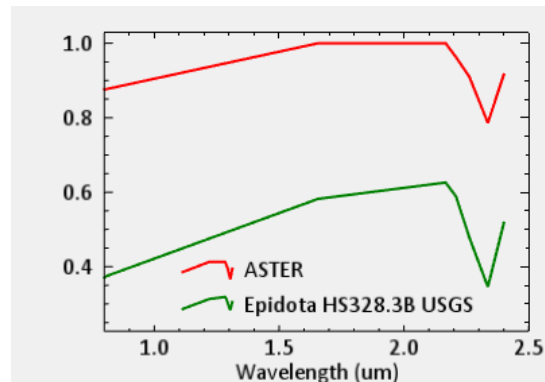


Figura 4.12. Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 2.167 µm y 2.4 µm, una alta absorción en 2.336 µm.



Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656	1.656
Alta Reflectancia	2.167	2.209
Alta Absorción	2.336	2.336

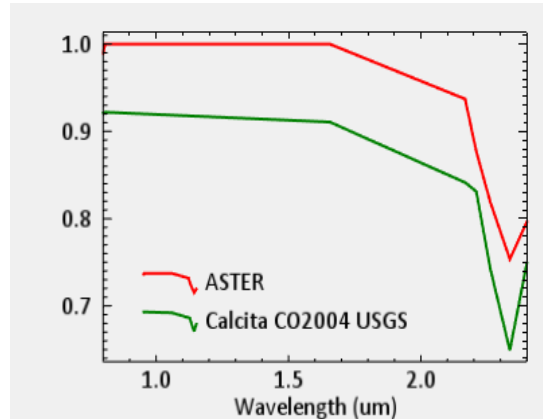


Figura 4.13. Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.336  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	1.656	1.656
Alta Reflectancia	2.167	2.167
Alta Absorción	2.336	2.336

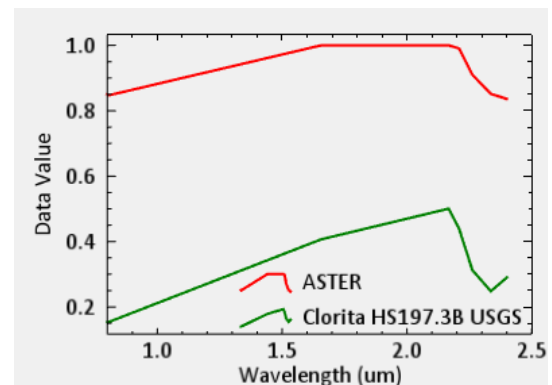


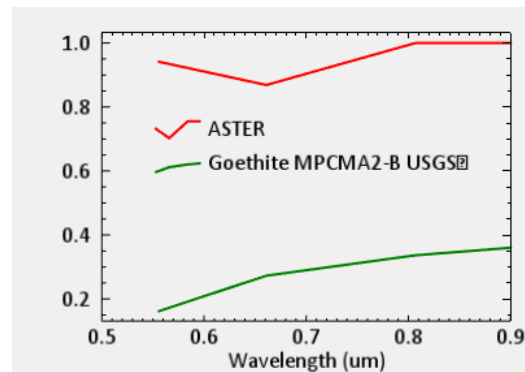
Figura 4.14. Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo medio con una alta reflectancia en 1.656  $\mu\text{m}$  y 2.167  $\mu\text{m}$ , una alta absorción en 2.336  $\mu\text{m}$ .

- Óxidos

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	-	0.661
Alta Reflectancia	0.807	0.807
Alta Absorción	0.670	-

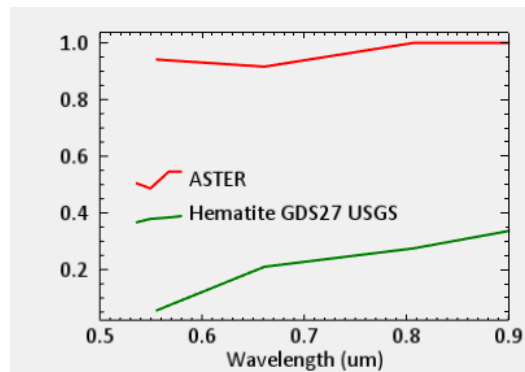


**Figura 4.15.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en  $0.807\mu\text{m}$ . En la firma espectral de ASTER (roja), se observa un rango de absorción característico de la Goetita ( $670\mu\text{m}$ ), esto debido a las transiciones electrónicas del ión  $\text{Fe}^{3+}$ .

Rasgo espectral	ASTER	USGS
Alta Reflectancia	0.807	0.807
Alta Absorción	0.661	-

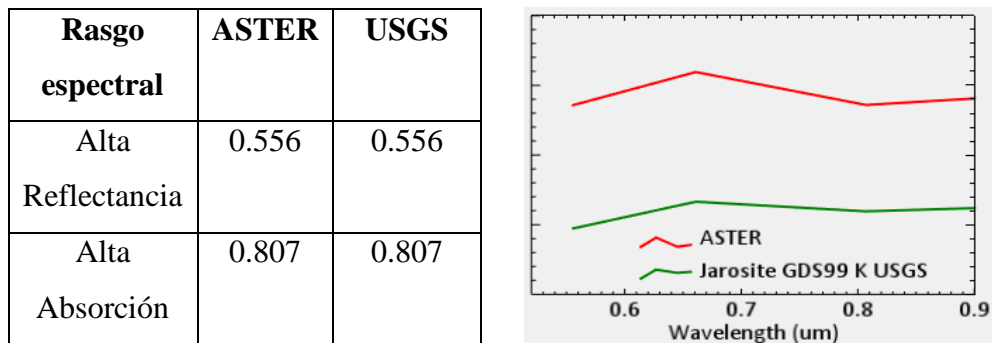


**Figura 4.16.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en  $0.807\mu\text{m}$ . En la firma espectral de ASTER (roja), se observa un rango de absorción característico de una mezcla entre hematita/goetita. Báscones et

al. (2020) señala que la posición de este rasgo corresponde a muestras con una mayor proporción de goetita respecto a hematita.



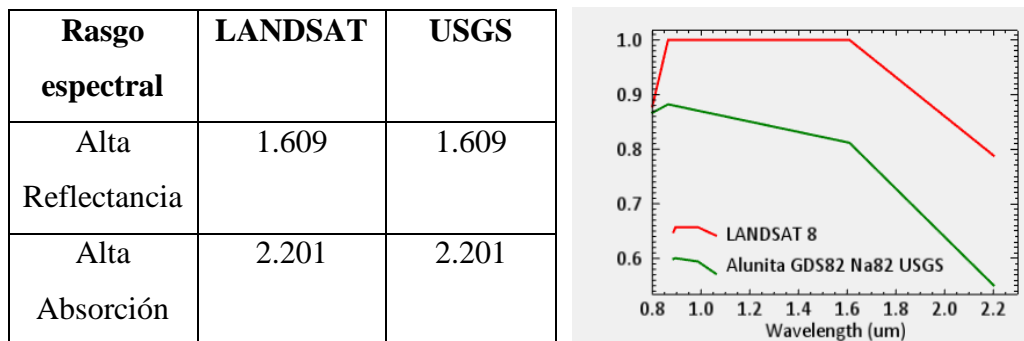
**Figura 4.17.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en  $0.556\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $0.807\mu\text{m}$ .

#### 4.7.2 LANDSAT 8 OLI

- **Alteración Argílica Avanzada.**



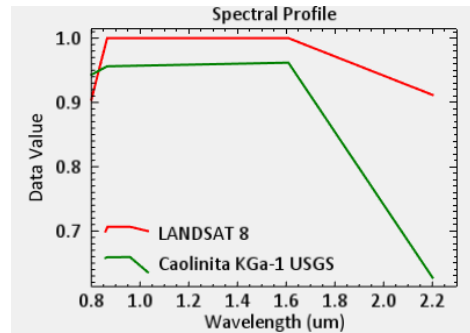
**Figura 4.18.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en  $1.609\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $2.201\mu\text{m}$ . En la firma espectral de LANDSAT 8, se observa que la reflectancia se mantiene en 1 a lo largo de la longitud de onda de  $0.8646$  a  $1.609\mu\text{m}$ . Por otro lado, la firma obtenida de la USGS

presenta una disminución de la reflectancia en el mismo rango, la disminución en la reflectancia va de 0.8821 a 0.8117.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	1.609	1.609
Alta Absorción	2.201	2.201

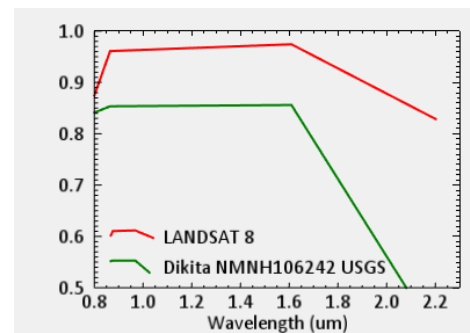


**Figura 4.19.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 1.609  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.201  $\mu\text{m}$ . En la firma de la USGS se observa una mayor absorción, mientras que la absorción en LANDSAT 8 es más suave.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	1.609	1.609
Alta Absorción	2.201	2.201



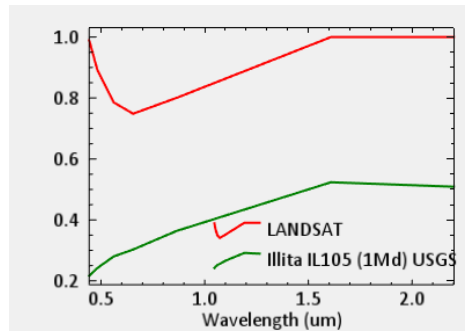
**Figura 4.20.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita.

**Fuente:** Elaboración propia.

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 1.609  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.201  $\mu\text{m}$ . En la firma de la USGS se observa una mayor absorción, mientras que la absorción en LANDSAT 8 es más suave. Finalmente, en las firmas se observa un aumento en la reflectividad en el rango 0.8646 – 1.609  $\mu\text{m}$ .

- **Alteración Fílica**

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	1.609	1.609
Alta Absorción	0.6546	0.6546

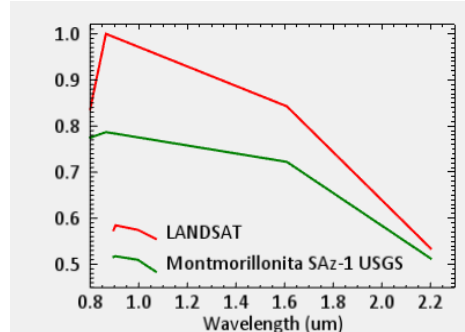


**Figura 4.21.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en 1.609  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 0.6546  $\mu\text{m}$ . En la firma de LANDSAT el rasgo de absorción tiene una mayor profundidad.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.8646	0.8646
Alta Absorción	2.201	2.201

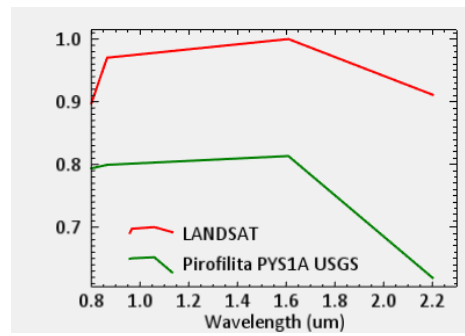


**Figura 4.22.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en 0.8646  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.201  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	1.609	1.609
Alta Absorción	2.201	2.201



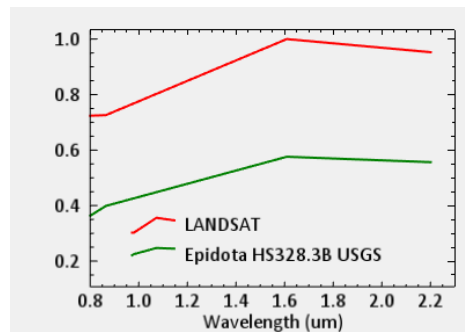
**Figura 4.23.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en  $1.609\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $2.201\mu\text{m}$ . En la firma de la USGS, se observa que el rasgo de absorción es mucho más profundo respecto al visto en LANDSAT 8.

- **Alteración Propilítica**

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	1.609	1.609
Alta Absorción	2.201	2.201



**Figura 4.24.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en  $1.609\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $2.201\mu\text{m}$ . En la firma de la USGS, se observa que el rasgo de absorción es mucho más lineal respecto al visto en LANDSAT 8.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.8646	0.8646
Alta Absorción	2.201	2.201

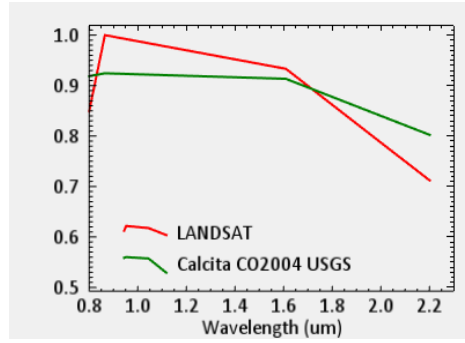


Figura 4.25. Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en 0.8646  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.201  $\mu\text{m}$ . En la firma de LANDSAT el rango de absorción es mucho más marcado respecto a la firma de la USGS.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	2.201	2.201
Alta Absorción	0.8646	0.8646

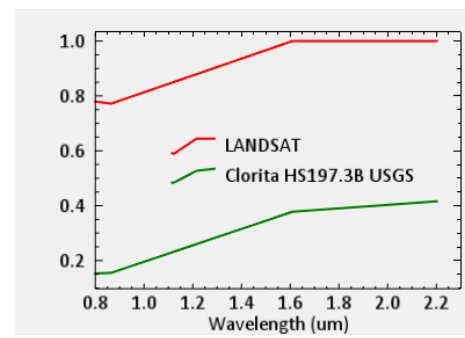


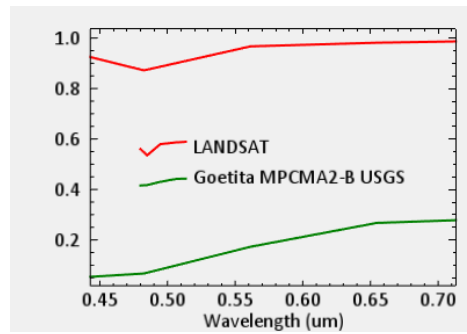
Figura 4.26. Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en donde se presenta una alta reflectancia en 0.8646  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.201  $\mu\text{m}$ . En la firma de LANDSAT el rango de absorción es mucho más marcado respecto a la firma de la USGS.

- Óxidos

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.56	0.6546
Alta Absorción	0.4826	0.4826

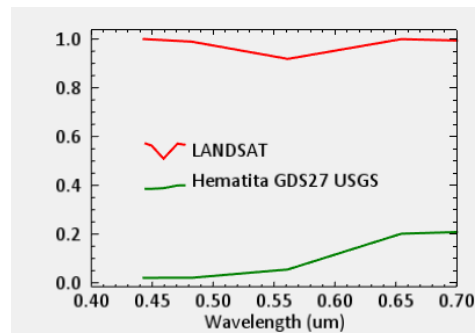


**Figura 4.27.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en 0.6546 $\mu$ m y una alta absorción en 0.4826  $\mu$ m

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.6546	0.6546
Alta Absorción	0.5613	0.5613



**Figura 4.28.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en 0.6546 $\mu$ m y una absorción en 0.5613.



Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.6546	0.6546
Alta Absorción	0.4826	0.8646

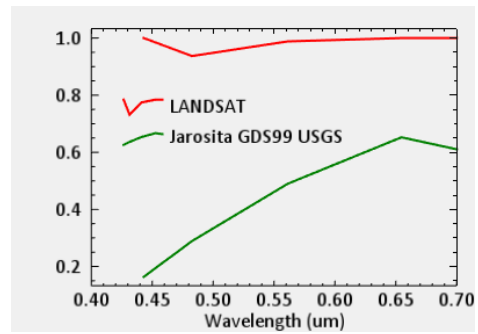


Figura 4.29. Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en 0.6546µm. La firma espectral de LANDSAT presenta una absorción en la banda 2 (0.4826 µm), por el contrario, la firma de la USGS no presenta rasgo de absorción en la región del VNIR, su rasgo de absorción se evidencia en la banda 5 (0.8646 µm) perteneciente a la región infrarroja.

Según N. Clark (1999) cuando se presenta un pico de absorción en longitudes de onda cercanas a 0.43 µm se dice que la banda está saturada en reflectancia y en consecuencia presentara un pico de absorción entre 0.86 µm – 0.90 µm, siendo este nuestro caso.

Rasgo espectral	LANDSAT	USGS
Alta Reflectancia	0.6546	0.6546
Alta Absorción	0.5613	0.4826

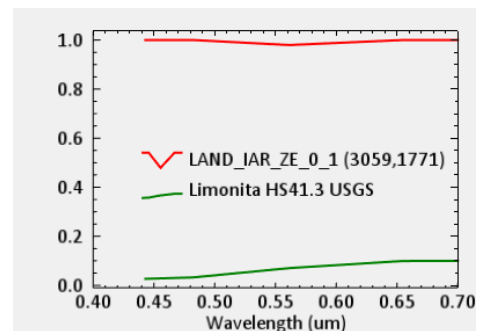


Figura 4.30. Rasgos espectrales de mayor similitud para Limonita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en 0.6546µm. El rasgo de absorción en la firma LANDSAT 8 de varia muy poco respecto a la de la USGS, generalmente asociado a mezclas de minerales.

4.7.3 SENTINEL 2

- Alteración Argílica Avanzada

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.945– 1.61	0.842-1.61
Alta Absorción	2.19	2.19

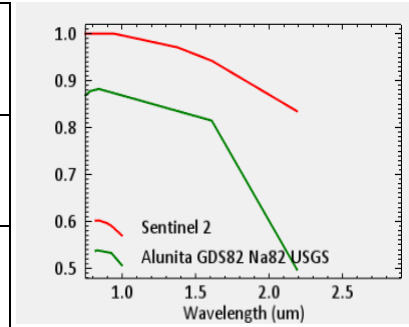


Figura 4.31. Rasgos espectrales de mayor similitud para Alunita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 0.945µm – 1.61 µm y una alta absorción en 2.16 µm.

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.842-1.375 1.375-1.61	0.842-1.61
Alta Absorción	2.19	2.19

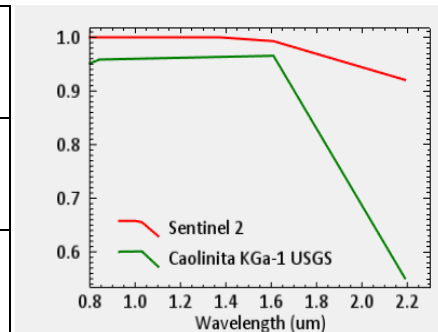
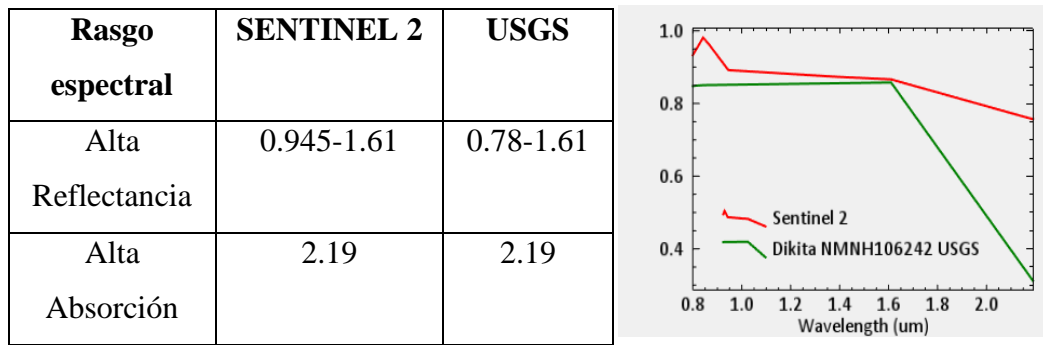


Figura 4.32. Rasgos espectrales de mayor similitud para Caolinita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 0.842µm – 1.61 µm y una alta absorción en 2.19 µm. En la firma proveniente de la USGS, se observa que el rasgo de absorción es mucho más agudo, mientras que en la firma de SENTINEL 2 dicha característica es mucho más suave.

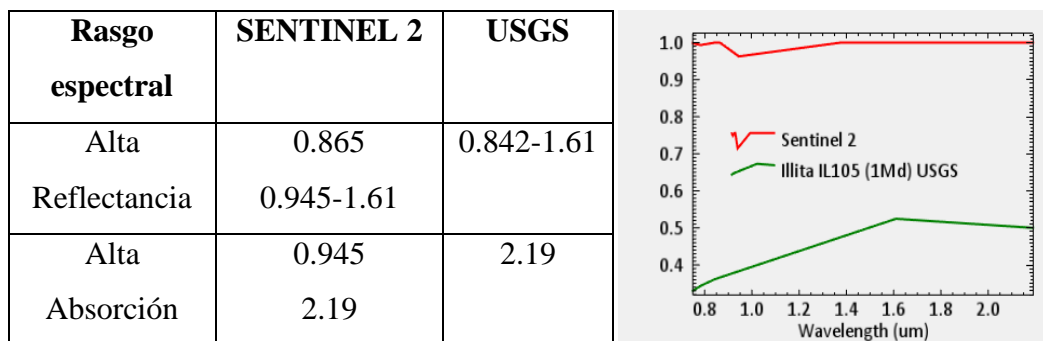


**Figura 4.33.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Dikita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en  $0.945\mu\text{m} - 1.61\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $2.19\mu\text{m}$ . En la firma proveniente de la USGS, se observa que el rasgo de absorción es mucho más agudo, mientras que en la firma de SENTINEL 2 dicha característica es mucho más suave. Finalmente, esta firma, presenta un pico de reflectancia en  $0.842\mu\text{m}$ , posiblemente debido a la mezcla con minerales ferrosos (esto debido al salto energético).

- **Alteración Fílica**



**Figura 4.34.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Illita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en  $0.945\mu\text{m} - 1.61\mu\text{m}$  y una alta absorción en  $2.19\mu\text{m}$ . En la firma de SENTINEL 2 se presenta un pico de reflectancia en  $0.865\mu\text{m}$  y un pico de absorción en  $0.945\mu\text{m}$ , posiblemente debido a la mezcla con minerales ferrosos (esto debido al salto energético).

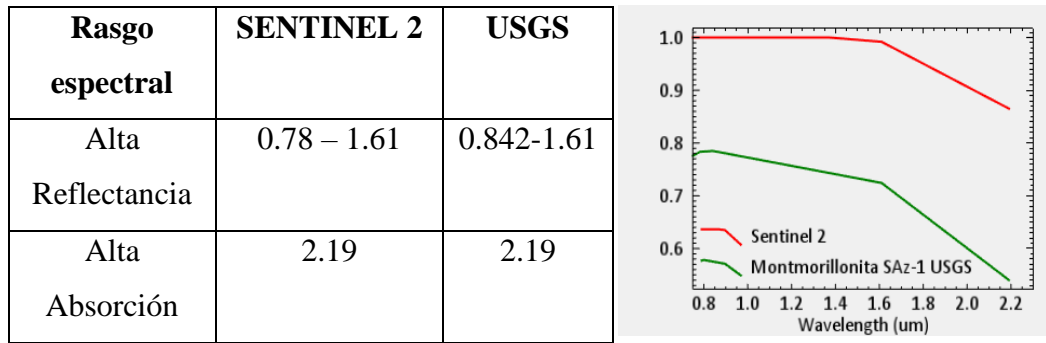


Figura 4.35. Rasgos espectrales de mayor similitud para Montmorillonita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 0.842µm – 1.61 µm y una alta absorción en 2.19 µm.

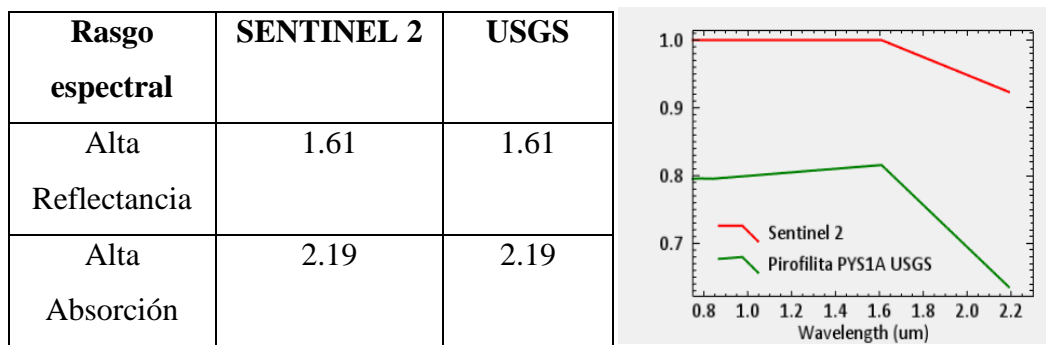


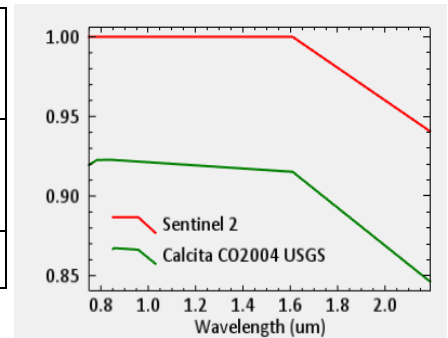
Figura 4.36. Rasgos espectrales de mayor similitud para Pirofilita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 1.61 µm y una alta absorción en 2.19 µm.

- **Alteración Propilítica**

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.783-1.61	0.783-1.61
Alta Absorción	2.19	2.19

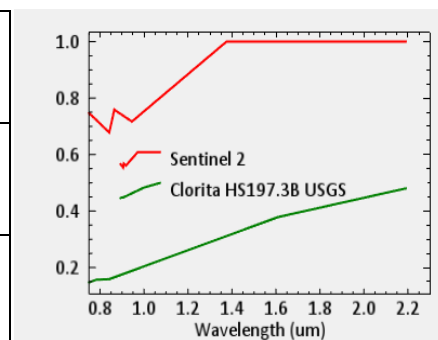


**Figura 4.37.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Calcita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 1.61  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 2.19  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	2.19	2.19
Alta Absorción	0.842	0.842

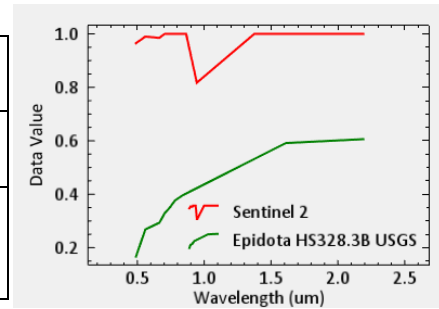


**Figura 4.38.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Clorita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del infrarrojo con una alta reflectancia en 2.19  $\mu\text{m}$  y una alta absorción en 0.842  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	2.19	2.19
Alta Absorción	0.645	0.645



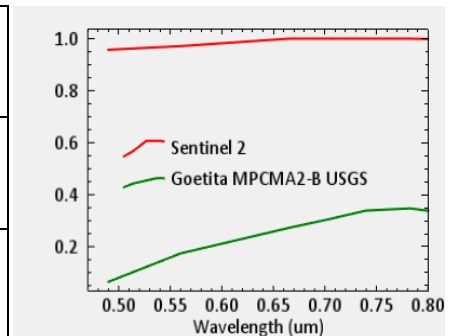
**Figura 4.39.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Epidota.

**Fuente:** Elaboración propia

No se presenta una similitud espectral clara en la región del infrarrojo, sin embargo, las firmas espectrales coinciden con un rango de absorción en  $0.665 \mu\text{m}$  (característica de presencia de minerales ferrosos).

- Óxidos

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.74	0.74
Alta Absorción	0.56	0.705



**Figura 4.40.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Goetita.

**Fuente:** Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en  $0.74 \mu\text{m}$  y una alta absorción en  $0.56 \mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.705	0.74
Alta Absorción	0.56 0.74	0.56

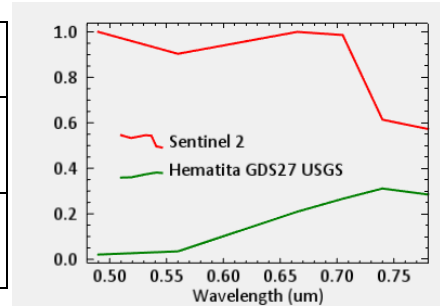


Figura 4.41. Rasgos espectrales de mayor similitud para Hematita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta absorción en 0.56  $\mu\text{m}$ .

Rasgo espectral	SENTINEL 2	USGS
Alta Reflectancia	0.705	0.705
Alta Absorción	0.842	0.945

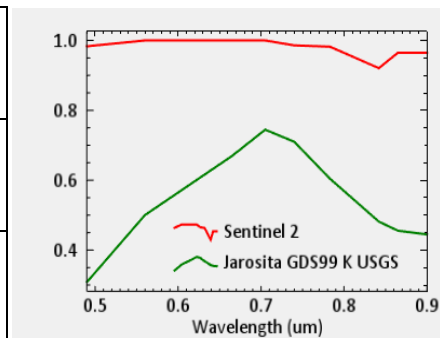
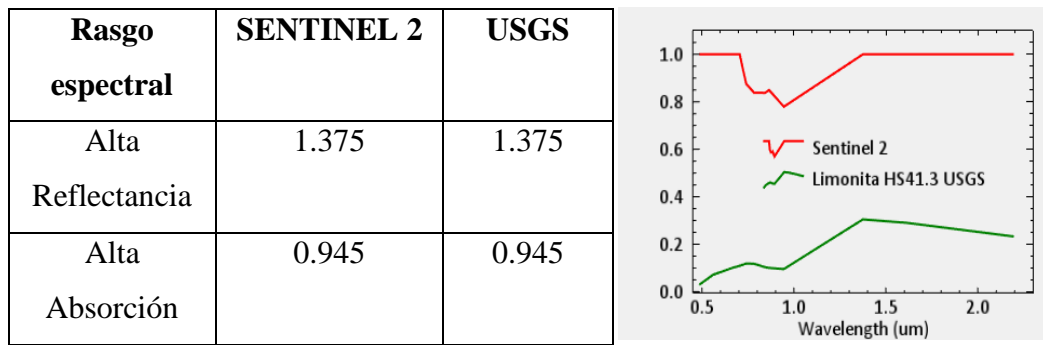


Figura 4.42. Rasgos espectrales de mayor similitud para Jarosita.

Fuente: Elaboración propia

Se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR) con una alta reflectancia en 0.705  $\mu\text{m}$  y una absorción en 0.842  $\mu\text{m}$  – 0.945  $\mu\text{m}$  en la región del SWIR.



**Figura 4.43.** Rasgos espectrales de mayor similitud para Limonita.

**Fuente:** Elaboración propia

No se presenta una similitud espectral en las bandas del visible (VNIR). En las bandas del SWIR, se presenta una alta reflectancia en 1.375  $\mu\text{m}$  y una absorción en 0.945  $\mu\text{m}$ .

#### 4.8 Zonas de interés prospectivo

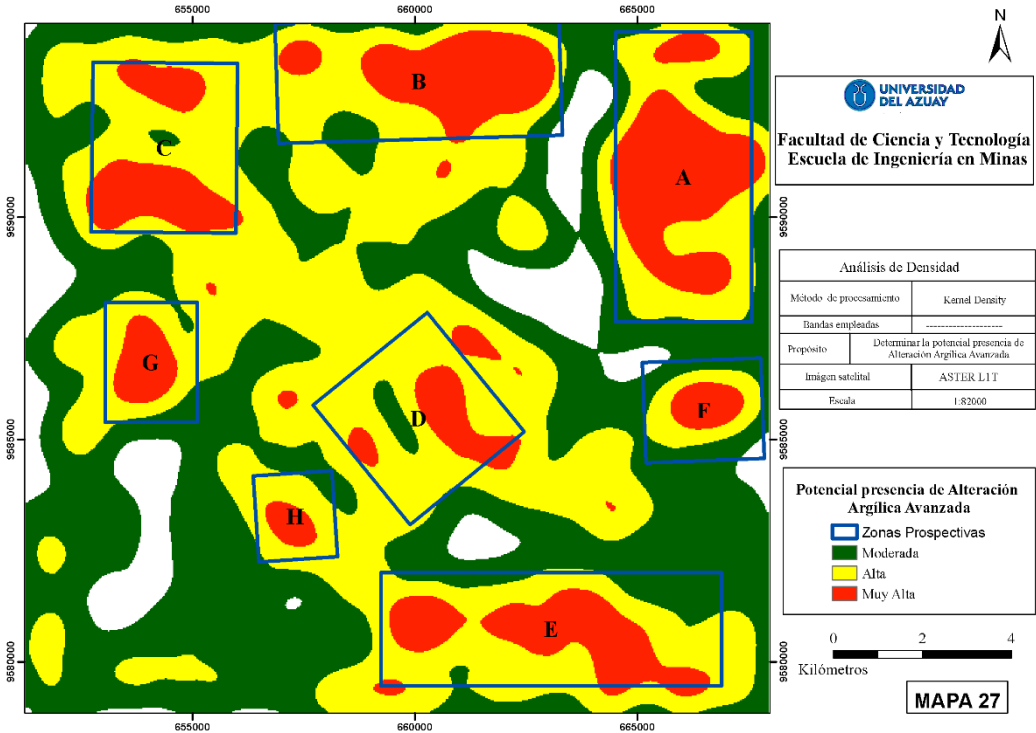
Para determinar las potenciales zonas de interés prospectivas en el área de estudio se ha realizado un análisis de densidad “*Kernel Density*” en el software ArcGis. El algoritmo se basa en un análisis de la concentración o incidencia de puntos en una determinada zona, es decir, solo los puntos que caen dentro de una vecindad (puntos aledaños) son los usados para el cálculo. Cabe recalcar que el análisis *Kernel* no usa un valor de entrada (peso), simplemente analiza la incidencia o concentración de puntos de una zona con la finalidad de generar un *raster*, en donde se visualiza de mejor manera la mayor presencia de minerales de alteración hidrotermal para nuestro caso en particular.

Los datos de entrada para el proceso de “*Kernel Density*” son los obtenidos del Análisis de Componentes Principales, debido a que estos resultados no contienen información redundante.

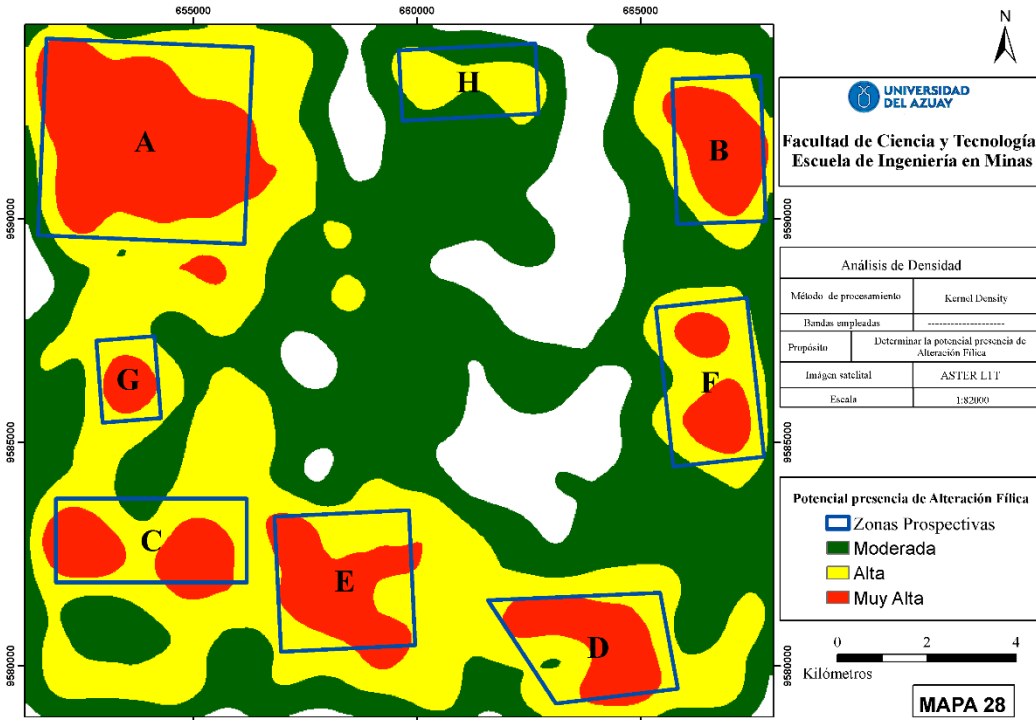


4.8.1 ASTER LIT

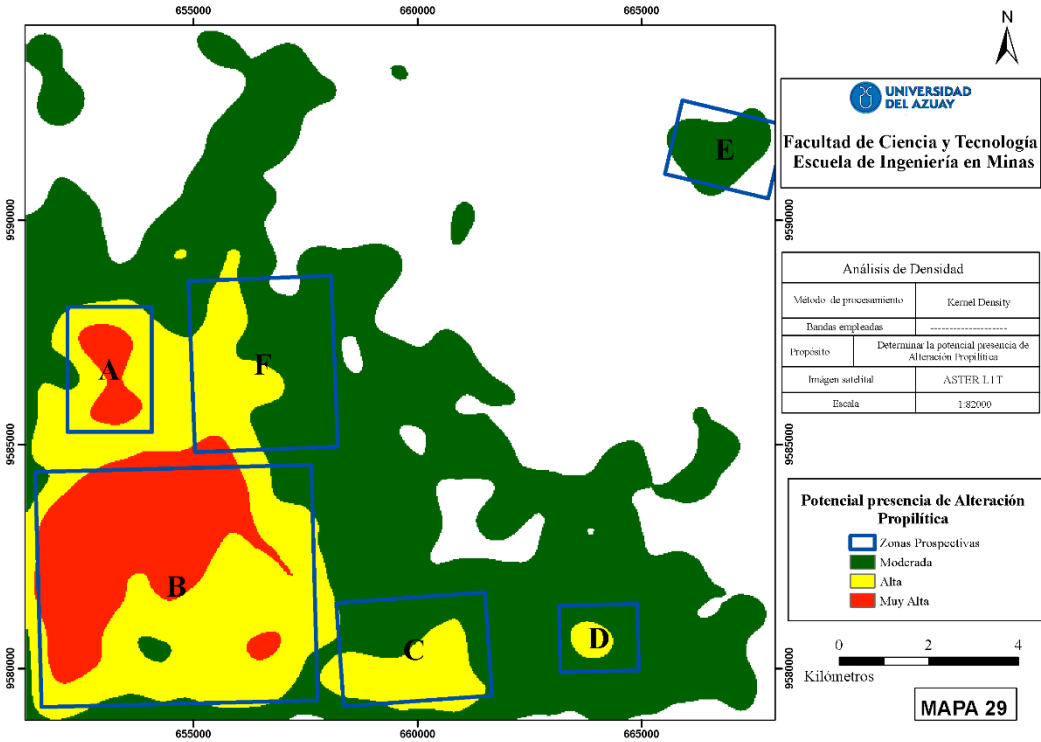
• Alteración Argílica Avanzada



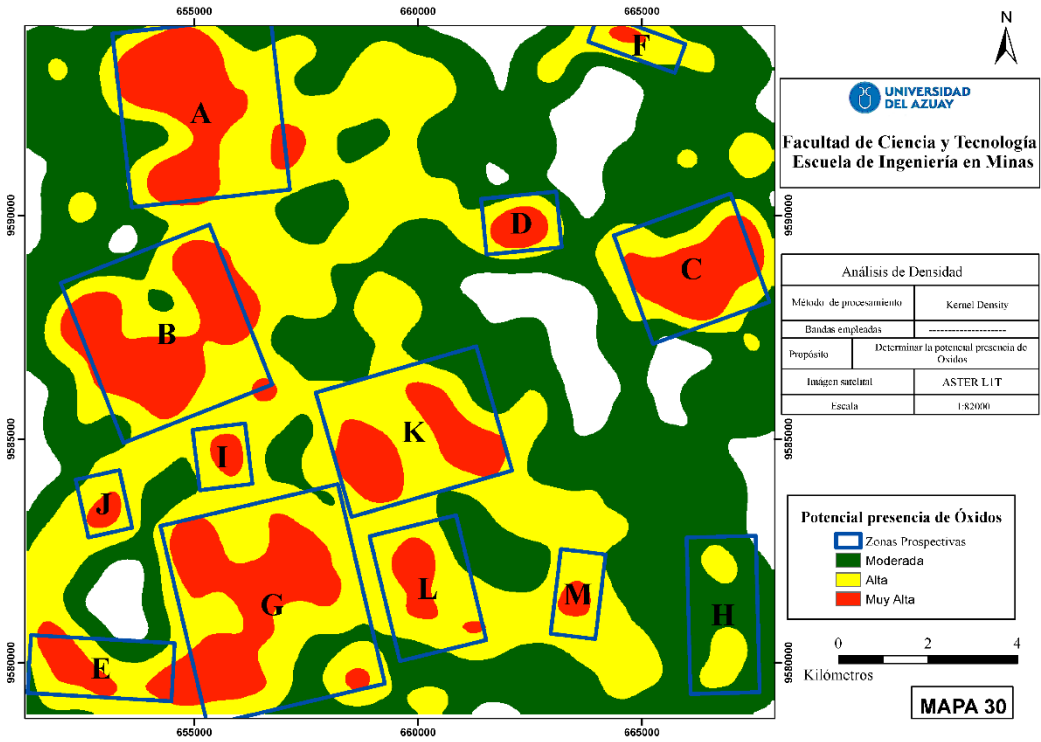
• Alteración Fílica



• Alteración Propilítica

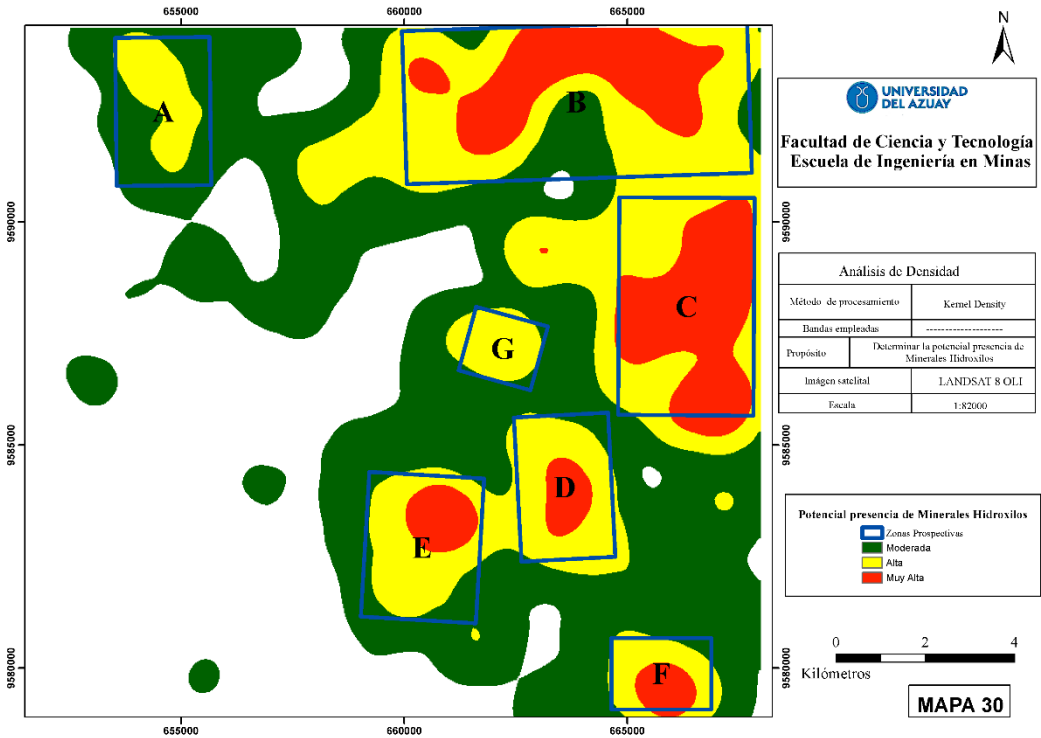


• Óxidos

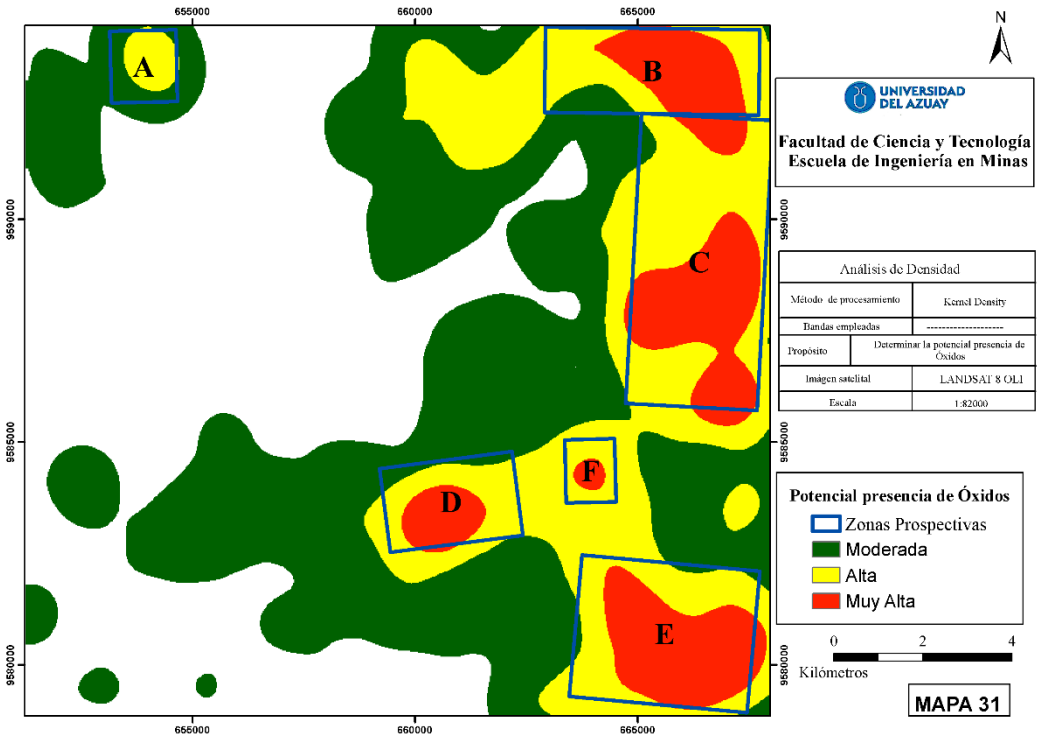


### 4.8.2 LANDSAT 8 OLI

- Hidroxilos**

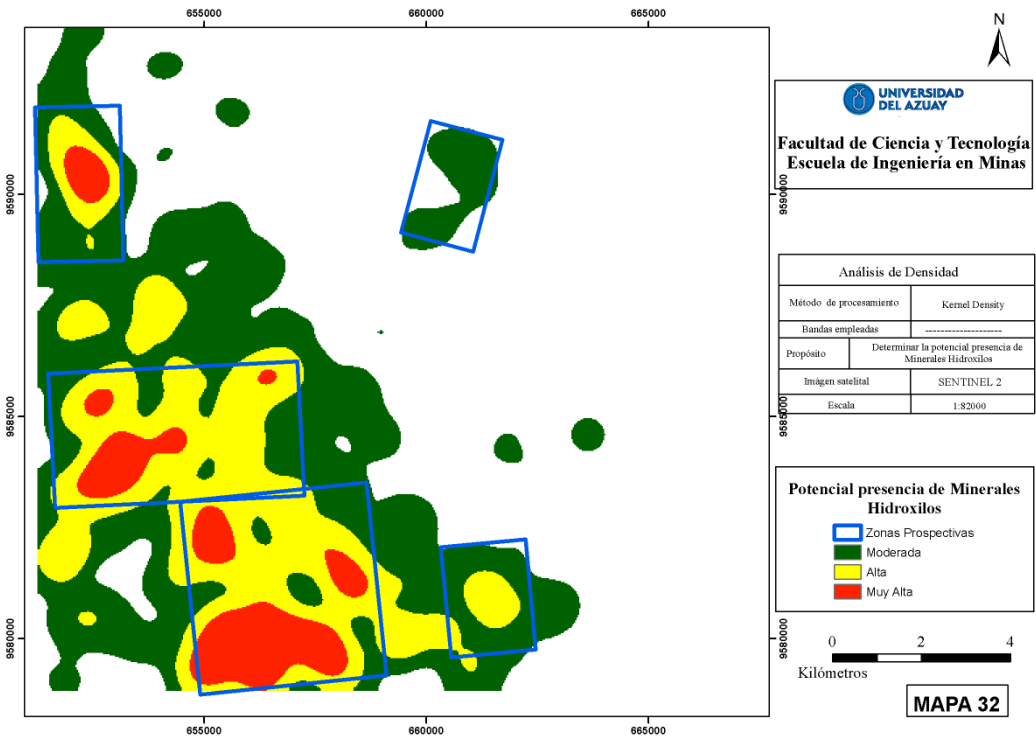


- Óxidos**

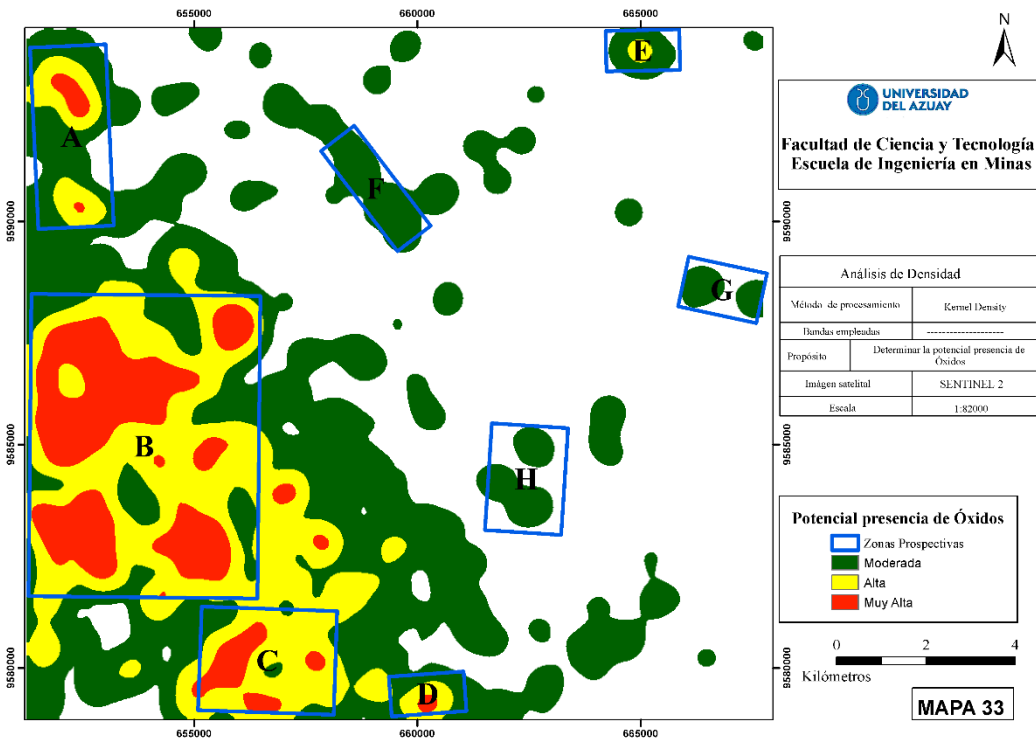


### 4.8.3 SENTINEL 2

- Hidroxilos**



- Óxidos**



## CONCLUSIONES

- La teledetección espacial como herramienta para la identificación y delimitación de zonas de alteración hidrotermal es potencialmente útil, debido a su elevada efectividad en la obtención y calidad de resultados; además, ofrece un significativo ahorro económico respecto a los métodos prospectivos tradicionales, partiendo de que las imágenes usadas en este trabajo son de libre acceso y sobre todo se ha reducido significativamente el trabajo exploratorio en campo.
- La imagen ASTER L1T presenta una mejor resolución y sensibilidad espectral respecto a las imágenes LANDSAT 8 y SENTINEL 2, específicamente en la región del SWIR, permitiéndonos una mayor capacidad en la aplicación y combinación de técnicas de realce espectral para la determinación de zonas con potencial presencia de alteración hidrotermal.
- La técnica del Análisis de Componentes Principales (ACP) ofrece una ventaja significativa frente a las otras técnicas empleadas en el presente trabajo, debido a que en el ACP se usan exclusivamente las bandas en las cuales los minerales presentan sus principales características espectrales; sumado a esto el ACP genera una reducción de la dimensionalidad de los datos. Por tal razón, los resultados derivados del ACP son tomados como válidos para la determinación de potenciales zonas prospectivas a futuro.
- De la extracción de firmas espectrales de las tres imágenes satelitales, ASTER L1T ofrece los mejores resultados para generar una comparación con las firmas espectrales provenientes de la USGS. En otras palabras, al tener ASTER más bandas en la región del SWIR (6 bandas), estas se asemejan más a las firmas ofrecidas por la USGS, permitiéndonos diferenciar características espectrales en longitudes de ondas típicas de los minerales de alteración hidrotermal, mientras que LANDSAT 8 y SENTINEL 2 ofrecen solamente 2 bandas en el SWIR. Por tal razón, para estas dos imágenes únicamente se obtuvo una clasificación por grupos minerales ya sean estos hidroxilos, minerales arcillosos y óxidos, mientras que para ASTER L1T, se clasificó y delimitó puntualmente los distintos

tipos de alteración hidrotermal presente en la zona, así como sus minerales característicos.

- Los resultados obtenidos de las tres imágenes empleadas en el análisis digital del presente trabajo demuestran una gran correlación de datos. Si bien los productos obtenidos de LANDSAT 8 y SENTINEL 2 difieren entre ellos en cuanto a la distribución espacial de los hidroxilos y óxidos; estos al ser contrastados con los resultados obtenidos de ASTER L1T vemos que gozan de una buena correlación espacial. La diferencia espacial mostrada por los sensores LANDSAT 8 y SENTINEL 2 se debe a la sensibilidad espectral que presenta cada sensor respecto a ASTER, es decir, ASTER mapea de manera más precisa los minerales de alteración hidrotermal.

## RECOMENDACIONES

- La teledetección espacial como herramienta para el mapeo de zonas con presencia de alteración hidrotermal es un proceso enteramente cualitativo, de modo que permite identificar y diferenciar los distintos tipos de alteración hidrotermal y grupos minerales presentes en el área de estudio, más no cuantificarlos. Por tal motivo, es indispensable que se realicen campañas de reconocimiento in situ de las zonas de alteración y de las zonas prospectivas seleccionadas digitalmente por medio de esta herramienta.
- Se recomienda seguir profundizando en la caracterización mineralógica de la zona de estudio, sea mediante el uso de sensores remotos más sofisticados (MODIS, WorldView- 3, Hyperion) o mediante verificación in situ (toma de muestras y elaboración de láminas delgadas para caracterización mineralógica) de modo que se pueda corroborar la información generada en el presente trabajo
- En base a las áreas seleccionadas digitalmente como zonas prospectivas, se recomienda que se hagan campañas exploratorias, de modo que se pueda acceder a dichas zonas y tomar sus firmas espectrales con un espectrómetro de mano (PIMA o TerraSpec) y estas compararlas con las firmas ofrecidas por la USGS, de modo que se pueda generar una clasificación SAM mucho más precisa que la realizada en el presente trabajo.
- Finalmente, se recomienda corroborar la información obtenida del análisis de densidad “*Kernel Density*” ya sea mediante el uso de otros algoritmos como “Hot Spot” o mediante análisis geoestadísticos como IDW y Kriging (previa obtención de valores referenciales de concentración mineral obtenida por recolección de muestras en campo).

## REFERENCIAS

- ARCOM. (2019). *Labores Mineras En El Distrito Zaruma – Portovelo*. 1–67.
- Arias, G. (2017). Zonificación de paragénesis de las vetas Colorada, Katherine y Gaby norte en la sociedad civil minera Goldmins ubicada en el distrito aurífero Polimetálico Portovelo-Zaruma. In *Universidad Central Del Ecuador*.
- Azurra, D., Castro, S., Kaku, M., Kohno, I., & Marin, G. (2003). PROCESAMIENTO Y PRODUCTOS ASTER DEL ÁREA DE SIERRA DE FAMATINA, PROVINCIA DE LA RIOJA, REPUBLICA DE ARGENTINA. *Anais XI SBSR*, 3(May 2014), 815–822.
- Báscones, A., Suárez, M., Ferrer-Julià, M., García-Meléndez, E., Colmenero-Hidalgo, E., & Quirós, A. (2020). Caracterización de minerales de arcilla y óxidos de hierro mediante espectroscopía de reflectancia difusa (VNIR–SWIR). *Revista de Teledetección*, 55, 49.  
<https://doi.org/10.4995/raet.2020.13331>
- Bonilla, W. R. (2009). *Metalogenia del distrito minero Zaruma-Portovelo, República del Ecuador*. 219.
- Caiza, E. (2018). “ESTIMACIÓN DE ZONAS DE ALTERACIÓN HIDROTHERMAL MEDIANTE INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES TIPO ASTER Y USO DEL EQUIPO TERRASPEC EN LA ZONA ORIENTAL DE CERRO DE PASCO, PERÚ.” Universidad Central del Ecuador.
- Campbell, J., & Wynne, R. (2011). *Introduction to REMOTE SENSING (FIFTH EDIT)*. The Guilford Press.
- Carrión, G. (2010). “ESTUDIO MINERALOGICO PARA LA DETERMINACIÓN DE ORO REFRACTARIO EN LOS DISTRITOS MINEROS DE PORTOVELO, BELLA RICA Y SAN GERARDO” [UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA].  
[http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1509/3/UTPL\\_Carrion\\_Gonza\\_Galo\\_Antonio\\_553X39.pdf](http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1509/3/UTPL_Carrion_Gonza_Galo_Antonio_553X39.pdf)
- Chuvieco, E., & Huete, A. (2016). Fundamentals of satellite remote sensing. In *Fundamentals of Satellite Remote Sensing* (Second Edi). Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/b18954>



- Clark, E., & Rilee, M. (2010). *Remote Sensing Tools for Exploration*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6830-2>
- Clark, N. (1999). *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy* (Vol. 3). U.S Geological Survey.
- Clark, R., King, T., Klejwa, M., Swayze, G., & Vergo, N. (1990). High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95(B8). <https://doi.org/10.1029/jb095ib08p12653>
- Crosta, A. P., & M. Moore, J. (1989). Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais state Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. *Proceedings of the 7th (ERIM) Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary*(2-6 Oct), 1173–1187.  
<https://www.researchgate.net/publication/284966233>
- Cueva, S., & Hernández, J. (2015). “*APLICACIÓN DEL MÉTODO DE DIFRACCIÓN PARA LA DETERMINACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE MINERALES DE ALTERACIÓN HIDROTERMAL DEL SONDAJE TEL-01 DEL PROYECTO TELIMBELA, SU RELACIÓN CON LA LITOLOGÍA Y MINERALIZACIÓN*” [Escuela Superior Politécnica del Litoral].  
<http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/37133/D-CD70198.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>
- Cunha, R. (2015). *Mapping hydrothermal gold mineralization using Landsat 8 data . A case of study in Chaves license , Portugal*.
- Di Tommaso, I., & Rubinstein, N. (2005). Mapeo De Alteración Hidrotermal a partir de Datos ASTER en el Porfido de Cu- Mo El Infiernillo, Mendoza, Argentina. In *Análisis XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto* (pp. 1765–1773).
- Dunkley y Gaibor. (1997). 2.- *Mapa Geológico Cordillera Occidental del Ecuador entre 3°-4°S - escala 1 200.000.pdf*.
- ESA. (2015). *ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services*. [https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2\\_SP-1322\\_2.pdf](https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_SP-1322_2.pdf)
- GAD Municipal de Portovelo. (2012). *Planes de Desarrollo y Ordenamiento Territorial - Portovelo-El Oro*. [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdocumentofinal/07600009](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/07600009)

30001\_PDyOT 2014-2019\_15-03-2015\_23-32-58.pdf%0Ahttp://sni.gob.ec/planes-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial%0Ahttp://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\_SNI

- Geological Survey, U. (2020). Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Level 1 Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance (AST\_L1T) Product, AST\_L1T Product User's Guide. *Open-File Report, 1*(July), 1–68.
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2002). *Digital image processing (2nd edition)*.
- Goossens, P. J. (1972). Metallogeny in ecuadorian andes. *Economic Geology*, 67(4), 458–468. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.67.4.458>
- Gorin, B. A. (2002). New method to optimize atmospheric correction for hyperspectral thermal imaging. *Optical Engineering*, 41(9), 2088. <https://doi.org/10.1117/1.1499498>
- Hauff, P. (2008). An overview of VIS-NIR-SWIR field spectroscopy as applied to precious metals exploration. *Arvada, Colorado: Spectral International Inc, 80001*(January 2008), 303–403.
- Hu, B., Xu, Y., Wan, B., Wu, X., & Yi, G. (2018). Hydrothermally altered mineral mapping using synthetic application of Sentinel-2A MSI, ASTER and Hyperion data in the Duolong area, Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 101(May), 384–397. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.07.017>
- Hunt, G. (1977). SPECTRAL SIGNATURES OF PARTICULATE MINERALS IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED. *Society of Explotatrion Geophysicists*, 42(6), 501–513.
- INEC. (2010). Resultado del censo 2010. *Instituto Nacional de Estadística y Censo*, 4, 8.
- Kennerley, J. . (1980). *Kennerley J.B, 1980 Mapa Geológico de Zaruma Escala 1:100000*. Instituto Geográfico Militar, Ministerio de Recursos Naturales y Energéticos, Dirección General Geología y Minas, Asistencia técnica del Gobierno de Gran Bretaña. <https://edepot.wur.nl/486789>
- Kerr, A., Rafuse, H., Sparkes, G., Hinchey, J., & Sandeman, H. (2011). Visible/Infrared Spectroscopy (Virs) As a Research Tool in Economic Geology: Background and Pilot Studies from Newfoundland and Labrador. *Current Research, April 2016*, 145–166.

- Loughlin, W. P. (1991). Principal component analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(9), 1163–1169.
- Luca Congedo. (2016). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation Release 4.8.0.1. September*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1219.3524>
- Mahboob, M. A., Genc, B., Celik, T., Ali, S., & Atif, I. (2019). Mapping hydrothermal minerals using remotely sensed reflectance spectroscopy data from Landsat. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 119(3), 279–289. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n3a7>
- Mamani, T. (2017). Aplicación de Imágenes ASTER en la Detección de Zonas de Alteraciones Hidrotermales, Sector Titire, Carumas - Moquegua. In *Universidad Nacional del Altiplano*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Marquetti, C., Becchio, R., Seggiaro, R., & Nakashima, K. (2004). *Aplicación de datos ASTER para el mapeo de la hoja geológica Andalgala, Catamarca, Argentina*. SEGEMAR-JICA.
- Mather, P. M. (2011). Computer Processing of Remotely-Sensed Images Fourth Edition. In *Computer Processing of Remotely-Sensed Images Fourth Edition*. In *Processing*.
- Mora, A., Jumbo-Flores, D., González-Merizalde, M., & Bermeo-Flores, S. A. (2016). Niveles de metales pesados en sedimentos de la cuenca del río puyango, Ecuador. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 32(4), 385–397. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.04.02>
- Ninomiya, Y. (2003). A Stabilized Vegetation Index and Several Mineralogic Indices Defined for ASTER VNIR and SWIR Data. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3, 1552–1554. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1294172>
- Núñez, E. (2003). *Geología del Ecuador*.
- Olivia, Aldo ; Ruiz, A. (2015). *Inestabilidad del terreno en zonas urbanas de Zaruma y Portovelo . Factores condicionantes y*. December, 17. [https://www.researchgate.net/publication/324507378\\_Inestabilidad\\_del\\_terreno\\_en\\_zonas\\_urbanas\\_de\\_Zaruma\\_y\\_Portovelo\\_Ecuador\\_Factores\\_condicionantes\\_y\\_desencadenantes](https://www.researchgate.net/publication/324507378_Inestabilidad_del_terreno_en_zonas_urbanas_de_Zaruma_y_Portovelo_Ecuador_Factores_condicionantes_y_desencadenantes)
- Ordóñez, A & Puglla, A. (2013). Universidad Nacional De Loja Autor. In *Universidad Nacional De Loja*.



- geochronology. *Mineralium Deposita*, 47(4), 383–410.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-011-0378-z>
- Sekandari, M., Masoumi, I., Pour, B., & M Musli, A. (2020). WorldView-3 Spectral Imagery for Exploration of Carbonate-Hosted Pb-Zn Deposits in the Central. *Remote Sensing*.
- Smirnov, V. (1982). *Geologia de Yacimientos Minerales*. Editorial Mir.
- SNGR, U. / P. (2012). *Perfil Territorial De Zaruma*. 11.  
[http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/840/1/Perfil territorial ZARUMA.pdf](http://repositorio.cedia.org.ec/bitstream/123456789/840/1/Perfil%20territorial%20ZARUMA.pdf)
- Testa, F. J., Villanueva, C., Cooke, D. R., & Zhang, L. (2018). Lithological and hydrothermal alteration mapping of epithermal, porphyry and tourmaline breccia districts in the argentine andes using ASTER imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 1–45. <https://doi.org/10.3390/rs10020203>
- Townley, B. K. (2006). Metalogénesis : Hidrotermalismo y Modelos de Yacimientos. *Apuntes y Referencias Documento de Trabajo*, 92.
- Tutivén, J. A. (2017). *Determinación De Las Asociaciones Minerales Con Contenido De Oro En La Veta Hidrotermal Del Distrito Minero Zaruma-Portovelo*.
- U.S. Geological Survey. (2016). Landsat 8 Data Users Handbook. *Nasa*, 8(June), 97. <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>
- Van der Meer, F. D., van der Werff, H. M. A., & van Ruitenbeek, F. J. A. (2014). Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications. *Remote Sensing of Environment*, 148(June), 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.022>
- Van der Werff, H., & van der Meer, F. (2016). Sentinel-2A MSI and Landsat 8 OLI provide data continuity for geological remote sensing. *Remote Sensing*, 8(11). <https://doi.org/10.3390/rs8110883>
- Vikentyev, I., Banda, R., Tsepín, A., Prokofiev, V., & Vikentyeva, O. (2005). Mineralogy and formation conditions of Portovelo-Zaruma gold-sulphide vein deposit, Ecuador. *Geochemistry, Mineralogy and Petrology*, 43(January), 148–154.
- Visual Information Solutions, I. (2009). *ENVI User's Guide Restricted Rights Notice*. [www.apache.org/](http://www.apache.org/)

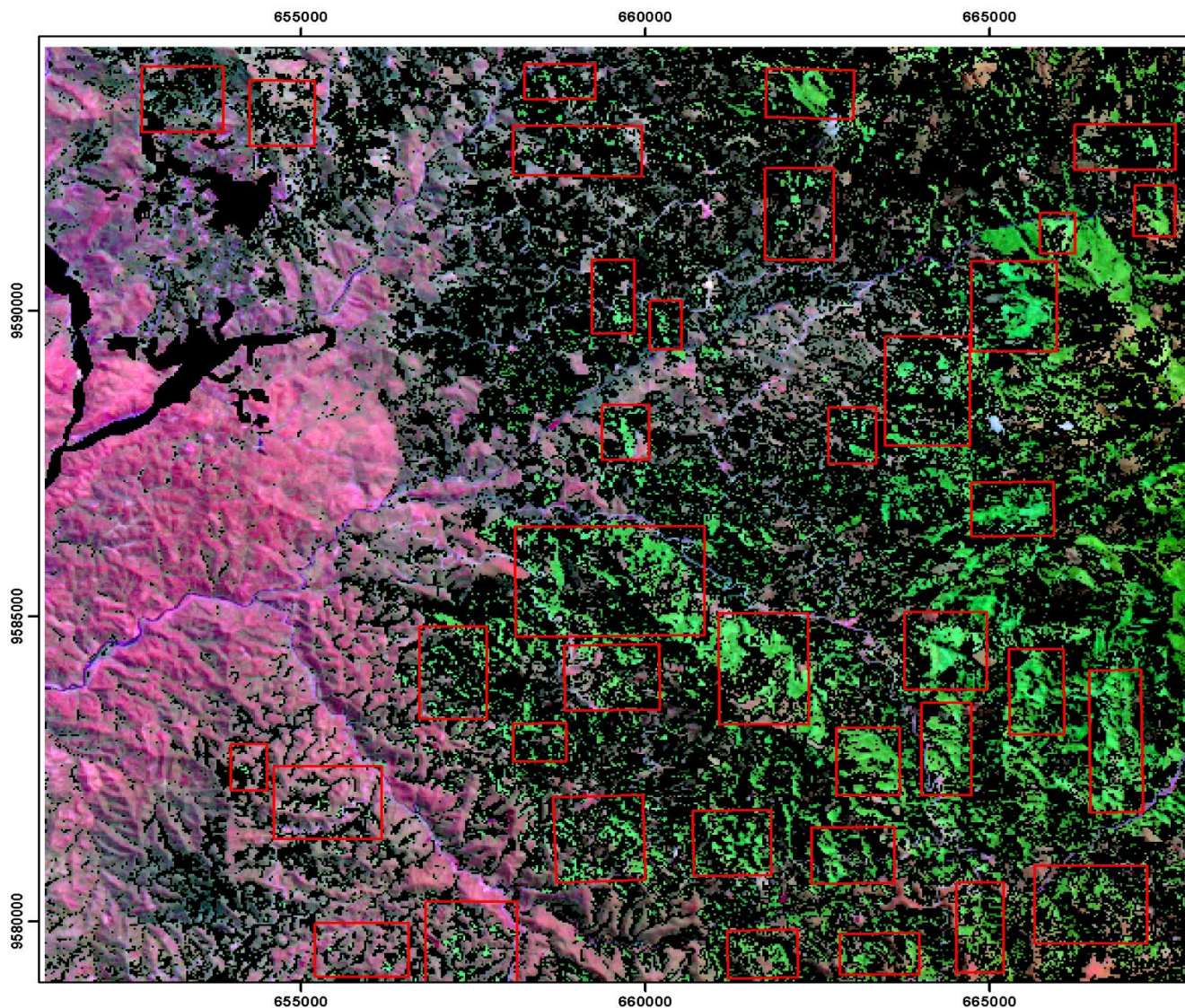
# **ANEXOS**

# **ASTER L1T**

# **Anexo A**



## **Composiciones RBG**

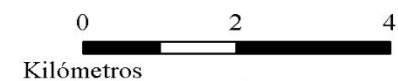




**Facultad de Ciencia y Tecnología**  
**Escuela de Ingeniería en Minas**

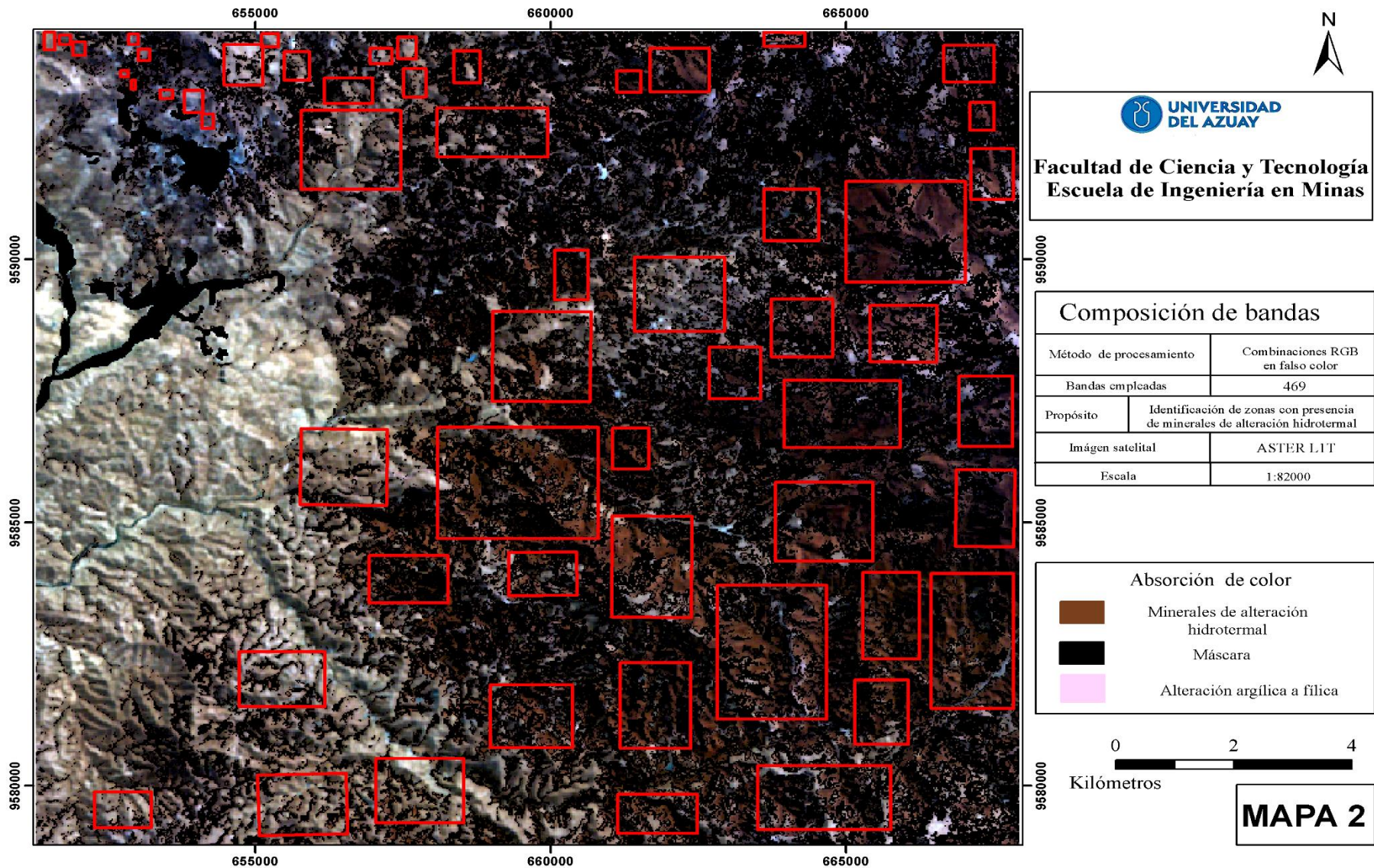
Composición de bandas	
Método de procesamiento	Combinaciones RGB en falso color
Bandas empleadas	531
Propósito	Identificación de zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal
Imagen satelital	ASTER L1T
Escala	1:82000

Absorción de color	
	Minerales de alteración hidrotermal
	Máscara



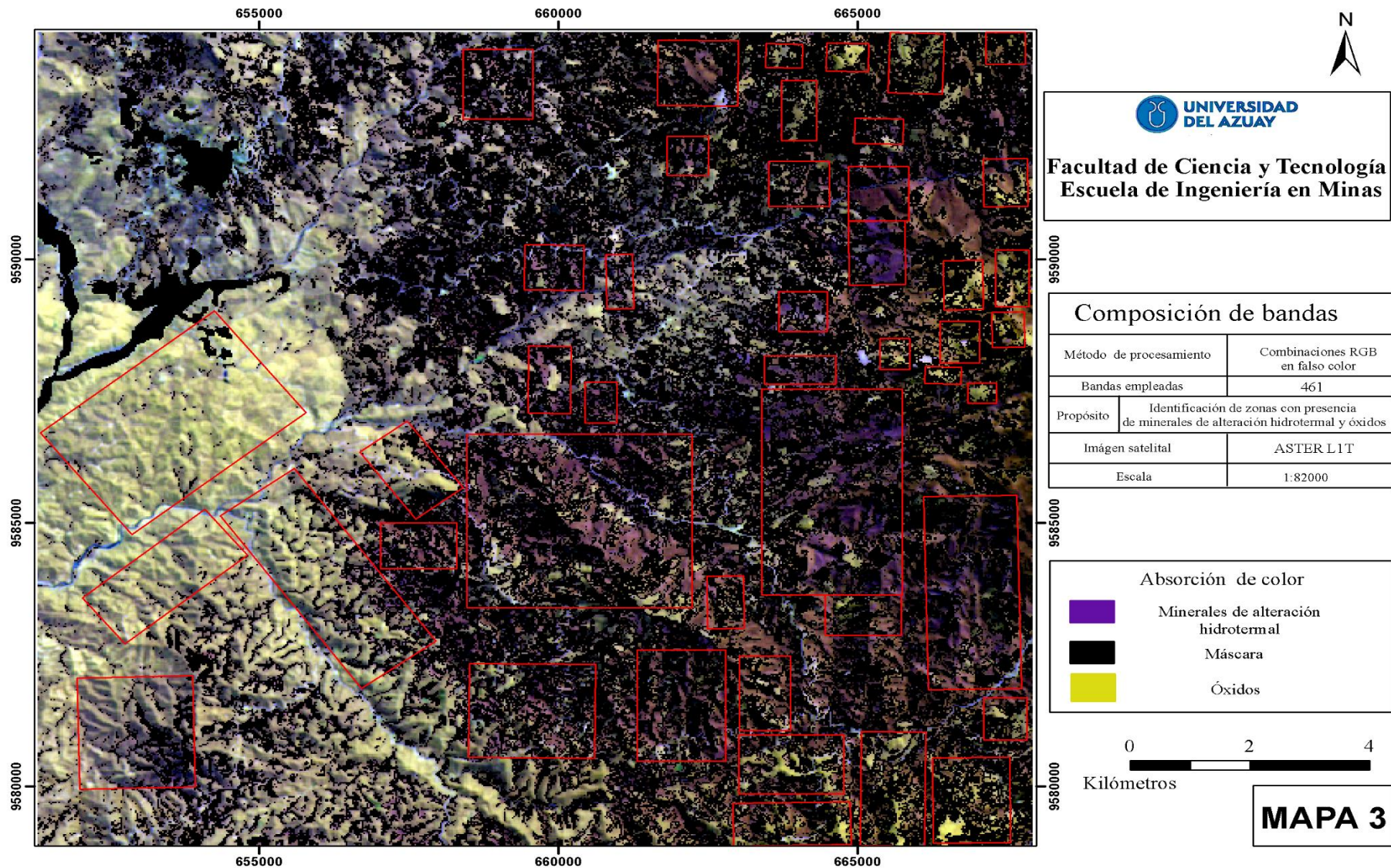
**MAPA 1**





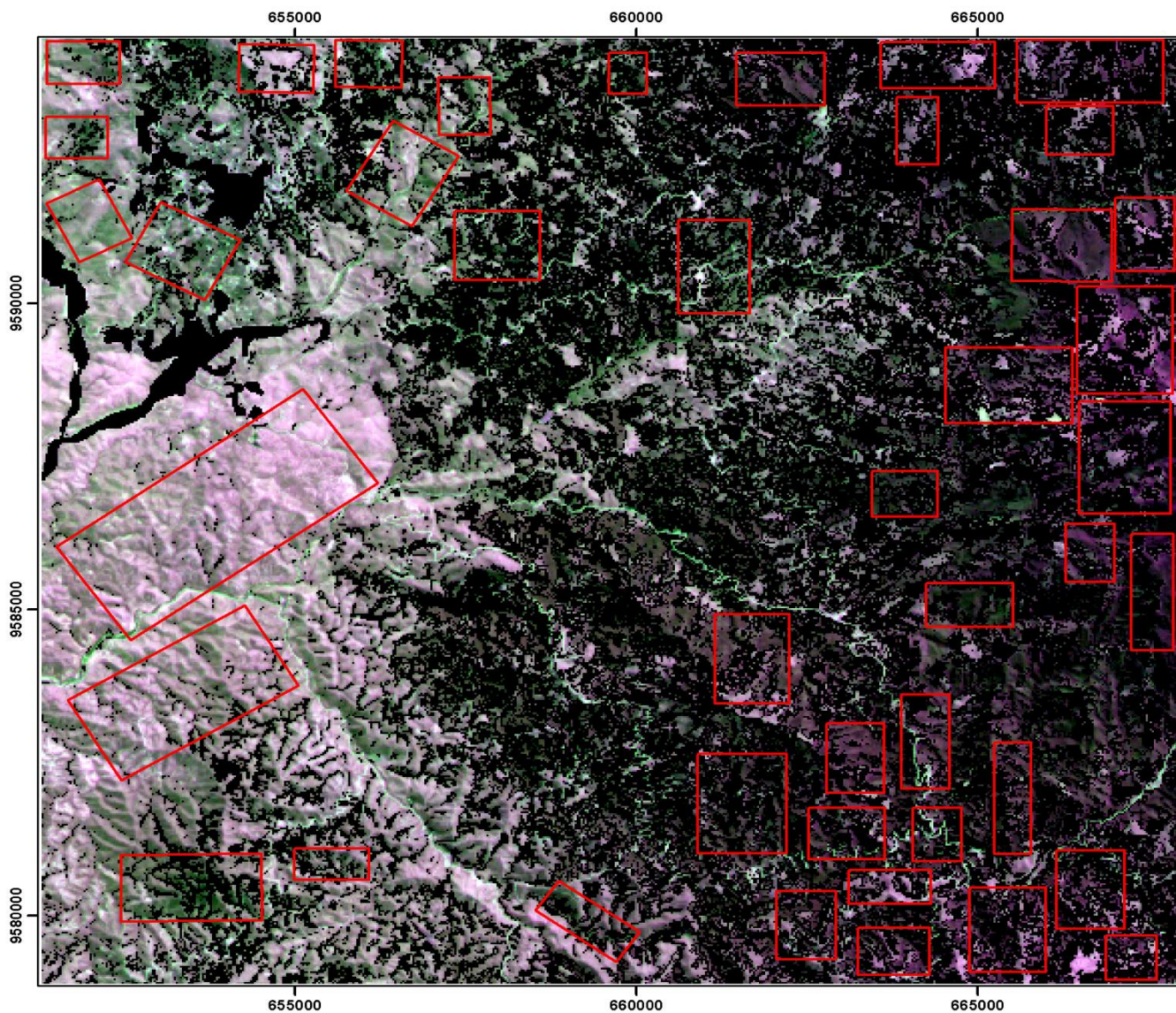
**MAPA 2**








**MAPA 3**





**Facultad de Ciencia y Tecnología**  
**Escuela de Ingeniería en Minas**

Composición de bandas	
Método de procesamiento	Combinaciones RGB en falso color
Bandas empleadas	628
Propósito	Identificación de zonas con presencia de minerales de alteración hidrotermal y óxidos
Imagen satelital	ASTER L1T
Escala	1:82000

Absorción de color	
	Minerales que contienen AL/Fe - OH mezclados con minerales Mg-Fe-OH/CO3
	Máscara
	Óxidos

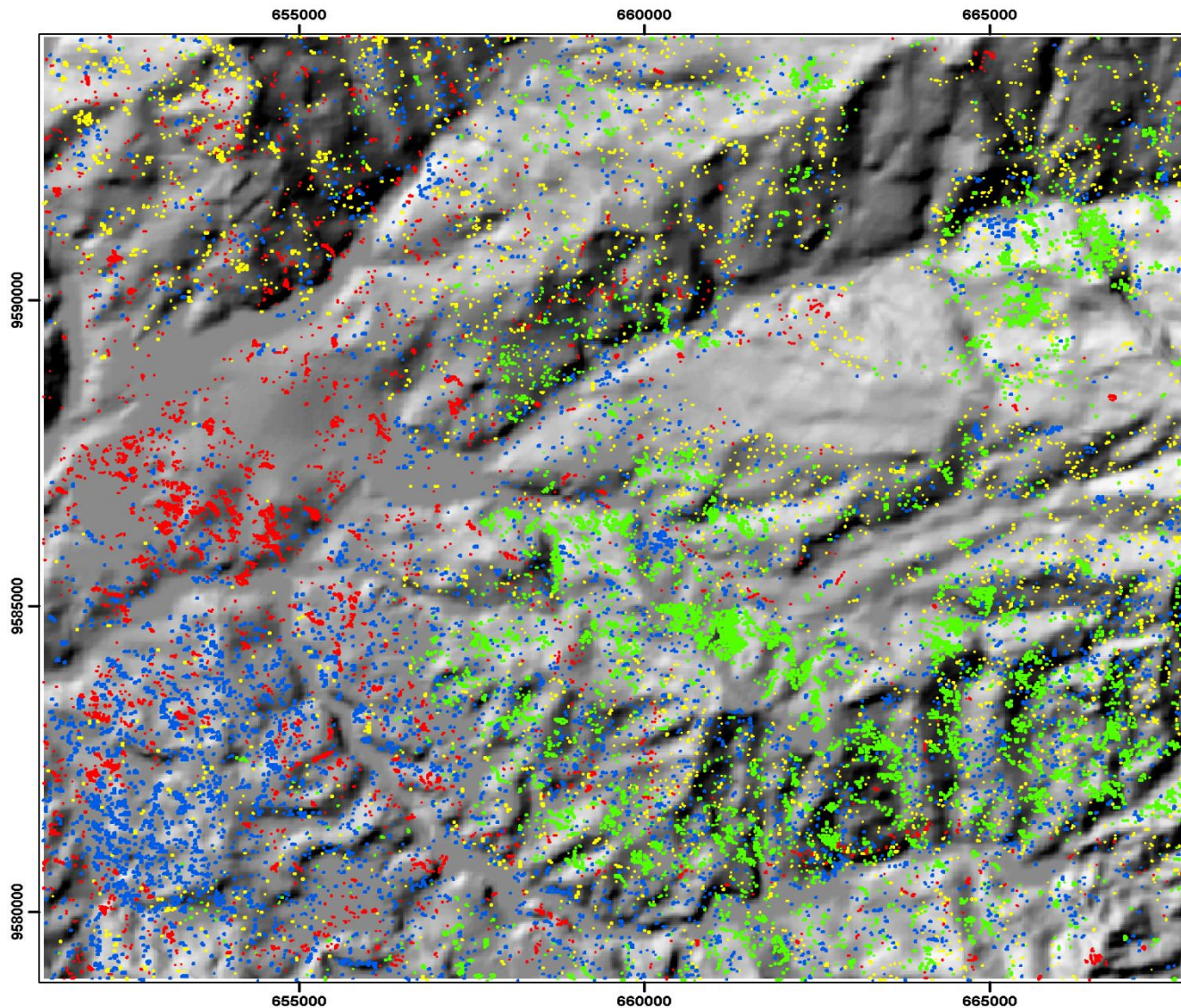


**MAPA 4**

# **Anexo B**

## **Cocientes de bandas**





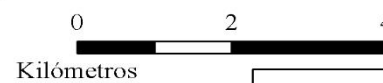
UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología  
Escuela de Ingeniería en Minas

Cocientes de bandas	
Método de procesamiento	Cociente de bandas
Bandas empleadas	1 - 2 - 4 - 5 - 6 - 8
Propósito	Distribución de los tipos de alteración hidrotermal y óxidos
Imagen satelital	ASTER L1T
Escala	1:82000

### Cocientes de bandas

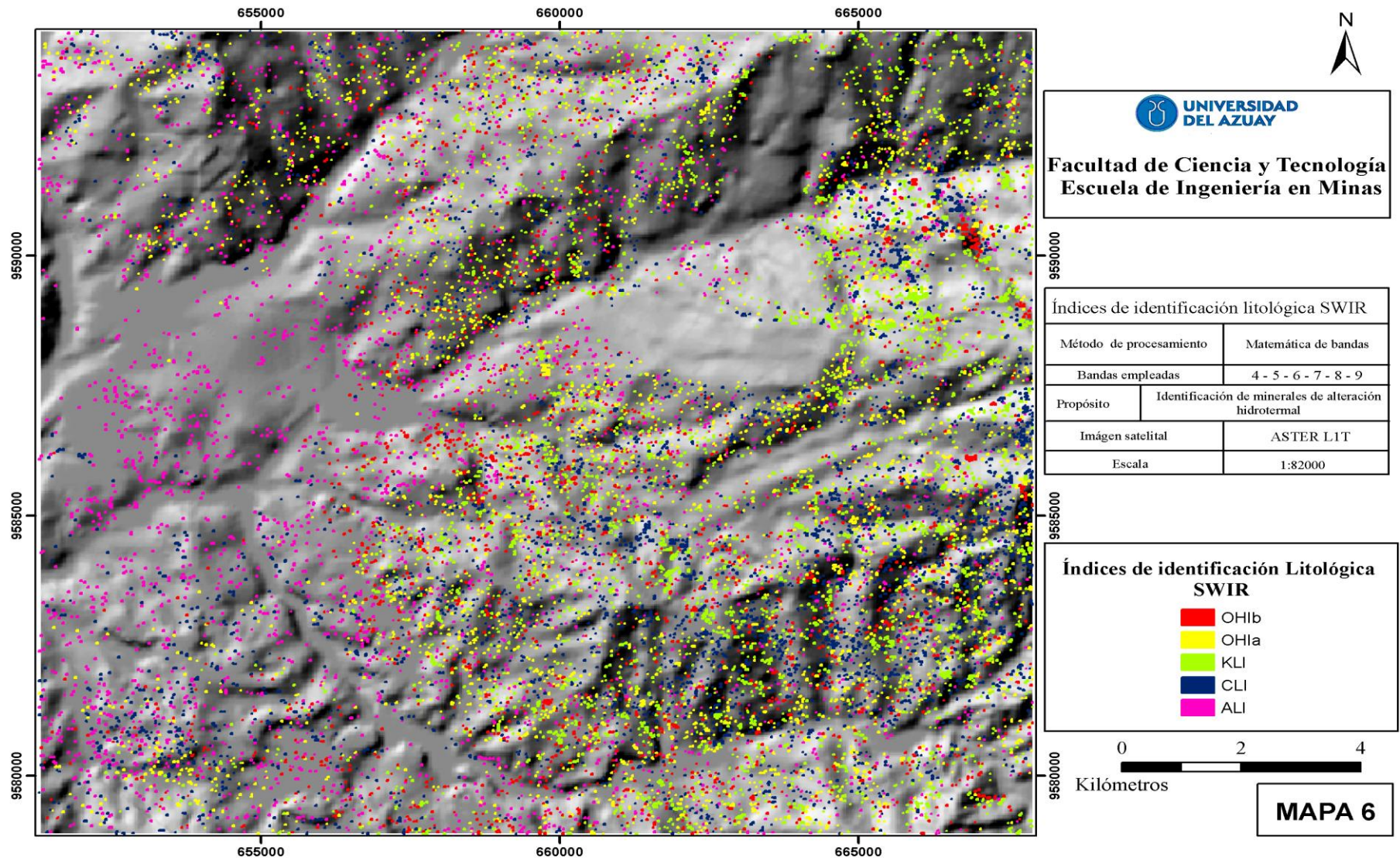
- Propilítica (5/8)
- Óxidos (2/1)
- Filica (5/6)
- Argílica avanzada (4/6)



**MAPA 5**

**Anexo C**  
**Índices de identificación litológica SWIR**

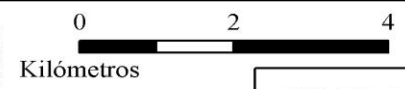




**Facultad de Ciencia y Tecnología**  
**Escuela de Ingeniería en Minas**

Índices de identificación litológica SWIR	
Método de procesamiento	Matemática de bandas
Bandas empleadas	4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9
Propósito	Identificación de minerales de alteración hidrotermal
Imagen satelital	ASTER L1T
Escala	1:82000

Índices de identificación Litológica SWIR	
<span style="color: red;">■</span>	OH1b
<span style="color: yellow;">■</span>	OH1a
<span style="color: green;">■</span>	KLI
<span style="color: blue;">■</span>	CLI
<span style="color: magenta;">■</span>	ALI

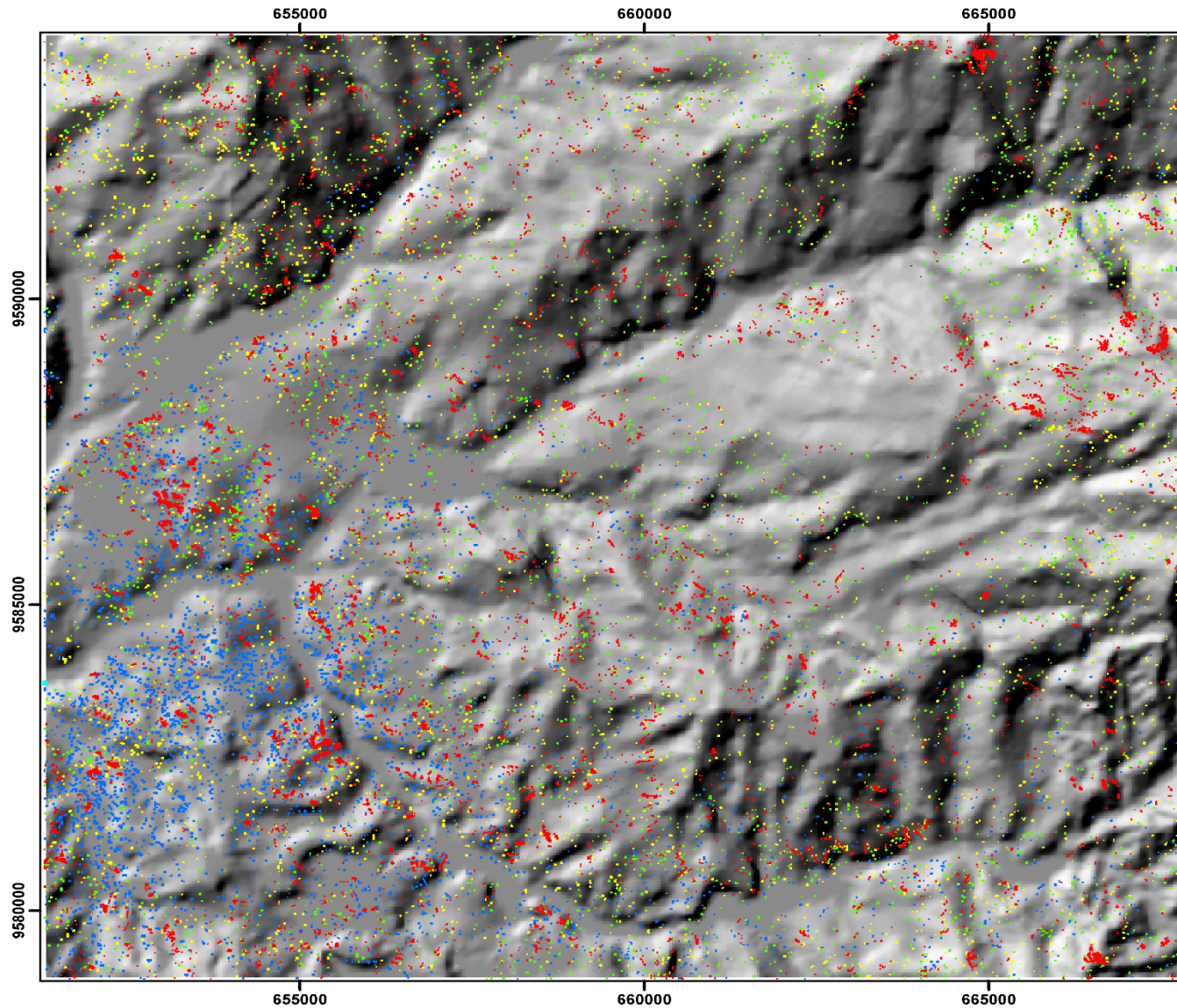


**MAPA 6**



**Anexo D**

**Componentes principales para identificación de los tipos de  
alteración hidrotermal**



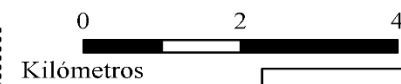
UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología  
Escuela de Ingeniería en Minas

Componentes Principales	
Método de procesamiento	Análisis de Componentes Principales
Bandas empleadas	1-2-3-4-5-6-7-8
Propósito	Mapeo de los tipos de Alteración Hidrotermal y Óxidos
Imagen satelital	ASTER LIT
Escala	1:82000

### Componentes Principales

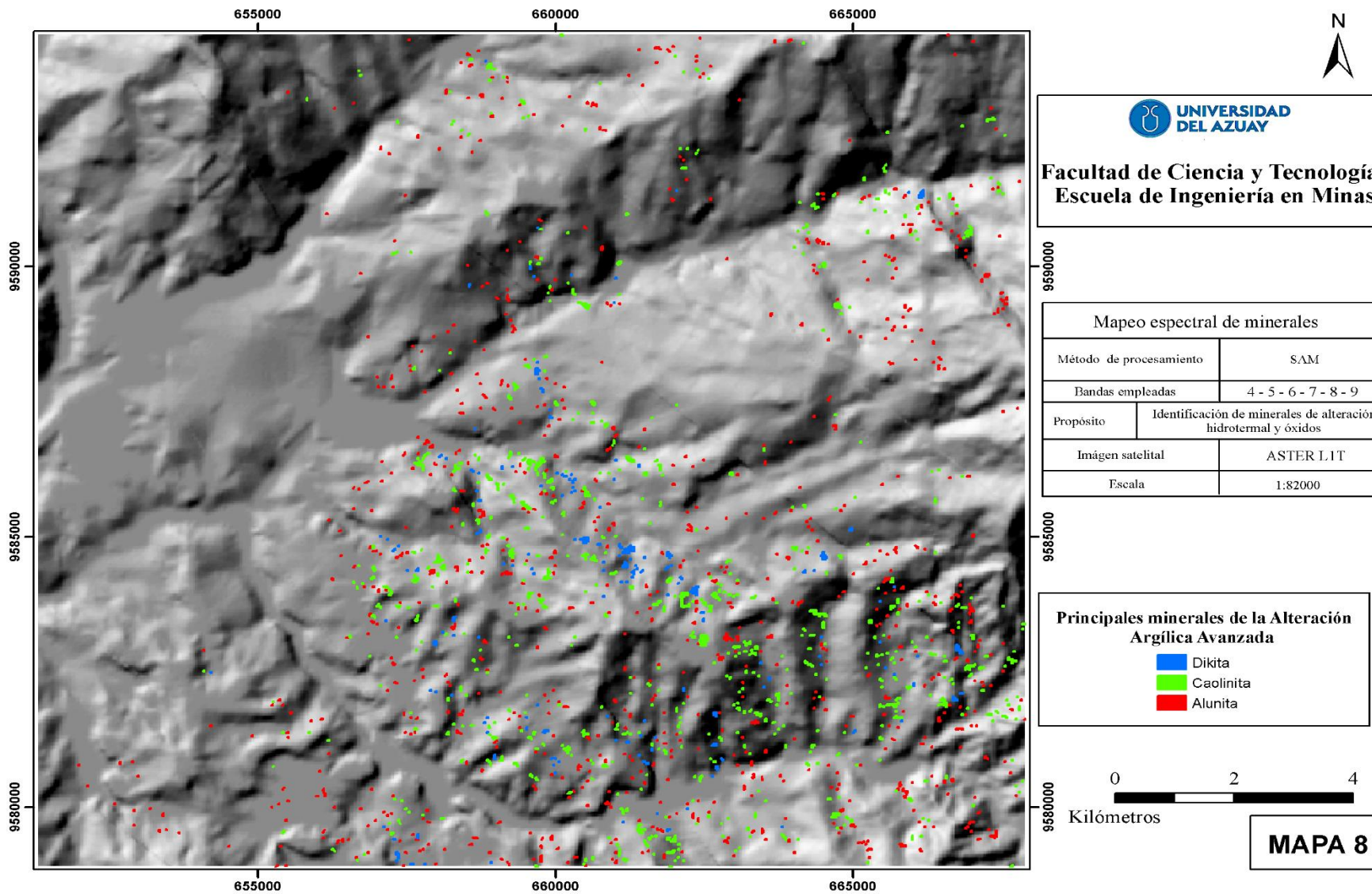
- Óxidos (PC3)
- Propilítica (-PC4)
- Fílica (-PC4)
- Argílica avanzada (PC4)



**MAPA 7**

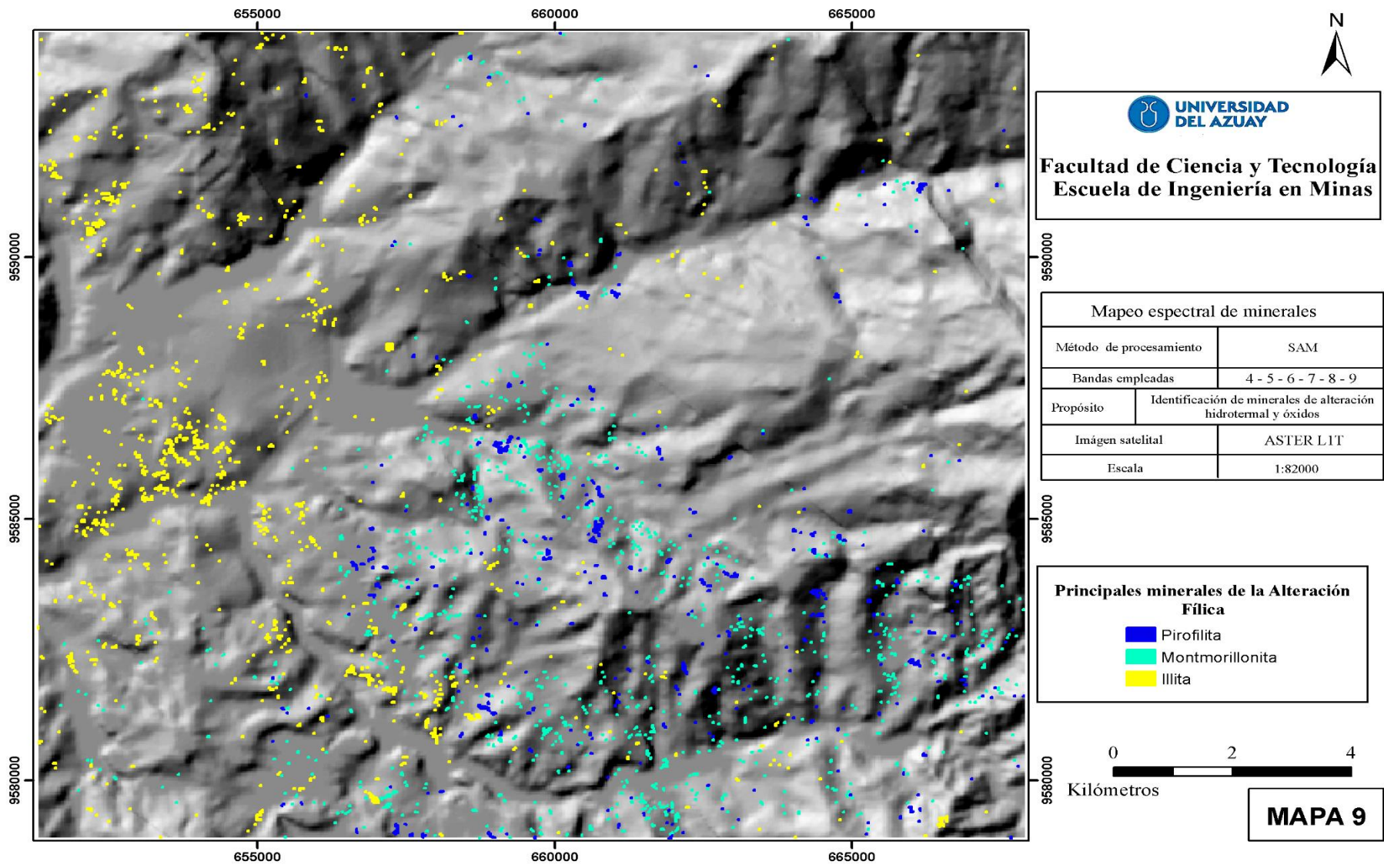
## **Anexo E**

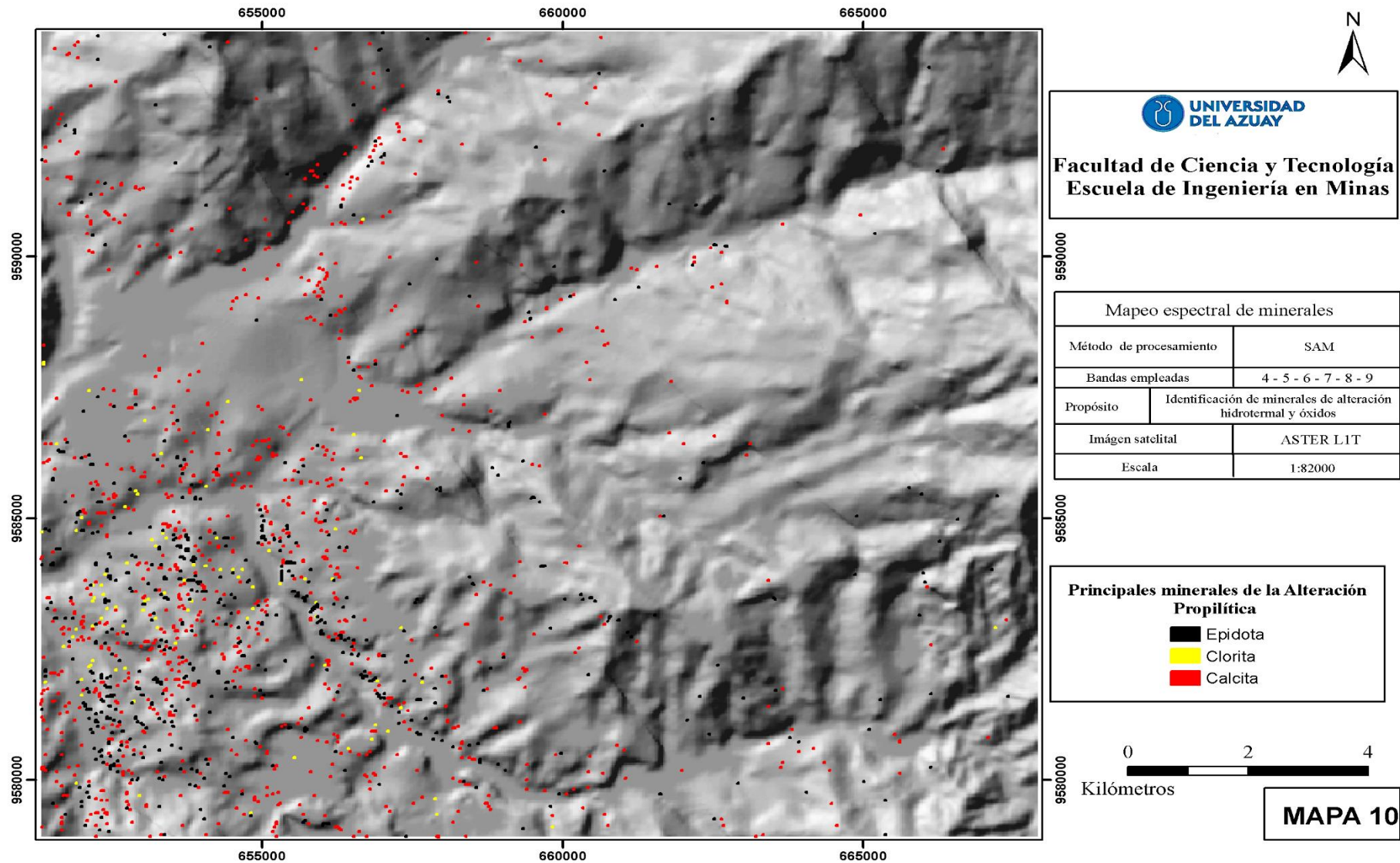
# **Mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos**



**MAPA 8**

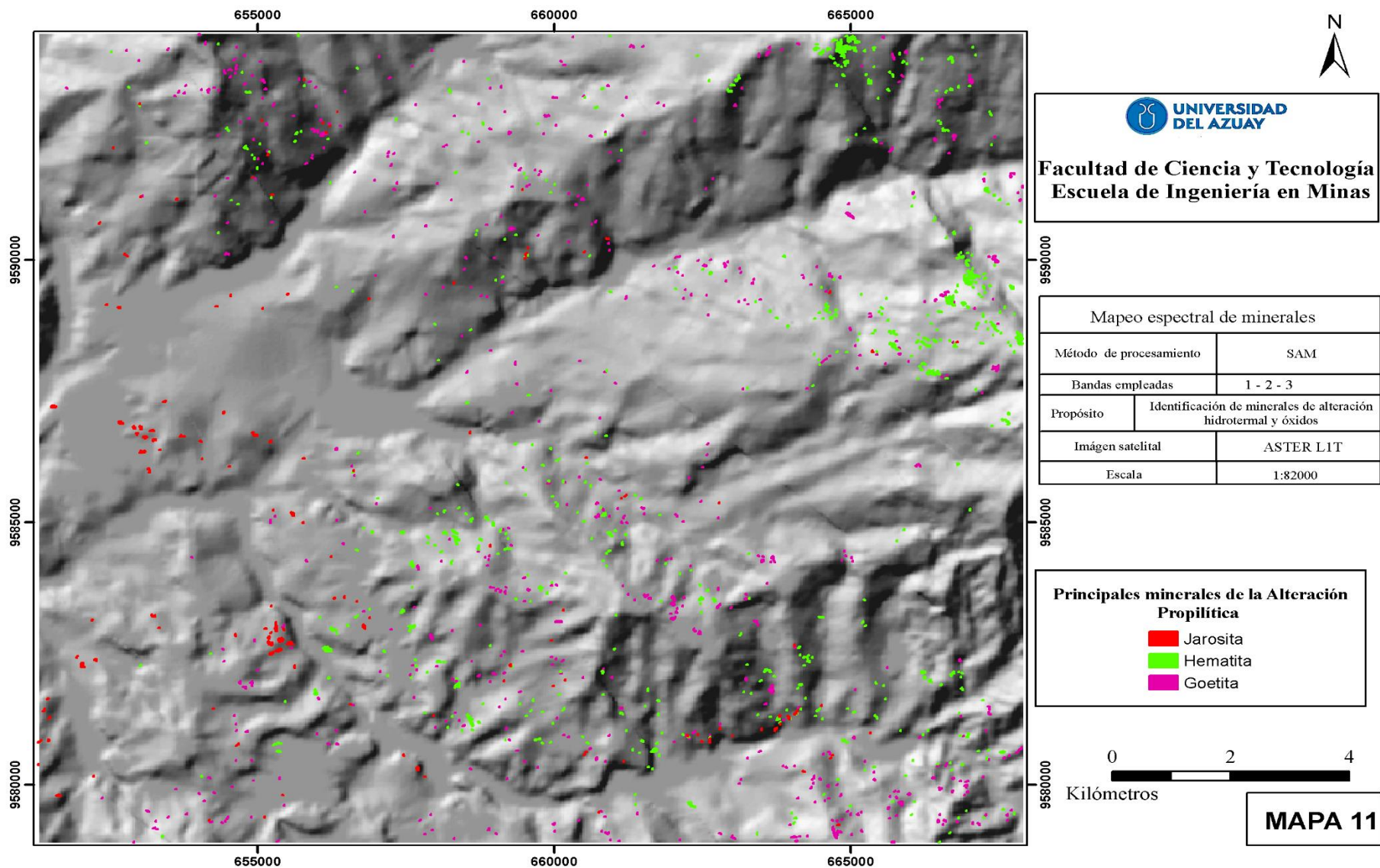






**MAPA 10**



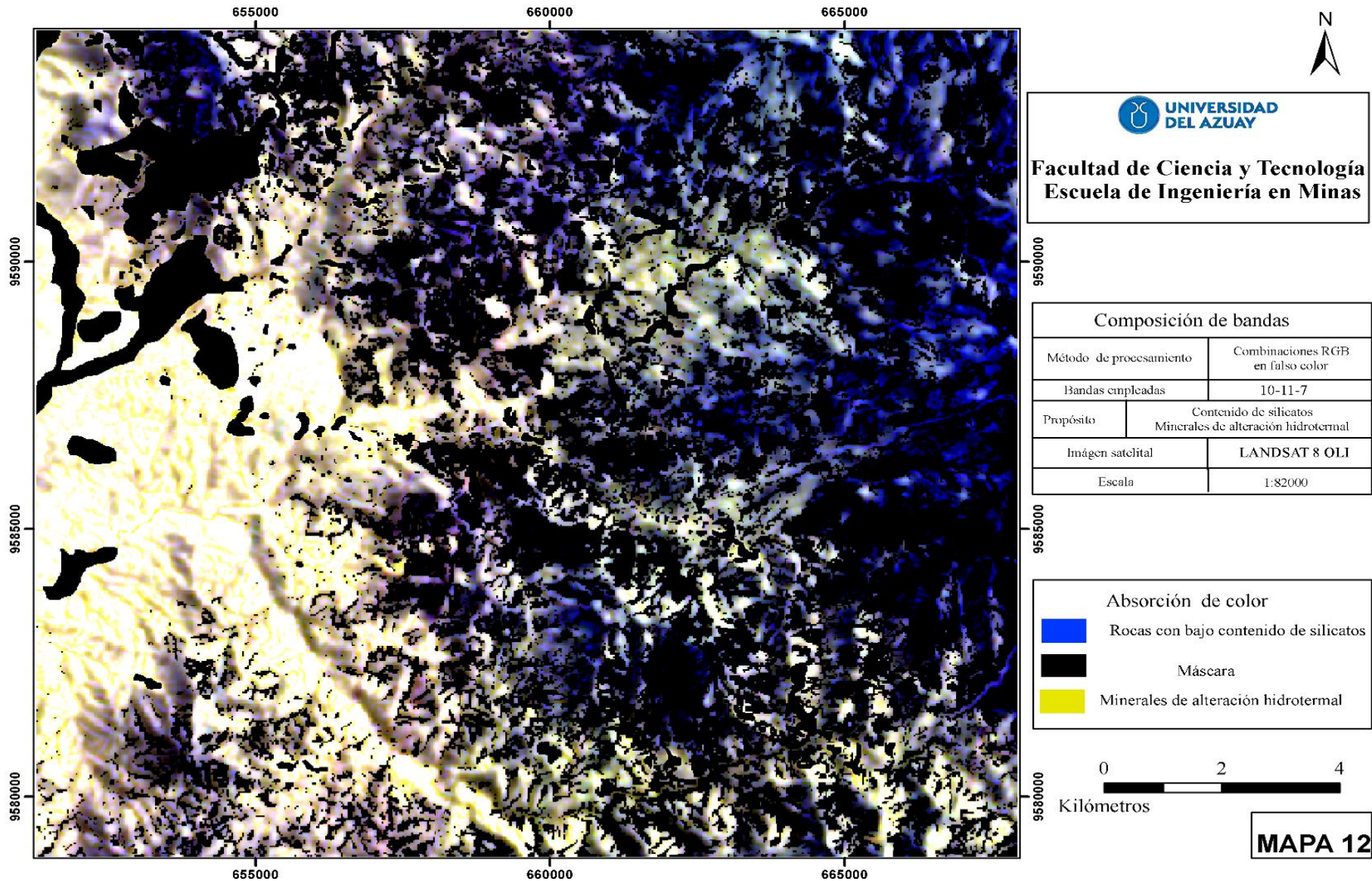


# **LANDSAT 8 OLI**



# **Anexo F**

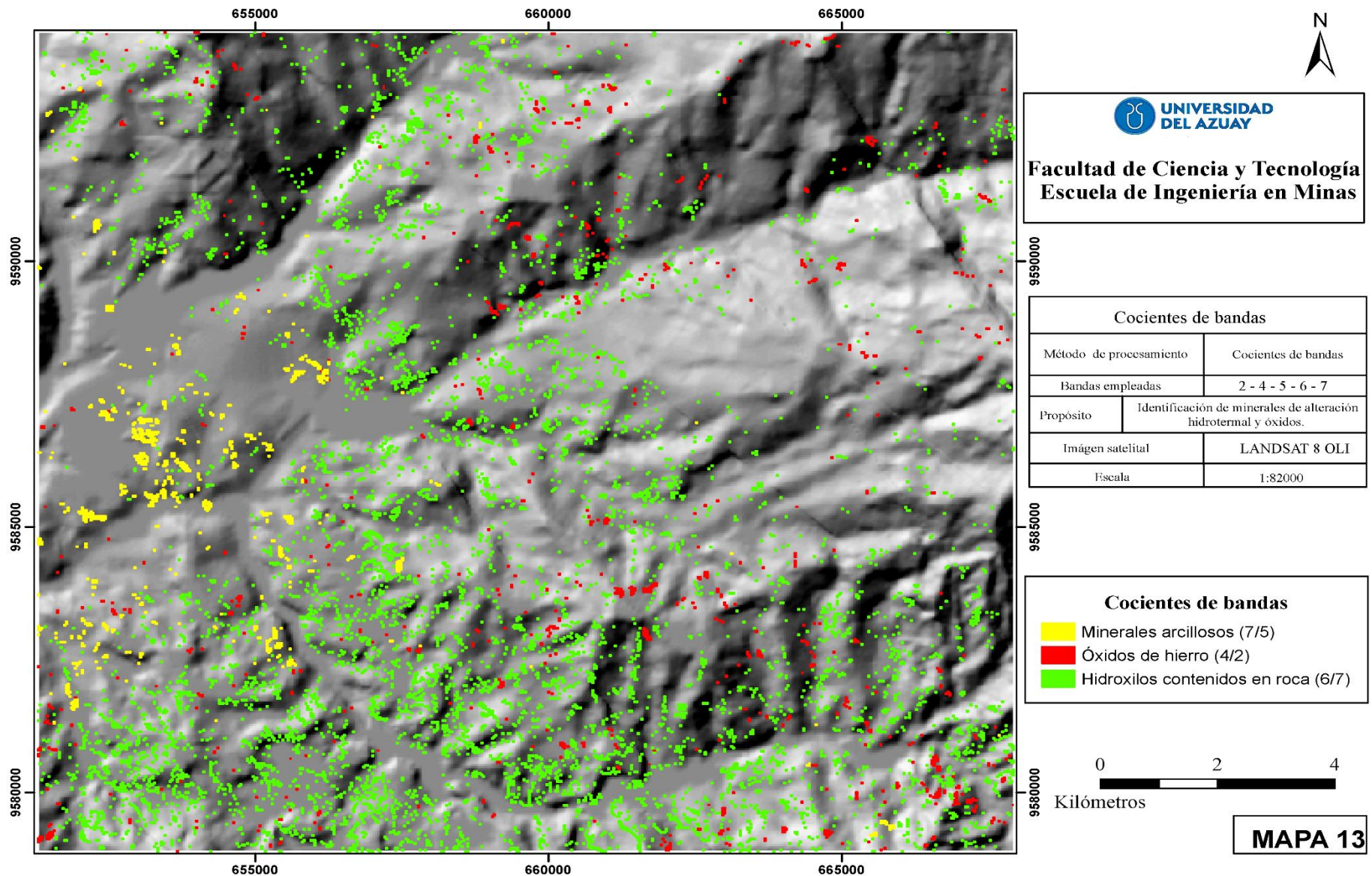
## **Composiciones RGB**



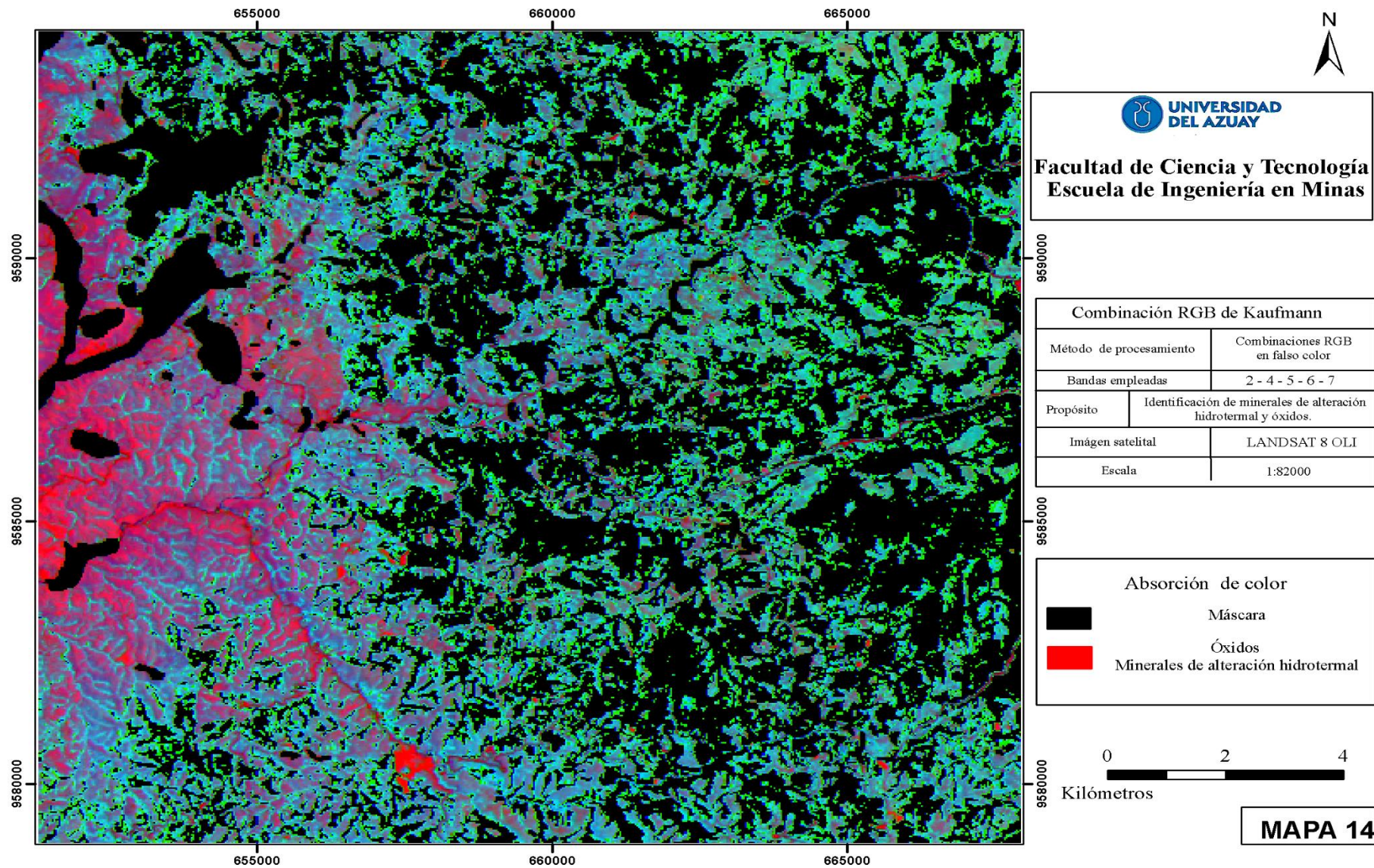
# **Anexo G**

## **Cocientes de bandas**



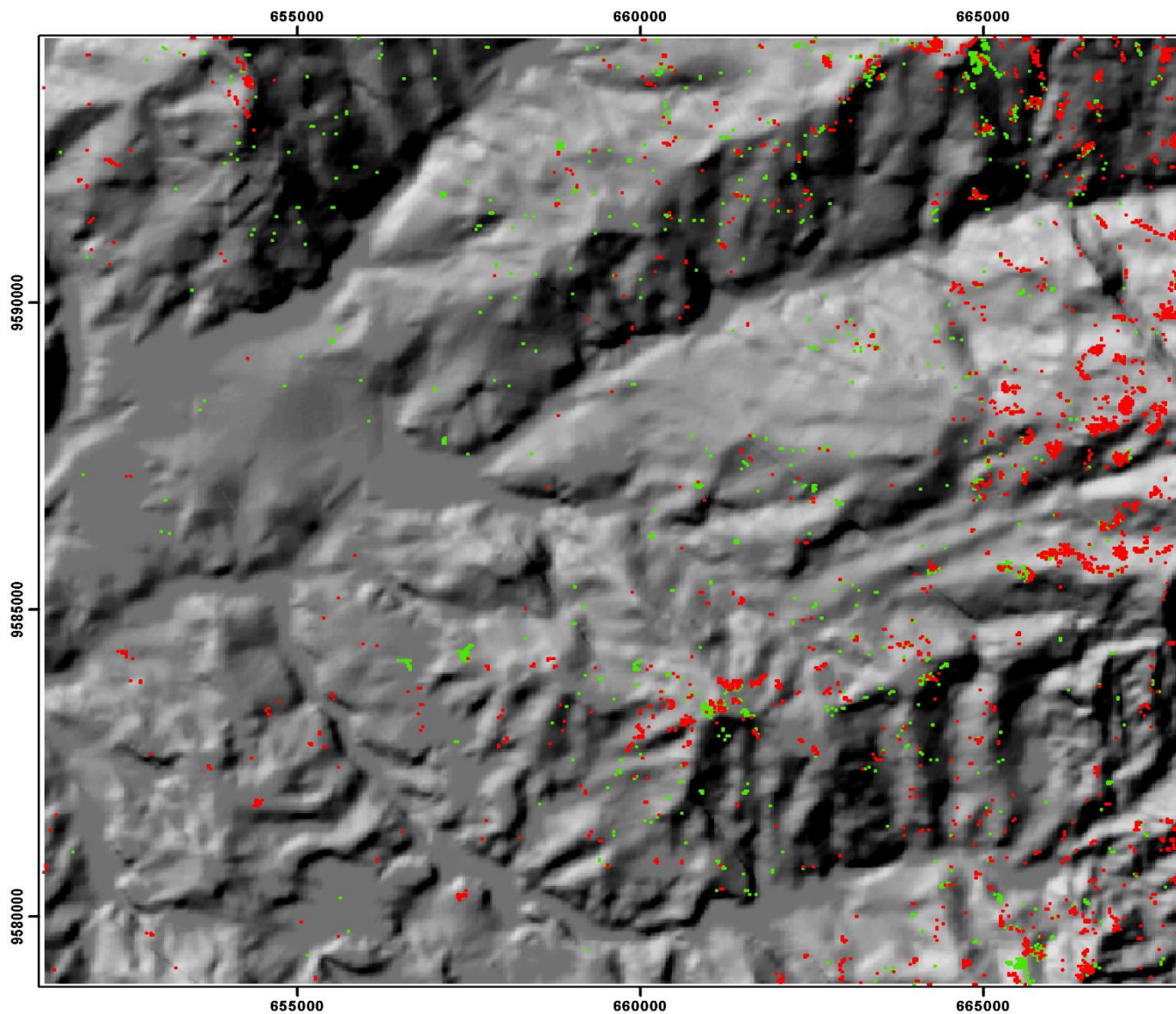






**Anexo H**  
**Componentes principales para identificación de los tipos de  
alteración hidrotermal**





UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY

Facultad de Ciencia y Tecnología  
Escuela de Ingeniería en Minas

Componentes Principales	
Método de procesamiento	Análisis de Componentes Principales
Bandas empleadas	2 - 4 - 5 - 6 - 7
Propósito	Identificación de Hidroxilos, Óxidos
Imagen satelital	LANDSAT 8 OLI
Escala	1:82000

**Componentes Principales**

- Óxidos (-PC4)
- Hidroxilos (-PC4)

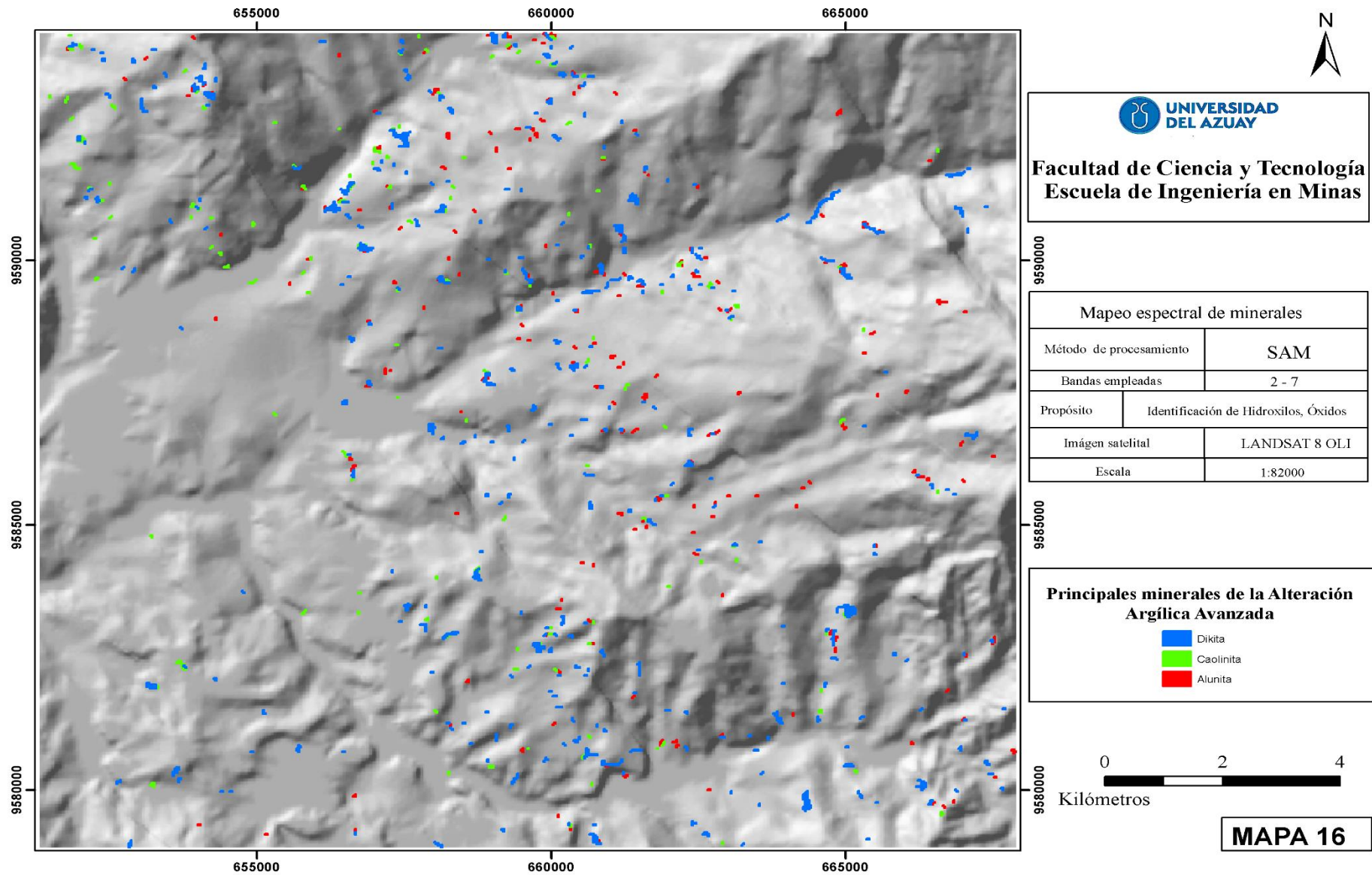


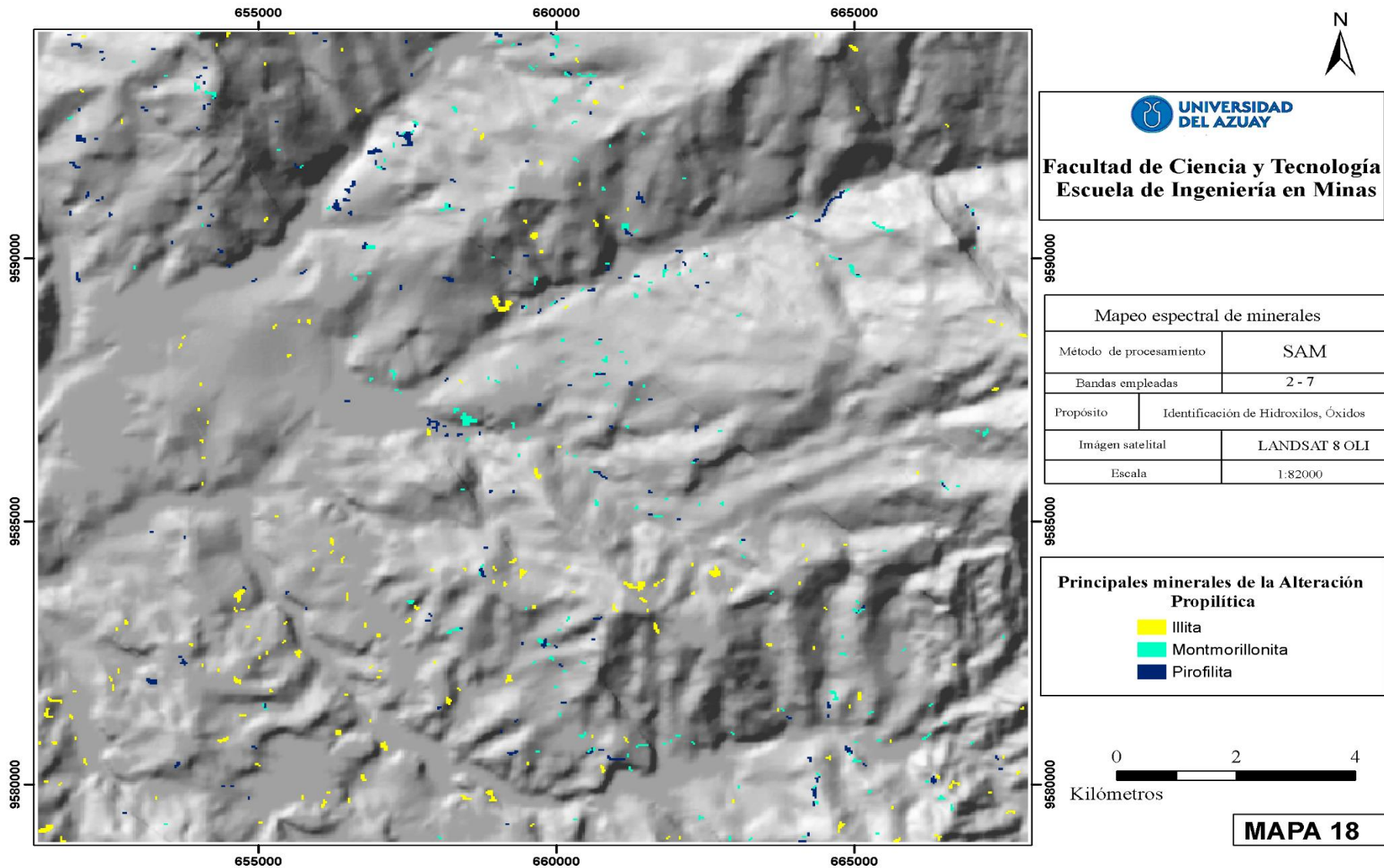
**MAPA 15**

## **Anexo I**

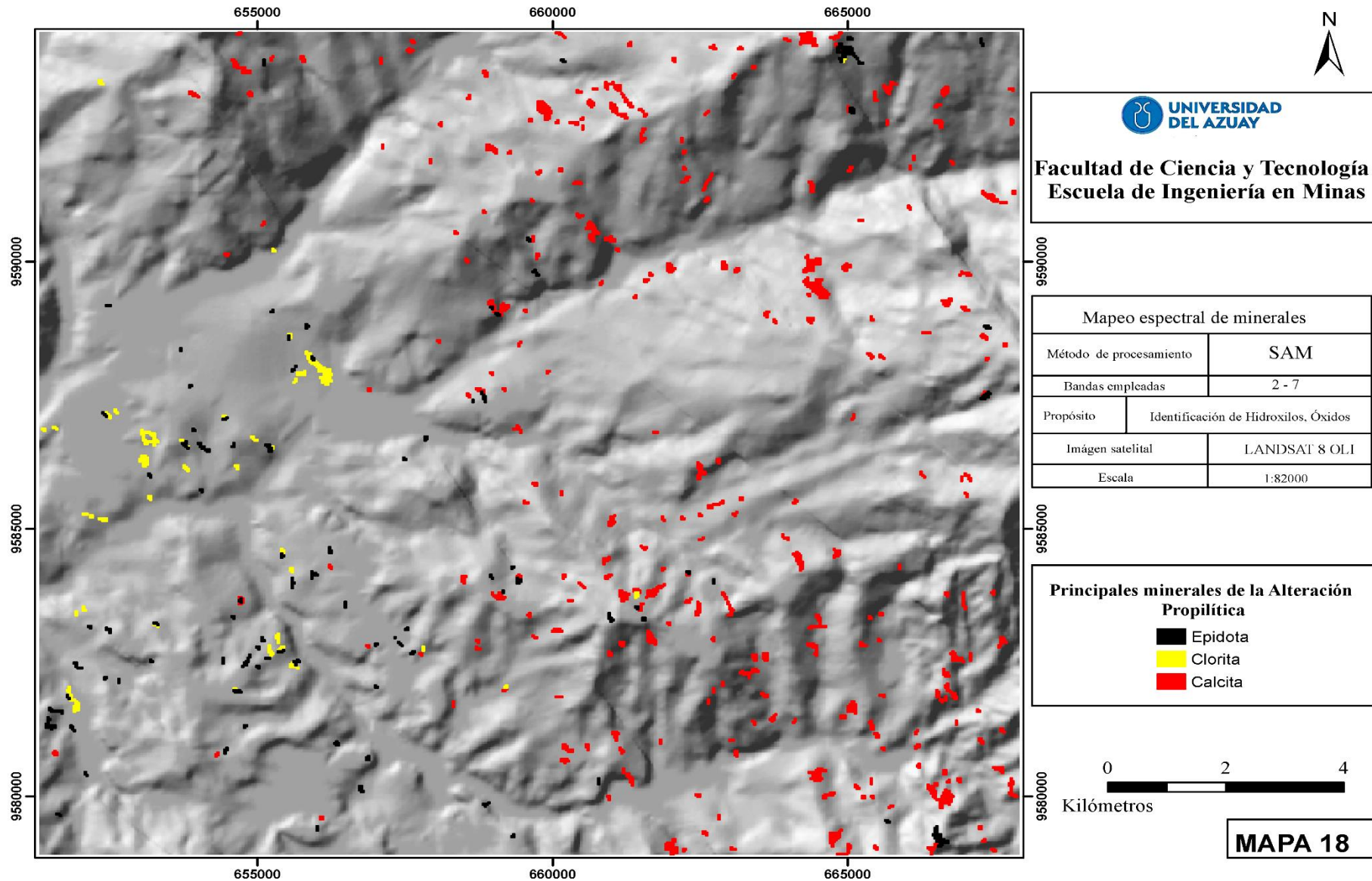
# **Mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos**



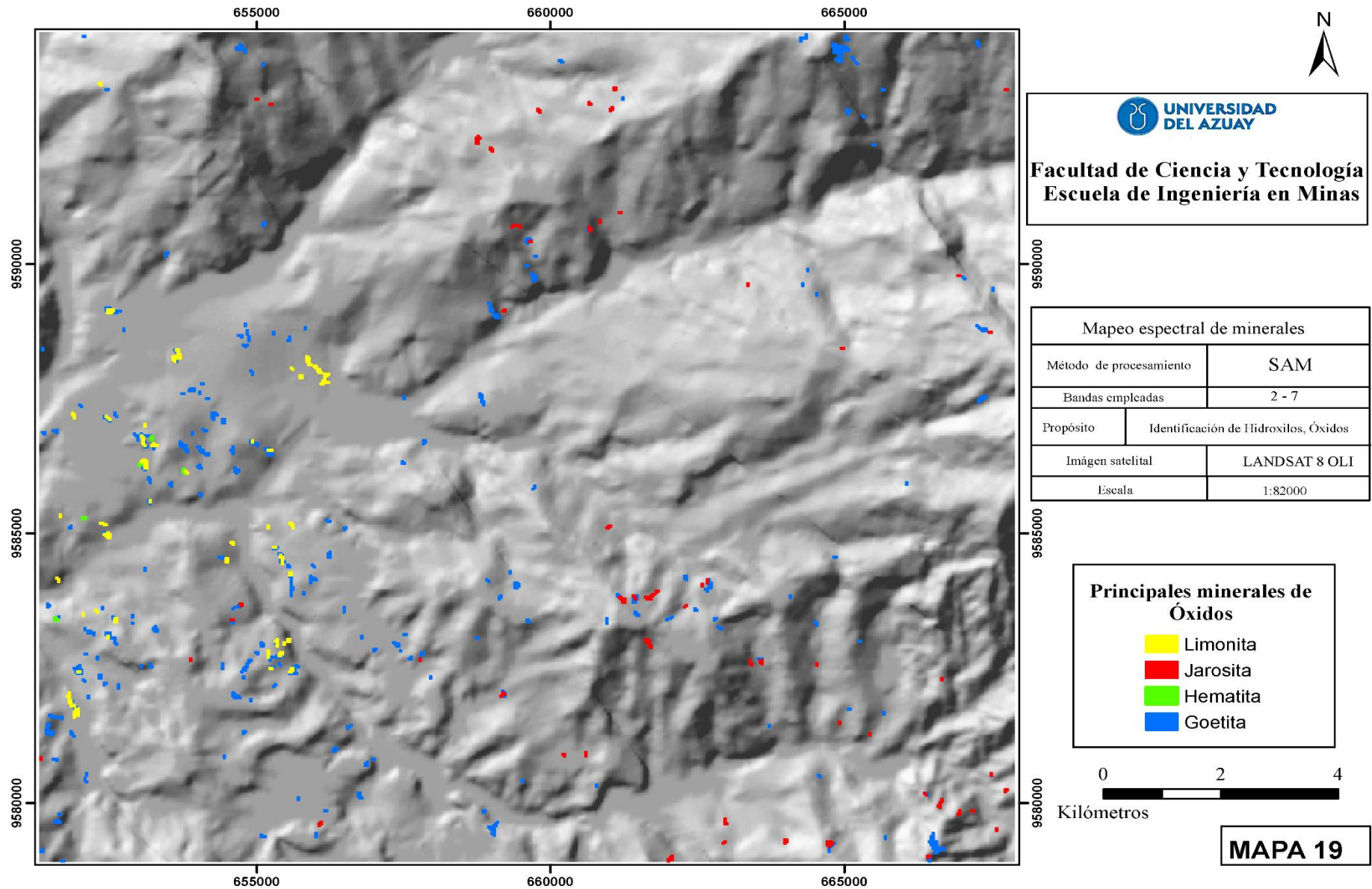








**MAPA 18**

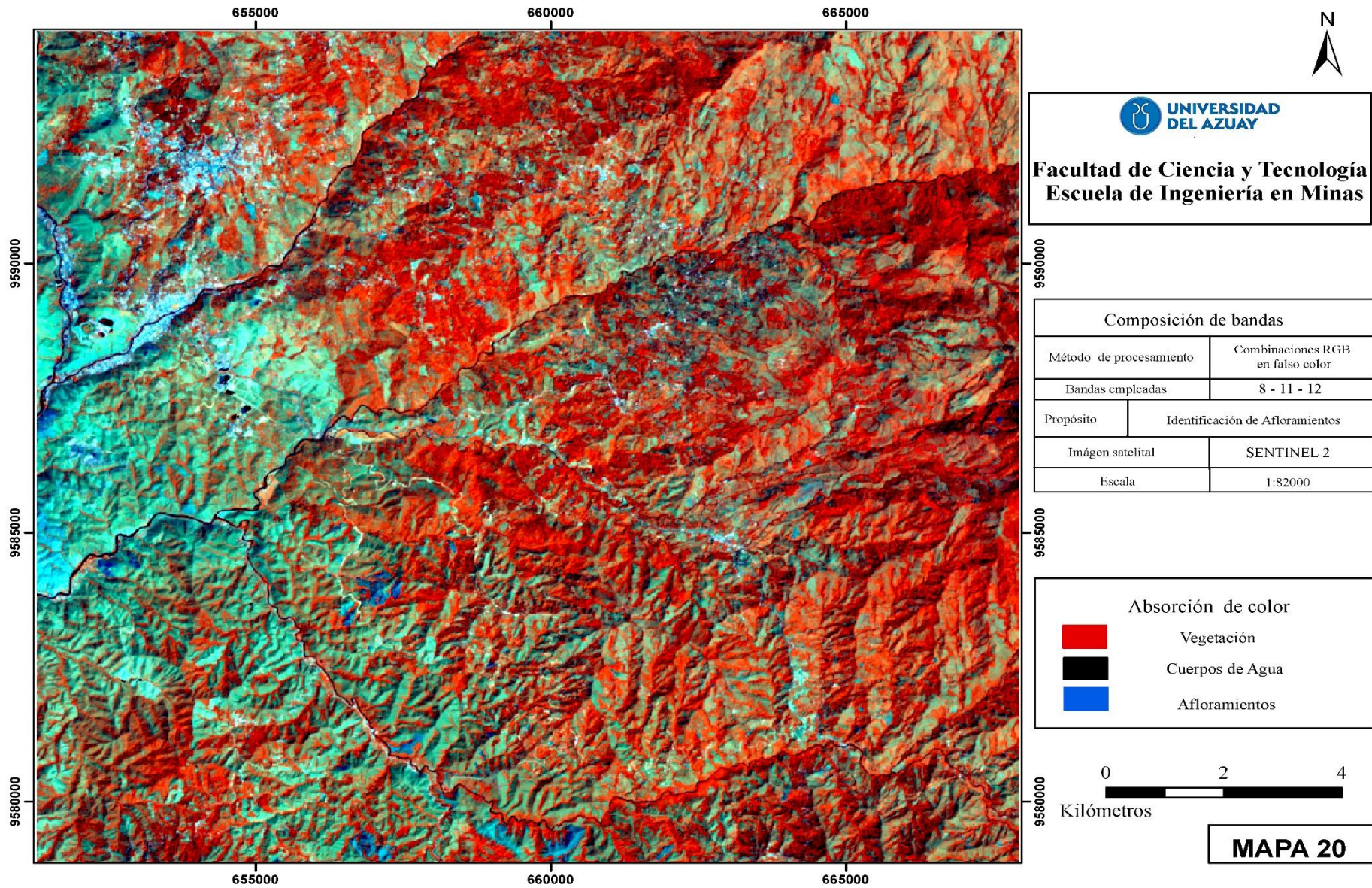


## **SENTINEL 2**

# **Anexo J**

## **Composiciones RGB**

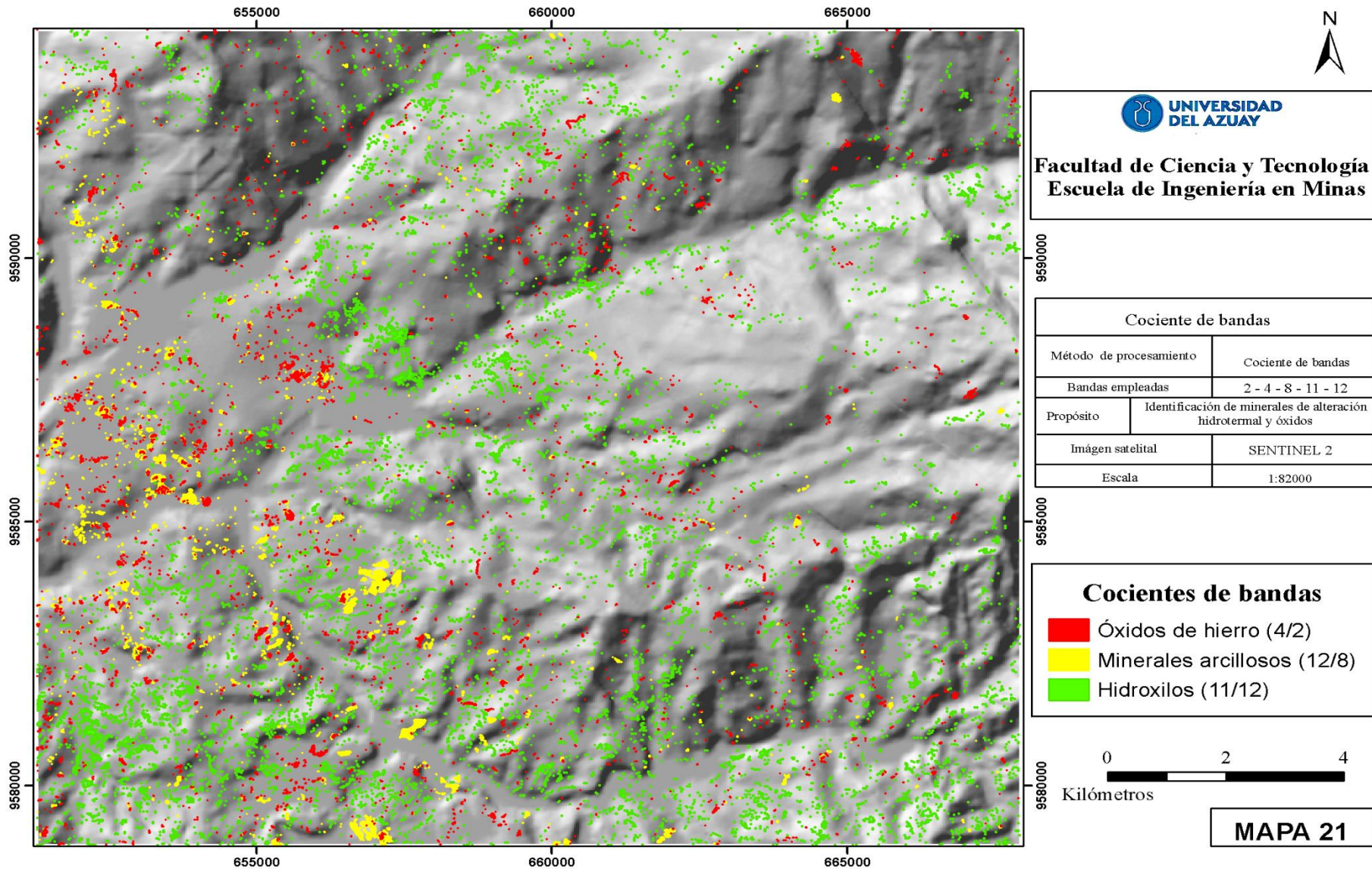






# **Anexo K**

## **Cocientes de bandas**

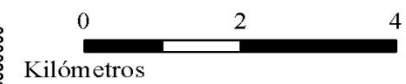


**Facultad de Ciencia y Tecnología**  
**Escuela de Ingeniería en Minas**

Cociente de bandas	
Método de procesamiento	Cociente de bandas
Bandas empleadas	2 - 4 - 8 - 11 - 12
Propósito	Identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos
Imagen satelital	SENTINEL 2
Escala	1:82000

**Cocientes de bandas**

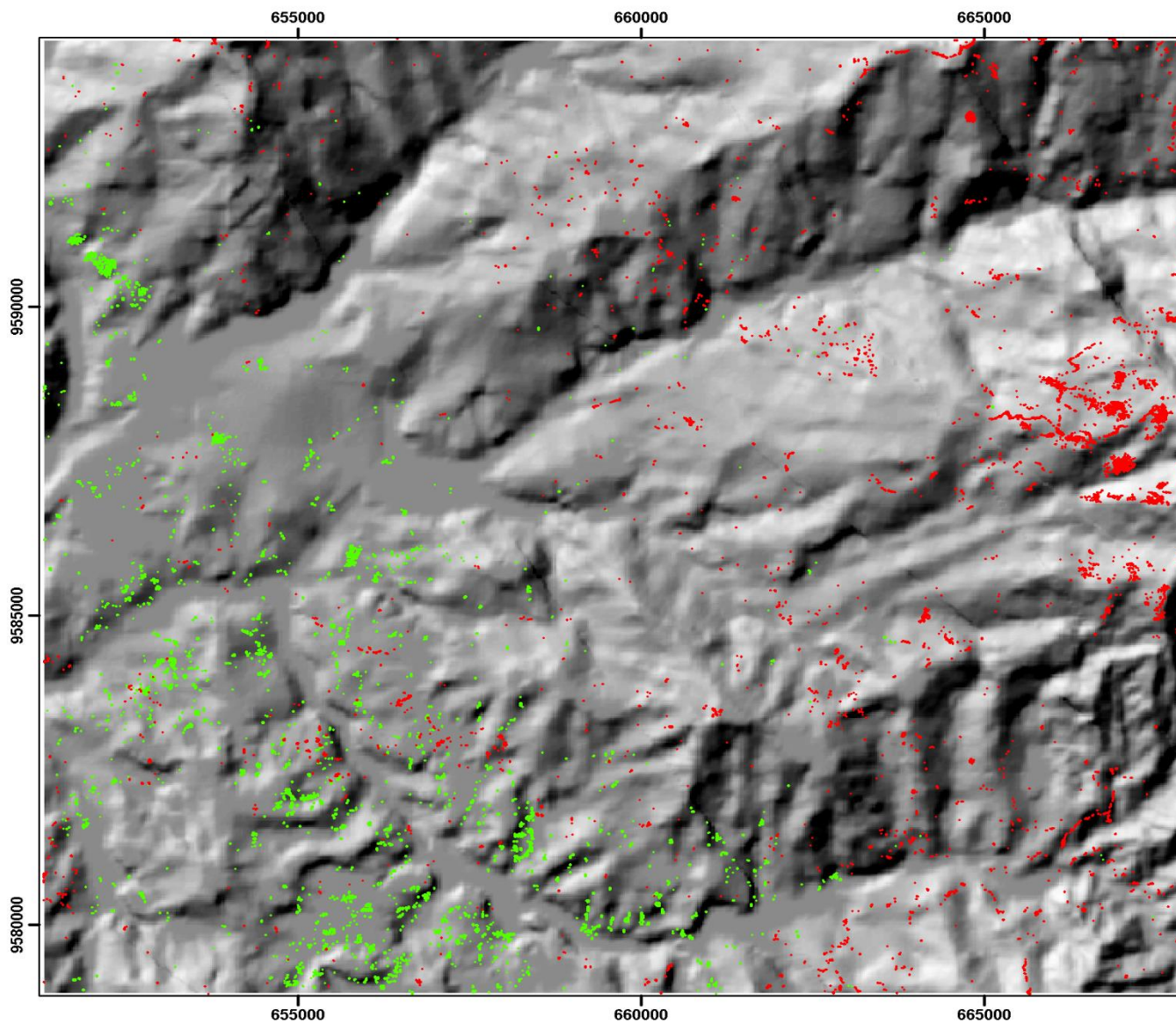
- Óxidos de hierro (4/2)
- Minerales arcillosos (12/8)
- Hidroxilos (11/12)



**MAPA 21**

**Anexo L**  
**Componentes principales para identificación de alteración  
hidrotermal y óxidos**





**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

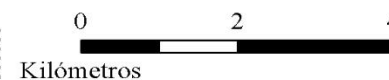
**Facultad de Ciencia y Tecnología  
Escuela de Ingeniería en Minas**

**Componentes Principales**

Método de procesamiento	Análisis de Componentes Principales
Bandas empleadas	2 - 4 - 8A - 11 - 12
Propósito	Identificación de Hidroxilos, Óxidos
Imagen satelital	SENTINEL 2
Escala	1:82000

**Componentes Principales**

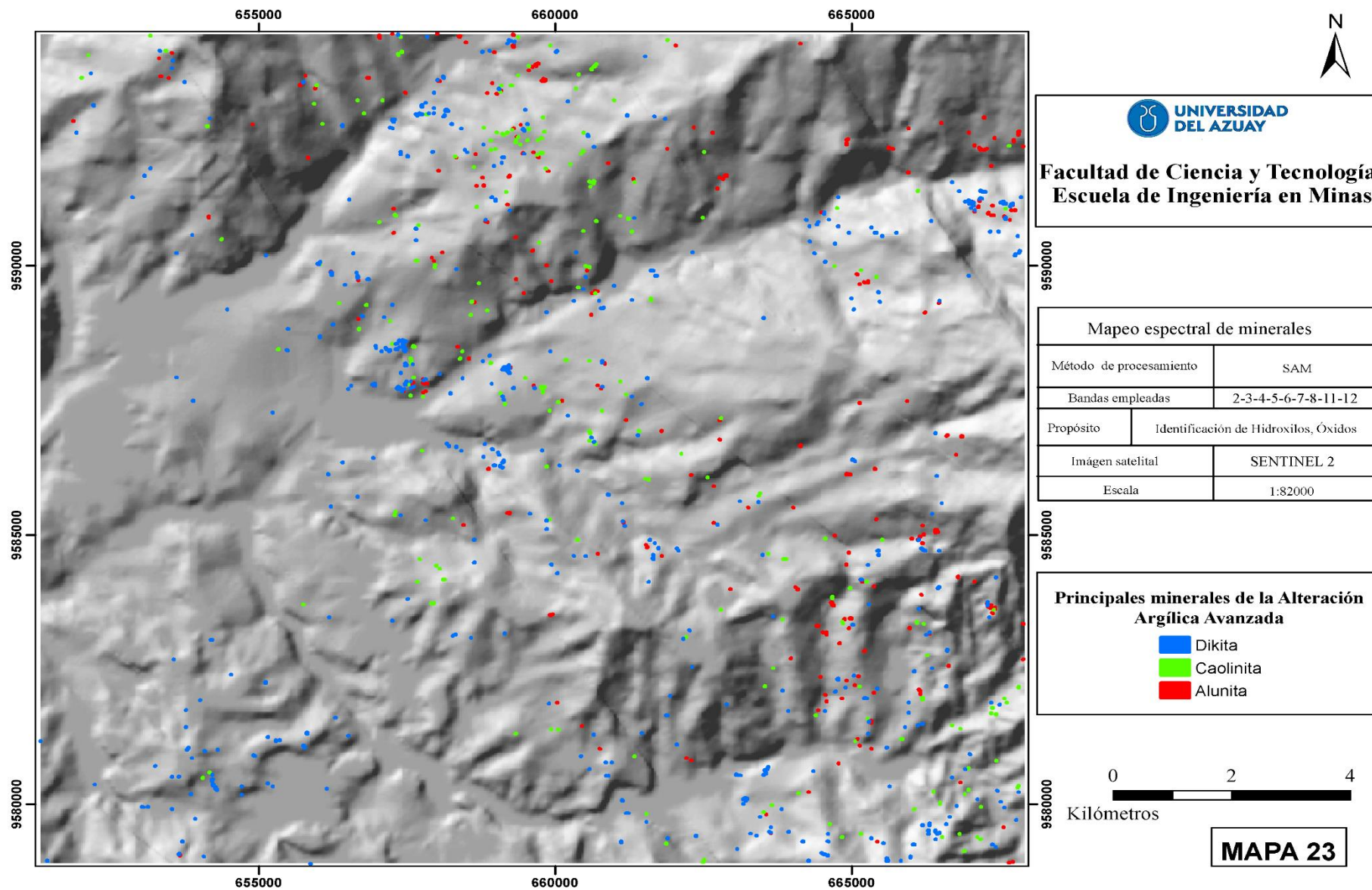
- Óxidos (-PC4)
- Hidroxilos (-PC4)



**MAPA 22**

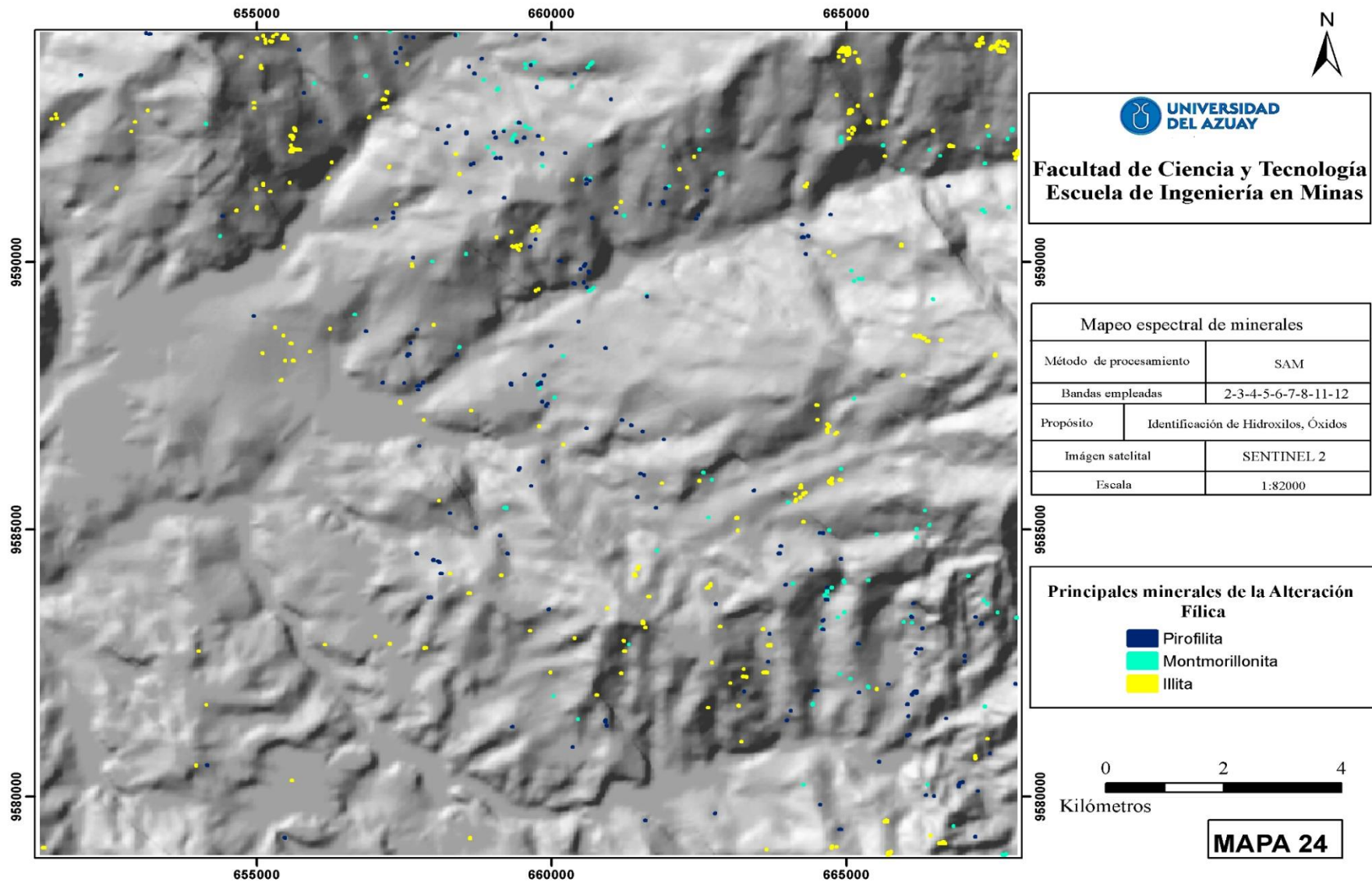
## **Anexo M**

# **Mapeo espectral SAM para identificación de minerales de alteración hidrotermal y óxidos**



**MAPA 23**





**MAPA 24**



