



UNIVERSIDAD  
PRIVADA  
DEL NORTE

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA Y POSIBILIDAD DE DRENAJE  
ÁCIDO DE ROCA EN EL DISTRITO DE SAN  
BERNARDINO”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Bach. Francisco Demetrio Inga Paredes

Bach. Luis Humberto Ortega Mestanza

Asesor:

Ing. Elmer Ovidio Luque Luque

Cajamarca - Perú

2020

## DEDICATORIA

*A mis queridos padres, por alentarme a seguir estudiando, por sus oraciones sus oraciones y preocupación permanente por apoyarme y estar pendientes de mi vida.*

*A mi esposa y a mis hijos por su perseverancia y exigencia de culminar la presente tarea académica: que motivan mis deseos de superación constante y a quienes los tengo en mi corazón todos los días de mi vida.*

Francisco Demetrio Inga Paredes

*A mi amada esposa, a mis queridos padres, a mis hijos y nietos, por brindarme su amor incondicional durante todos los momentos de mi vida, y su apoyo para lograr todas mis metas.*

Luis Humberto Ortega Mestanza

## AGRADECIMIENTO

*Al mejor consejero de mi vida: A DIOS, A la Facultad de Ingeniería de Minas, de la Universidad Privada del Norte, por permitirme realizar los estudios en la Escuela de Ingeniería de Minas.*

*A mis compañeros de la facultad y a mis compañeros de trabajo por su apoyo constante, durante el tiempo que desarrolle la carrera*

Francisco Demetrio Inga Paredes

*Agradezco a mi familia, por su apoyo desinteresado, su cariño, comprensión y, sobre todo, por la motivación que me dieron a lo largo de mi carrera que permitió desarrollarme personal y profesionalmente.*

Luis Humberto Ortega Mestanza

## TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO .....	3
TABLA DE CONTENIDOS .....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
RESUMEN .....	9
ABSTRACT .....	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Realidad problemática .....	11
1.2. Formulación del problema.....	17
1.3. Objetivos.....	17
1.4. Hipótesis .....	18
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....	18
2.1. Tipo de investigación.....	19
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos).....	19
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos .....	20
2.4. Procedimiento.....	26
CAPÍTULO III. RESULTADOS .....	34
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	57
4.1. Discusión .....	63

4.2. Conclusiones.....	69
REFERENCIAS .....	70
ANEXOS .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Coordenadas que enmarcan la zona de estudio.....	28
Tabla 2 Ficha técnica de la imagen Áster que contiene la zona de estudio.....	30
Tabla 3 Coeficientes de conversión de unidades (UCC, por sus siglas en inglés) para las bandas 1, 2, 3N y 3B del Sensor Aster.....	31
Tabla 4 Minerales del Hierro.....	32
Tabla 5 Minerales del Cobre.....	33
Tabla 6 Minerales del Plomo, Molibdeno, Antimonio.....	34
Tabla 7 Minerales de mercurio.....	35
Tabla 8 Minerales del Zinc.....	36
Tabla 9 Puntos característicos de absorción y reflectancia de la calcopirita.....	49
Tabla 10 Puntos característicos de absorción y reflectancia del cinabrio.....	51
Tabla 11 Puntos característicos de absorción y reflectancia de esfalerita tipo 1.....	53
Tabla 12 Puntos característicos de absorción y reflectancia de esfalerita tipo 2.....	54
Tabla 13 Puntos característicos de absorción y reflectancia de la pirita.....	56
Tabla 14 Residuo y labor minera en el distrito de San Bernardino.....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Ubicación de la zona de estudio. ....	27
Figura N° 3: Imagen Aster para la zona de estudio en color real. ....	29
Figura N° 4. Variograma de certeza para enmascaramiento de agua. ....	38
Figura N° 5. Mascara de agua de la zona de estudio – certeza 99 %. ....	39
Figura N° 6. Variograma de certeza para enmascaramiento de vegetación. ....	41
Figura N° 7. Mascara de vegetación de la zona de estudio – certeza 95 %. ....	42
Figura N° 8. Unión de mascara de agua y vegetación de la zona de estudio. ....	43
Figura N° 9. Aplicación de mascara de agua y vegetación en la imagen ASTER de la zona de estudio. ....	44
Figura N° 10. Firmas espectrales seleccionadas de la USGS, 2019. ....	45
Figura N° 11. Firmas espectrales seleccionadas de la JLP. ....	46
Figura N° 12. Firma espectral de calcopirita con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019). ....	48
Figura N° 13. Comparación espectral de la calcopirita. ....	49
Figura N° 14. Firma espectral de cinabrio con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019). ....	50
Figura N° 15. Comparación espectral del cinabrio. ....	51
Figura N° 16. Firma espectral de esfalerita tipo 1 con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019). ....	52
Figura N° 17. Comparación espectral de la esfalerita tipo 1. ....	53
Figura N° 18. Comparación espectral de la esfalerita tipo 2. ....	54
Figura N° 19. Firma espectral de pirita con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019). ....	55
Figura N° 20. Comparación espectral de la pirita. ....	56

Figura N° 21. Representación espacial de calcopirita en la zona de estudio.....	57
Figura N° 22. Representación espacial de esfalerita tipo 2 en la zona de estudio.....	58
Figura N° 23. Representación espacial de calcopirita en la zona de estudio.....	59
Figura N° 24. Representación espacial de pirita en la zona de estudio.....	60
Figura N° 25. Representación espacial del cinabrio en la zona de estudio. ....	61
Figura N° 26. Concentración de minerales acidogénicos en la zona de estudio. ....	62
Figura N° 27. Concentración de minerales y zonas con presencia de labores mineras..	66
Figura N° 28. Concentración de minerales y zonas de relave y desmonte.....	67



## RESUMEN

La presente investigación tiene como finalidad el análisis de los drenajes ácidos de roca (DAR) los cuales son uno de los grandes problemas que enfrenta hoy la industria minera, este problema es producto de la oxidación de minerales sulfurosos, proceso que ocurre tras el cierre y abandono de las minas; la investigación tiene como objetivo general caracterizar mineralógicamente zonas que generen drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino mediante percepción remota, usando un método aplicado tecnológica de diseño no experimental de carácter correlacional – causal

El área donde se realizó las actividades se ubica en el Distrito de San Bernardino que es uno de los cuatro que conforman la Provincia de San Pablo, ubicada en el Departamento de Cajamarca.

Para realizar el estudio se tuvo en cuenta el análisis de espectros de minerales acidogénicos teniendo como procedimiento: descarga, corrección, enmascaramiento, creación de base de datos espectrales y análisis espectral.

Se tuvo como resultado la caracterización mineral de minerales de sulfuros la cual fue esencial para definir zonas que generará drenaje ácido, con minerales como pirita, calcopirita, esfalerita y cinabrio. Concluyéndose que a partir de la caracterización mineralógica mediante percepción remota y el uso de espectros de minerales sulfurosos es posible determinar zonas con posibilidad de drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino.

**Palabras clave:** Acidogénico, sulfuros, espectro, reflectividad, residuo minero

## ABSTRACT

The purpose of this research is the analysis of acid rock drains (DAR) which are one of the major problems facing the mining industry today, this problem is a product of the oxidation of sulphurous minerals, a process that occurs after the closure and abandonment of the mines; The general objective of the research is to mineralogically characterize areas that generate acid rock drainage in the San Bernardino district through remote sensing, using a technological applied method of non-experimental design of a correlational - causal nature.

The area where the activities took place is located in the District of San Bernardino, which is one of the four that make up the Province of San Pablo, located in the Department of Cajamarca.

To carry out the study, the analysis of spectra of acidogenic minerals was taken into account, with the following procedure: discharge, correction, masking, creation of a spectral database and spectral analysis.

The result was the mineral characterization of sulfide minerals which was essential to define areas that will generate acid drainage, with minerals such as pyrite, chalcopyrite, sphalerite and cinnabar. Concluding that from the mineralogical characterization through remote sensing and the use of sulphurous mineral spectra it is possible to determine areas with the possibility of acid rock drainage in the San Bernardino district.

**Keywords:** Acidogenic, sulfides, spectrum, reflectivity, mining residue

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

Los drenajes ácidos de roca (DAR) son uno de los grandes problemas que enfrenta hoy la industria minera, este problema es producto de la oxidación de minerales sulfurosos, proceso que ocurre tras el cierre y abandono de las minas. (Dold, 2010).

La problemática del DAR ha suscitado en el mundo importantes investigaciones en torno a su identificación y análisis, uno de estos avances está relacionado al uso de sensores remotos que mediante la reflectancia espectral y el apoyo de muestreos de aguas permite identificar de manera puntual zonas de afectación a detalle, este método es uno de los más usados en países como Estados Unidos, Rusia y España por su rápida identificación, menor costo y gran amplitud de aplicación. (Montoya, 2015)

En el Perú aún se presentan zonas mineras que evidencian un cierre de minas deteriorado o simplemente que no se realizó, producto de trabajos mineros, y en lo general por trabajos de minería informal; dejando en superficie minerales que generan acidez, los cuales son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación, generalmente proceden de labores mineras inactivas y activas, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y escombreras de mina. (Castrejón y Diaz 2018)

Es conveniente determinar que la verdadera dimensión del impacto minero de estos minerales es la generación de drenajes ácidos, que se convierten en una amenaza sobre todo en áreas próximas a cuencas hidrográficas y áreas agropecuarias aguas debajo de la exposición mineral. (Montoya, 2015)

En el distrito de San Bernardino las exposiciones de labores mineras abandonadas, así como afloramientos de estructuras mineralizadas en superficie, causan

preocupación en las poblaciones del entorno, más aún cuando éstas se ubican en zonas que marcan épocas de precipitaciones pluviales intensas como es la sierra peruana, periodos de vientos incidentes, y en áreas aguas abajo en zonas agropecuarias.

Es por ello que la presente investigación titulada “Caracterización mineralógica mediante percepción remota y posibilidad de drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino” busca determinar cuáles son las zonas en las cuales se encuentra la exposición de mineral producto de trabajos mineros que puedan generar o generen drenaje ácido de roca.

En la investigación se utilizará métodos espectrales mediante el uso de sensores remotos para recolectar información de campo y procesarla, presentándose así planos temáticos que permitan la ubicación espacial de los focos mineralizantes que generen drenaje ácido de roca, posteriormente corroborar en campo la veracidad de este método.

La investigación está basada en antecedentes internacionales, nacionales y locales en los cuales se trabajó este método como son:

Vilca, (2014), en su estudio realizado en Puno acerca de la caracterización mineralógica, geoquímica y posibilidad de drenaje ácido de roca, realizó la investigación de la mineralogía, expuesta al ambiente, en labor minera abandonada, considerada como pasivo ambiental minero, convirtiéndose en la preocupación de los habitantes aledaños a la zona, en la cual aplico una metodología analítica, experimental y descriptiva, teniendo como resultado bajo potencial ácido (PA) (0,31), alto potencial neutro (PN) (18,13), indica azufre como sulfuro bajo en relación a carbonatos existentes, ayudando la neutralización del contenido ácido en drenaje. Se establece que no es generador de ácido ( $PN/PA = 58,48$ ) relación de

potencial neutro respecto a potencial de acidez mayor a 3; existe incertidumbre de generar ácido (PNN = 17,82) por valor del potencial neto de neutralización mayor a -20 y menor a +20. El pasivo ambiental, en las actuales condiciones de exposición es de bajo riesgo, no es una amenaza al medio ambiente que lo rodea. De existir interés económico, se recomienda efectuar pruebas cinéticas, para determinar el comportamiento geoquímico del material a través del tiempo.

Díaz y Castrejón, (2018), realizó un estudio sobre minerales generadores de acidez y metales pesados en el distrito de Bambamarca, cuyo objetivo fue detectar la ubicación de minerales generadores de acidez y metales pesados mediante el análisis multiespectral de imágenes satelitales, llegando a la conclusión que es posible ubicar zonas con presencia de residuos ácidos y residuos con metales pesados mediante el uso de técnicas de análisis multiespectral, identificar las zonas con residuos contaminantes al Nor – Oeste del distrito de Bambamarca.

Rejas, (2014). Menciona que la espectrometría de una imagen o percepción remota explora el hecho de que todos los materiales reflejan, absorben y emiten energía electromagnética, con longitudes de onda específicas, en patrones distintivos relacionados con su composición molecular (Manolakis and Shaw, 2002). Esta técnica proporciona información relacionada con las características superficiales de los materiales que pueden ser exploradas sin tener contacto con la misma para permitir una detección automatizada de objetos de interés, en una gran variedad de aplicaciones.

La percepción remota combina dos modalidades ampliamente utilizadas en proyectos de investigación por científicos e ingenieros: imagen pancromática y espectrometría de imagen. Un sistema pancromático captura la imagen de una escena remotamente en base a la distribución espacial de la irradiancia de la radiación

electromagnética emitida y/o reflejada integrada en alguna banda espectral, típicamente en el espectro visible. Por otro lado, la espectrometría mide la variación en irradiancia en una dimensión espectral (o longitud de onda), que captura información relacionada con la composición química del material en el ángulo de visión, o Field of View (FOV) del instrumento (Rejas, 2014).

Un sensor es un dispositivo capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, y transformarlas en variables eléctricas. Es decir, dispositivos capaces de detectar radiancia de la superficie como magnitud física fundamental, para transformarla en valores numéricos (Rejas, 2014).

Los espectros de reflectancia han sido usados durante muchos años para obtener informaciones composicionales de la superficie de la tierra y de otros planetas. La reflectancia espectral en el visible e infrarrojo cercano ofrece una técnica rápida y de bajo coste para determinar la mineralogía (Rejas, 2014).

El proceso electrónico más común revelado en el espectro de minerales es el efecto de campo de cristal que es el resultado de capas de electrones de elementos de transmisión (ej., Fe, Cr, Co, Ni). Todos los elementos de transmisión tienen idénticas energías en un ion aislado, pero los niveles de energía se dividen cuando el átomo se encuentra en un campo de cristal. Esta división de los estados de energía orbitales permite a un electrón que se mueva de un nivel inferior a uno mayor mediante absorción de un fotón teniendo un emparejamiento de energía. Las bandas de absorción pueden ser también resultado de una transferencia de carga. Un ejemplo es la transferencia de carga de  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$ . Estas bandas de absorción son diagnóstico en mineralogía (Rejas, 2014).

Rejas (2014). Hace mención que la reflectancia de los espectros de minerales es bien conocida (Adams, 1975; Hunt, 1977; Clark et al., 1990; Grove et al., 1992) y

varios estudios han conducido a determinar los espectros de reflectancia de las rocas (Hunt and Salisbury, 1971; Hunt et al., 1971; 1973; 1974). Las características reflectivas de las rocas pueden ser simuladas con precisión mediante el estudio del efecto de la composición de la reflectancia de los minerales en un espectro mezcla formando la roca. Numerosos estudios (Grove et al., 1992; Clark et al., 1990) han permitido generar librerías de espectros de reflectancia de los minerales medidos por diferentes espectrorradiómetros con diferente resolución espectral.

Los minerales sulfurosos más comunes, considerados como fuente de drenaje ácido de mina (DAR), son los minerales de hierro, en forma especial, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$ ) y marcasita ( $\text{FeS}_2$ ). Dependiendo de la forma y de la estructura cristalina del mineral, como éste se presenta en el yacimiento, se observarán diferentes velocidades de oxidación. Por lo general, la marcasita, pirrotita y la pirita framboidal se oxidarán más rápidamente. Los cristales minerales con una superficie menor, como la pirita "euhedral" de grano grueso, se oxidan más lentamente (MEM-Perú, 1995).

Todo mineral sulfuroso tiene el potencial de oxidarse y lixiviar metales. Los minerales de metales bases, tales como calcopirita ( $\text{CuFeS}_4$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), pueden encontrarse asociados a cuerpos mineralizados en el Perú. La oxidación y lixiviación de los minerales, generalmente como resultado de la generación de ácido a partir de los minerales de sulfuro de hierro asociados, pueden dar como resultado la liberación de acidez y metales disueltos en el agua de drenaje (MEM-Perú, 1995).

El drenaje ácido de roca (DAR) es un serio problema ambiental en la actualidad sobre todo en sitios de minas inactivas y activas alrededor del mundo. Restos de roca conteniendo sulfuros, minerales como el sulfuro de hierro  $\text{FeS}_2$  (Pirita y

Marcasita) y Pirrotita (FeS); estos minerales al entrar en contacto con el agua y aire generan drenaje ácido de roca (Murray, 2006).

El término drenaje ácido de rocas (DAR) hace referencia a la acidificación de las aguas naturales como consecuencia de la descomposición de las rocas que contienen minerales metálicos ricos en azufre o sulfuros (p.ej., pirita, arsenopirita, marcasita, calcopirita, esfalerita y galena, entre otros). Estos minerales tienden a oxidarse al estar expuestos a los agentes naturales como el agua y el aire. Durante el proceso de oxidación del mineral, se libera azufre, el cual se combina con el agua y el oxígeno del aire para formar ácido sulfúrico. Al mismo tiempo, se liberan metales, los cuales pueden incorporarse al agua (Grandia et al., 2009 & Dold, 2010). Existen técnicas para determinar el potencial de generación de DAR en una zona antes de realizar destapes de la cobertura vegetal. Estas se basan en el potencial neto de generación de ácido a partir del porcentaje de minerales calcáreos y sulfuros en las rocas. Esto significa que, aunque es complicado, sí se puede predecir si un sitio afectado por alteración hidrotermal con presencia de sulfuros va a sufrir de DAR o no. Este tipo de estudios son muy frecuentes en sitios dedicados a la minería (MEM-Perú, 1995).



## **1.2. Formulación del problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Qué tipo de características mineralógicas que generen drenaje ácido de rocas se podrá determinar mediante percepción remota en el distrito de San Bernardino?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

¿Qué tipo de minerales pueden generar drenaje ácido en zonas de minería?

¿Dónde se encuentran los minerales generadores de drenaje ácido mediante percepción remota en el distrito de San Bernardino

¿Cuáles son las áreas donde exista posibilidad de generación de drenaje ácido de roca?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Caracterizar mineralógicamente zonas que generen drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino mediante percepción remota.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

Determinar qué tipo de minerales pueden generar drenaje ácido en zonas de minería inactiva.

Ubicar áreas donde se encuentran los minerales generadores de drenaje ácido mediante percepción remota en el distrito de San Bernardino

Determinar áreas donde exista posibilidad de generación de drenaje ácido de roca

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1. Hipótesis General**

Mediante la percepción remota se podrá caracterizar mineralógicamente zonas donde exista posibilidad de generación de drenaje ácido de roca.

### **1.4.2. Hipótesis Específica**

Los minerales que pueden generar drenaje ácido de roca en zonas de minería inactiva son los minerales sulfurosos.

Los minerales generadores de drenaje ácido de roca se ubicarán cerca de las zonas de minería inactiva

Se determinarán 2 zonas con posibilidad de generación de drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino.

## CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de investigación.

La presente investigación será de tipo aplicada tecnológica pues buscará brindar propuestas prácticas para implementar medidas contra la generación de drenaje ácido de roca usando tecnologías limpias de identificación mineral. (Hernández et al 2014)

De diseño no experimental - transversal ya que no se manipulará deliberadamente las variables, solo se observará el fenómeno de generación de drenaje ácido de roca en un momento único espacio temporalmente. (Hurtado, 2002)

De carácter correlacional – causal por la manipulación de las variables, pues se buscará determinar la relación entre minerales generadores de acidez y el drenaje ácido de roca. (Hernández et al 2014)

### 2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

#### 2.2.1. Población

La población de estudio corresponde a las firmas espectrales de los minerales en el distrito de San Bernardino

#### 2.2.2. Muestra

La muestra corresponde a las firmas espectrales de minerales generadores de acidez en el distrito de San Bernardino

#### 2.2.3. Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde al tamaño de pixel de los minerales.

## 2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

### 2.3.1. Mapeo Espectral mediante el método SAM (Spectral Angle Mapper)

La técnica SAM es un método de comparación automática entre los espectros de cada píxel de la escena y un conjunto de espectros de referencia (Kruse et al., 1993). Estos últimos pueden ser extraídos de una base de datos espectrales o pueden obtenerse con muestras de campo en un laboratorio. El algoritmo básico permite tratar los espectros como vectores en un espacio n-dimensional, en donde n es el número de bandas incluidas en la clasificación. Cada vector espectral tiene asociado una dirección y un módulo; éste último proporcional a la iluminación solar. La comparación se realiza en términos de la diferencia angular (llamado ángulo espectral) entre los vectores de la imagen y de referencia (Pérez et al., 2010). La diferencia angular entre dos vectores espectrales puede calcularse con la siguiente ecuación:

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

En donde t es el espectro de estudio y r el espectro de referencia. El número n representa el número de bandas estudiadas y a es el ángulo entre vectores. El resultado del método es una imagen de clasificación SAM y un número n de imágenes que muestran la distancia angular entre cada espectro de la imagen y el espectro de referencia, medida en radianes.

Los píxeles más oscuros representan una diferencia angular menor, y por lo tanto una mayor similitud entre espectros (Pérez et al., 2010).

### **2.3.2. Espectrometría de Reflectancia**

La espectrometría de reflectancia es una técnica de identificación de minerales basada en la emisión de radiación electromagnética en la región del espectro infrarrojo cercano (SWIR). Dentro de este rango, algunos iones y enlaces metal-ión tienen absorciones muy definidas, que permiten reconocer su existencia dentro de la muestra analizada (Pérez et al., 2010). La mayoría de estos iones y enlaces se encuentran en los minerales acidogénicos e hidrotermales, por este motivo el método es de amplia aplicación en la búsqueda de áreas mineralizadas.

### **2.3.3. Firma Espectral**

La firma espectral es el conjunto de reflectancias en distintas longitudes de onda que presenta un objeto o material dado. Dicho de otro modo, la firma espectral es la ‘huella dactilar’ que caracteriza cada objeto, y que se deriva directamente de sus propiedades y de cómo éstas influyen en la forma en que dicho objeto refleja la radiación incidente. Las firmas espectrales son a menudo representadas gráficamente en un eje de coordenadas, donde la longitud de onda está en el eje de las abscisas, y la reflectancia en el eje de las ordenadas. La firma espectral consiste en general de una curva envolvente o continuum y de rasgos de absorción que tienen posiciones específicas de longitud de onda. Los rasgos de absorción son mostrados convencionalmente como mínimos respecto al envolvente general de curvas. (Mamani, 2017)

#### **2.3.4. Técnica de corrección atmosférica de la imagen aster L1B.**

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia intrínseca del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello se requiere:

- Convertir los ND de cada banda a valores de radiancia (L),
- La radiancia se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera “Top of Atmosphere” (TOA).
- Se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia (Meijerink, 2007).

Los datos de la imagen Aster ya cuentan con corrección radiométrica, sin embargo, han sido redimensionados para facilitar su compresión. La fórmula para descomprimir los datos, tal como lo especifica Meijerink, (2007). Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{Radiancia (L)} = (\text{ND}-1) * \text{UCC}$$

Donde UCC (Unit Conversion Coefficients) corresponde al coeficiente de unidades de conversión que es distinto para cada banda y según el tipo de ganancia con la cuál fue capturada la imagen (la información de ganancia por banda está disponible en los metadatos de la imagen y puede ser ganancia alta, normal o baja). En la tabla 2 corresponde a las UCC de cada banda según el tipo de ganancia (Aguilar y Mora, 2016).

#### **2.3.5. Técnica para enmascarar vegetación.**

Como lo menciona Bravo (2017), el Índice de Diferencia de Vegetación Normalizado, también conocido como NDVI (Rouse et al., 1974) por sus siglas en inglés. Es un índice usado para medir la diferencia normalizada entre las reflectancias del rojo y del infrarrojo cercano, proporcionando una

medida sobre la cantidad, calidad y desarrollo de la cobertura vegetal y vigorosidad en áreas extensas. Según Rouse et al. (1974) menciona que el NDVI es el índice de vegetación más utilizado para todo tipo de aplicaciones. La razón fundamental es su sencillez de cálculo, y disponer de un rango de variación fijo (entre -1 y +1), lo que permite establecer umbrales y comparar imágenes, etc. La misma que está definida por la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR: Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

RED: Reflectancia de la banda roja – RED.

### **2.3.6. Técnica para enmascarar agua.**

El Índice de Diferencia Normalizada Agua (NDWI) es un indicador numérico, derivada de imágenes satelitales ópticas, usando las ondas de infrarrojo cercano y corta las bandas espectrales del infrarrojo. Esta última banda espectral está muy asociada con cambios en el contenido de agua de vegetación y la estructura de mesófilo esponjoso en las cubiertas vegetales. La respuesta del infrarrojo cercano banda espectral se correlaciona con la estructura interna de la hoja y la hoja de materia seca, excluyendo el contenido de agua. NDWI es útil en muchas aplicaciones de teledetección. Vigilancia de los cultivos de la salud, la cartografía de la tierra / agua de embarque, la discriminación de agua hacia el interior de los cuerpos de agua

de mar abierto, son sólo algunas de las aplicaciones donde se utiliza NDWI.

Está definida por la siguiente ecuación (Bravo, 2017).

$$NDWI = \frac{(GRE - NIR)}{(GRE + NIR)}$$

Donde:

NDWI: Índice de Diferencia Normalizada Agua

NIR: Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

GRE: Reflectancia de la banda verde – GRE

### **2.3.7. Técnica para determinar acidez a partir de minerales acidogénicos:**

Son minerales generadores de acidez de roca, la pirita debido a la abundancia es considerada la de mayor relevancia como la principal generadora de acidez de roca. Se tiene la siguiente lista de sulfuros generadores de acidez de roca (Wolkersdorfer 2006; Lottermoser 2010):

#### **Minerales del Hierro (Fe):**

Greigita:  $Fe_3S_4$

Marcasita:  $FeS_2$

Pirita:  $FeS_2$

Pirrotita:  $Fe(1-X)S$

Troilita:  $FeS$

Bornita:  $Cu_5FeS_2$

#### **Minerales del Cobre (Cu):**

Bornita:  $Cu_5FeS_4$

Chalcopirita:  $CuFeS_2$



Chalcosita:  $\text{Cu}_2\text{S}$

Covelita:  $\text{CuS}$

Cubanita:  $\text{CuFe}_2\text{S}_3$

Enargita:  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$

Tennantita:  $\text{Cu}_2\text{As}_2\text{S}_{13}$

**Minerales del Níquel (Ni):**

Pentlandita:  $(\text{Fe},\text{Ni})_9\text{S}_8$

Millerita:  $\text{NiS}$

Violarita:  $\text{FeNi}_2\text{S}_4$

**Minerales del Zinc:**

Esfalerita:  $\text{ZnS}$

Wurtzita:  $\text{ZnS}$

**Minerales del Plomo, Molibdeno, Antimonio:**

Galena:  $\text{PbS}$

Molibdenita:  $\text{MoS}_2$

Estibnita:  $\text{Sb}_2\text{S}_3$

**Minerales del Cobalto, Cadmio y Mercurio:**

Cobalita:  $\text{CoAsS}$

Linaeita:  $\text{Co}_3\text{S}_4$

Greenockita:  $\text{CdS}$

Cinabrio:  $\text{HgS}$

#### **2.4. Procedimiento investigativo.**

El área donde se realizarán las actividades propuestas se ubica en la región intermontañosa del norte de los Andes del Perú. Específicamente corresponde al Distrito de San Bernardino que es uno de los cuatro que conforman la Provincia de San Pablo, ubicada en el Departamento de Cajamarca, bajo la administración del Gobierno regional de Cajamarca, en el norte del Perú.

El área del proyecto se caracteriza por presentar un clima frío – sub seco, con períodos secos (abril a setiembre) y lluviosos (habitualmente desde octubre hasta marzo) diferenciados.

##### **Ubicación política**

Políticamente la zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de Cajamarca, provincia de San Pablo, distrito de San Bernardino.

##### **Ubicación geográfica**

Geográficamente se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas que enmarcan la zona de estudio.

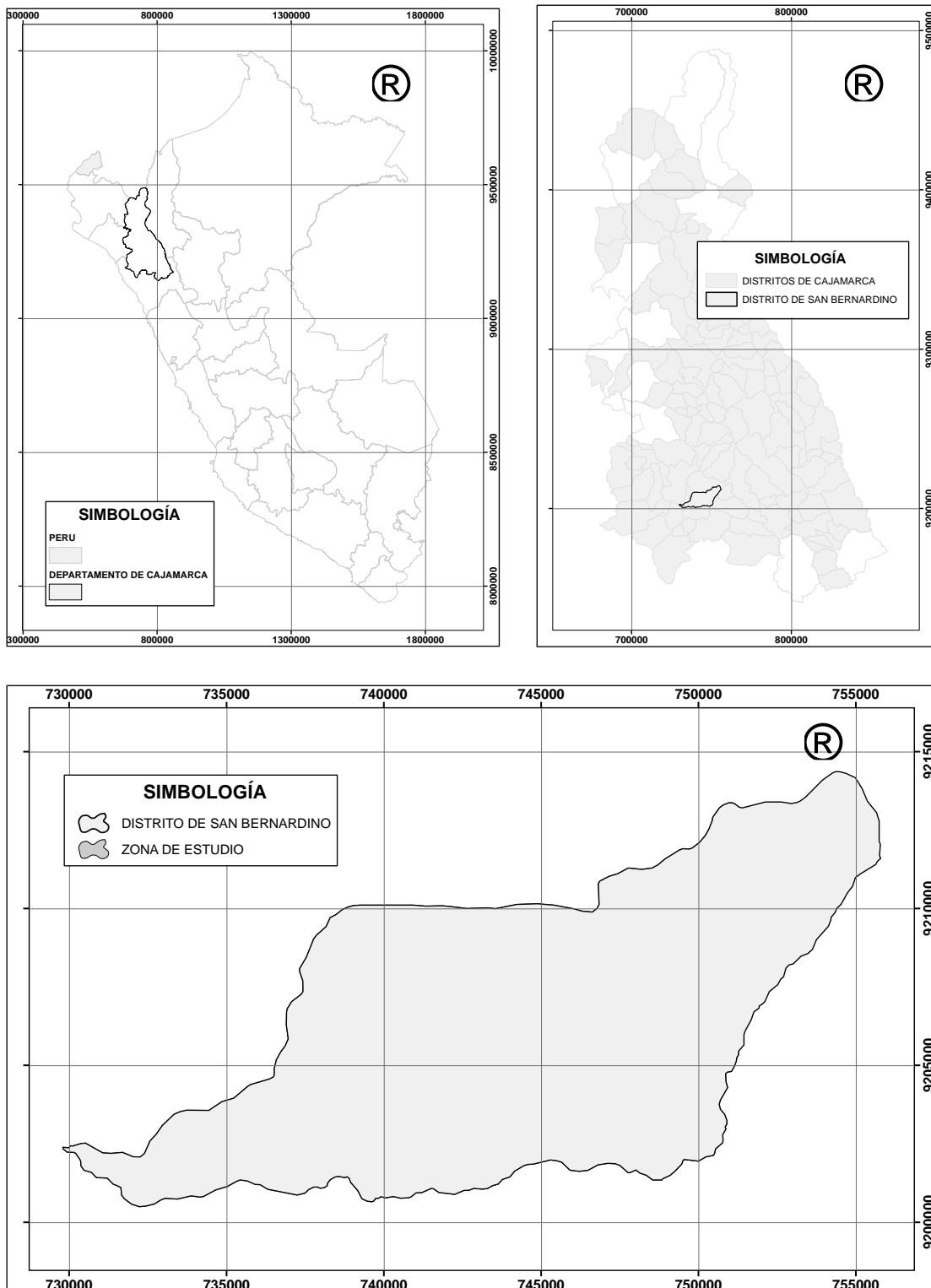


Figura N° 1. Ubicación de la zona de estudio.

Tabla 1

*Coordenadas que enmarcan la zona de estudio.*

Vértices	Coordenadas UTM	
	Coordenada Este	Coordenada Norte
Vértice 1	729000	92000000
Vértice 2	729000	9215000
Vértice 3	755000	92000000
Vértice 4	755000	9215000

#### **2.4.1. Selección y descarga de imágenes ASTER.**

Para determinar la caracterización mineralógica mediante la percepción remota se tuvo que realizar la descarga de la imagen Aster que contenga información espectral con en sus tres subsistemas tales como SWIR, VNIR Y TIR, así como la zona de estudio, para lo cual se hizo uso del servidor virtual como es el caso del Instituto Geológico de los Estados Unidos: <https://www.usgs.gov/>.

Las imágenes Aster en formato L1B tienen 14 bandas ortorectificadas y con corrección radiométrica, escaladas en tonos de 256 niveles digitales (8 bits) y 4096 niveles digitales (12 bits) que permitirá generar imágenes más compactas. Las bandas 1, 2 y 3N corresponden al espectro visible e infrarrojo cercano o “Visible Near InfraRed” (VNIR) tomadas por un telescopio perpendicular a la superficie de la tierra (nadir) y una banda adicional 3B tomada por un telescopio ligeramente desviado hacia atrás que permite generar modelos estereoscópicos. Estas cuatro bandas tienen una resolución de 15 metros de tamaño del pixel.

Las bandas 4 a 9 corresponden al infrarrojo de onda corta o “Short Wave InfraRed” (SWIR), tienen una resolución espacial de 30 metros y las bandas 10 a 14 corresponden a información térmica y son las bandas “Thermal InfraRed” (TIR), tienen una resolución de 90 metros y cuentan con 4096 niveles digitales (12 bits) por banda (Meijerink, 2007).

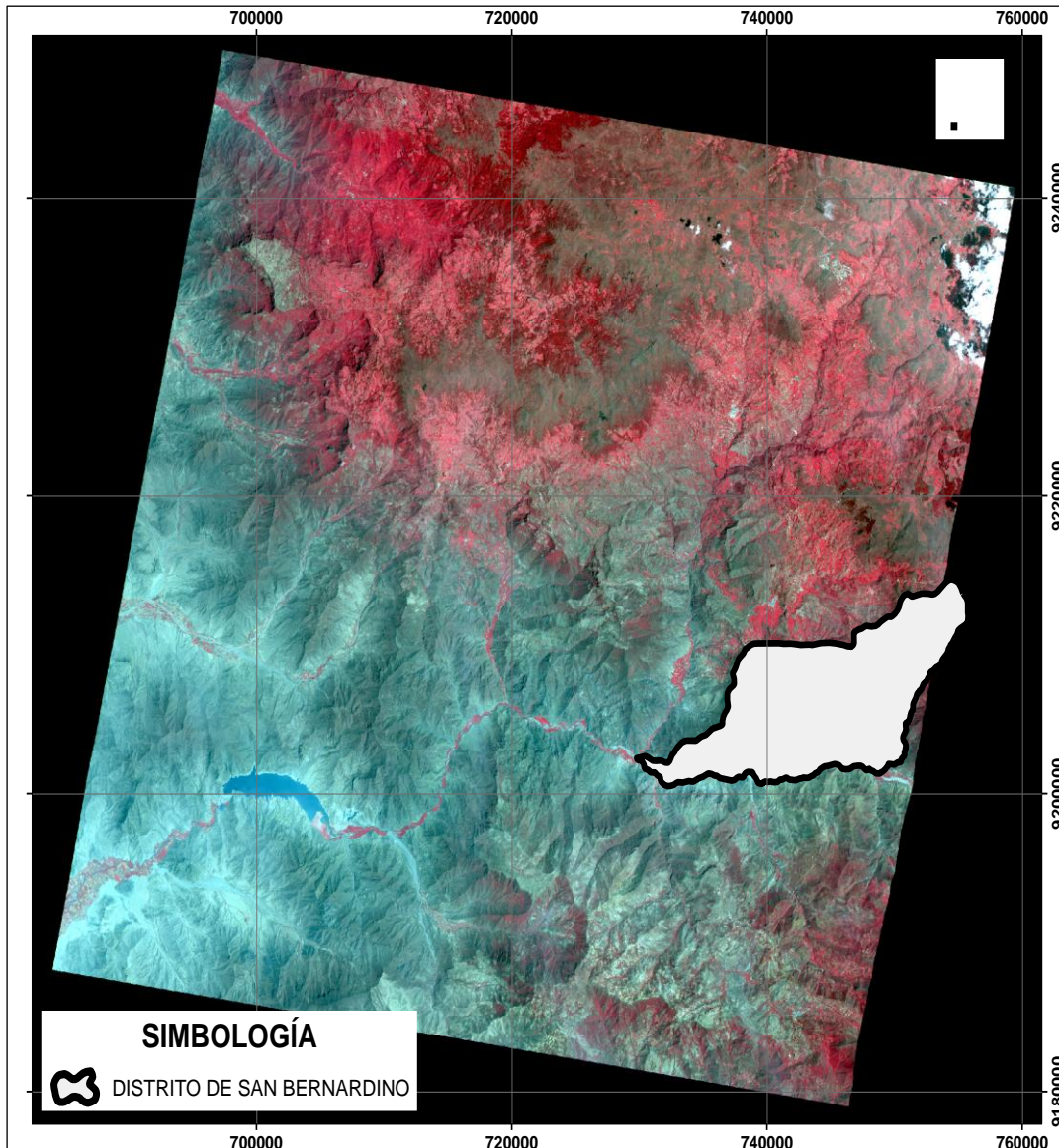


Figura N° 2: Imagen Aster para la zona de estudio en color real.

Tabla 2

*Ficha técnica de la imagen Áster que contiene la zona de estudio*

<b>Ficha técnica de la imagen aster L1B</b>		
Código de la imagen	AST_L1B_00308082016154627_20180525095007_4114.hdf	
Tipo	HDF EOS ASTER	
Punto medio X	685972.6241	
Punto medio Y	9251538.477	
Fecha de adquisición	25/05/2018	
Bandas	Longitud de onda (nm)	
VNIR	1	520 – 600
	2	630 – 690
	3N	760 – 860
	3B	760 - 860
SWIR	4	1 600 – 1 700
	5	2 145 – 2 185
	6	2 185 – 2 225
	7	2 235 – 2 285
	8	2 295 – 2 365
	9	2 360 – 2 430
TIR	10	8 125 – 8 475
	11	8 475 – 8 825
	12	8 925 – 9 275
	13	10 250 – 10 950
	14	10 950 – 11 650

Tabla 3

*Coefficientes de conversión de unidades (UCC, por sus siglas en inglés) para las bandas 1, 2, 3N y 3B del Sensor Aster.*

Banda	UCC (W/m <sup>2</sup> *sr*nm)		
	Ganancia Alta	Ganancia Normal	Ganancia Baja
1	676	1 688	2 250
2	708	1 415	1 890
3N/3B	423	862	1 150

Fuente: USGS, 2014

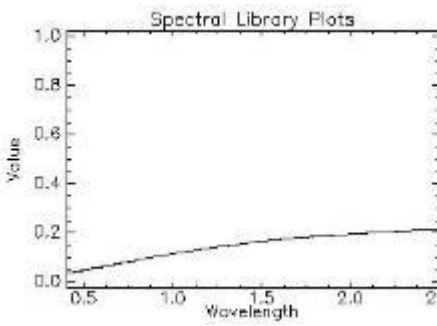
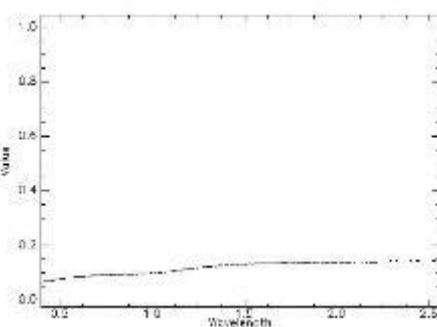
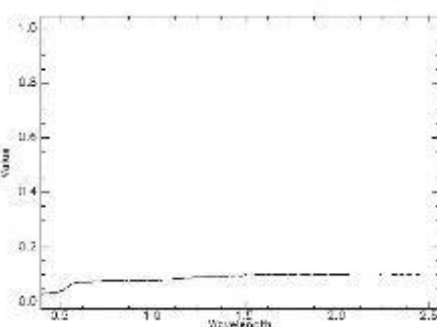
Terminada la preparación de los datos, se aplicó la corrección atmosférica de la imagen VNIR de Aster. Dado que las bandas VNIR son tomadas por un sensor ortogonal a la superficie de la tierra, no es necesario introducir la información de inclinación del sensor (FLAASH asume que el sensor es ortogonal si no se detalla el ángulo de inclinación) y por las características de las bandas VNIR de Aster, no es posible aplicar los procedimientos de extracción de agua y extracción de aerosoles, por lo que es necesario, para estas imágenes, seleccionar un modelo atmosférico y un modelo de aerosoles según las condiciones de captura de la imagen. El factor de escala para este caso corresponde a 10, mientras que el resto de valores que solicita FLAASH se ingresan de acuerdo a las características de cada imagen (fecha y hora de toma de datos). Una vez realizada la corrección atmosférica se tendrá una imagen compuesta en niveles de reflectancia lista para utilizar (Aguilar y Mora, 2016).

#### 2.4.2. Selección de los minerales que presentan firma espectral.

Se procede a buscar todos los minerales generadores de acides de roca de la librería espectral del Instituto Geológico de los Estados Unidos (USGS) y Laboratorio de reflectancia espectral (JLP), en el cual se encontró los siguientes minerales:

Tabla 4.

##### *Minerales del Hierro.*

Minerales del Hierro (Fe)		
Nombre	formula	Firma espectral
Marcasita	FeS <sub>2</sub>	
Pirita	FeS <sub>2</sub>	
Pirrotita	Fe(1-X)S	



Bornita  $Cu_5FeS_4$

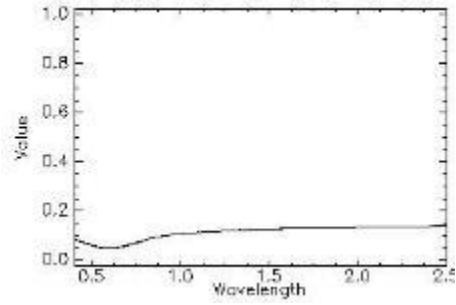
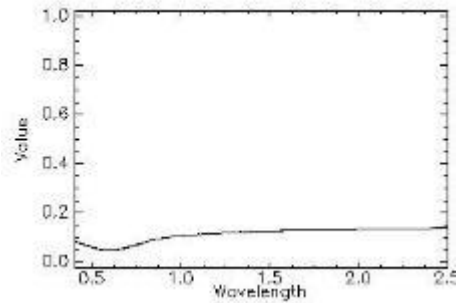


Tabla 5.

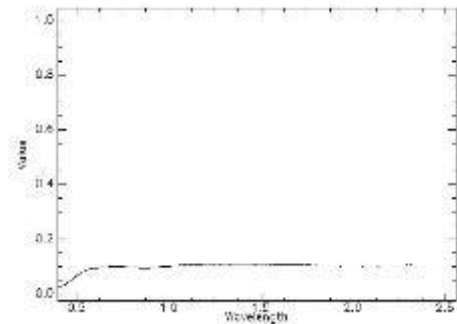
*Minerales del Cobre*

<b>Minerales del Cobre (Cu)</b>		
<b>Nombre</b>	<b>formula</b>	<b>Firma espectral</b>

Bornita  $Cu_5FeS_4$



Chalcopyrita  $CuFeS_2$



Chalcosita       $Cu_2S$

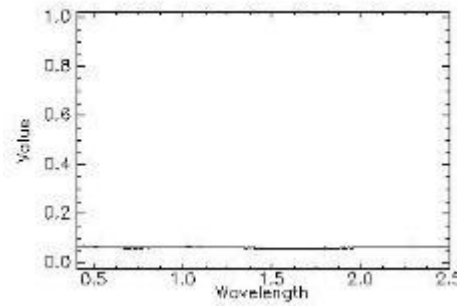
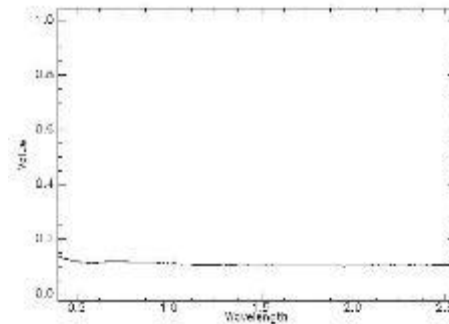


Tabla 6.

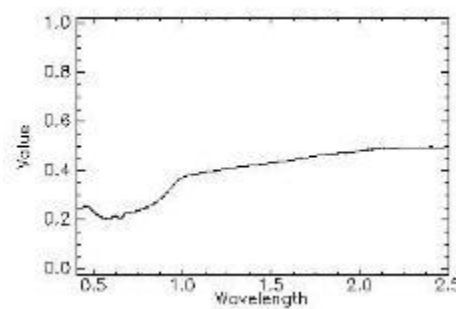
*Minerales del Plomo, Molibdeno, Antimonio.*

<b>Minerales del Plomo, Molibdeno, Antimonio</b>		
<b>Nombre</b>	<b>formula</b>	<b>Firma espectral</b>

Galena       $PbS$



Molibdenita       $MoS_2$



Estibnita

$Sb_2S_3$

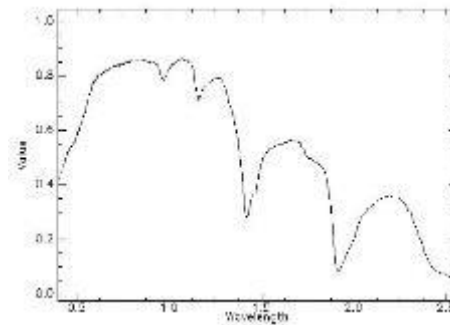


Tabla 7.

*Minerales de mercurio*

**Minerales del Plomo, Molibdeno, Antimonio**

Nombre	formula	Firma espectral
--------	---------	-----------------

Cinabro

$HgS$

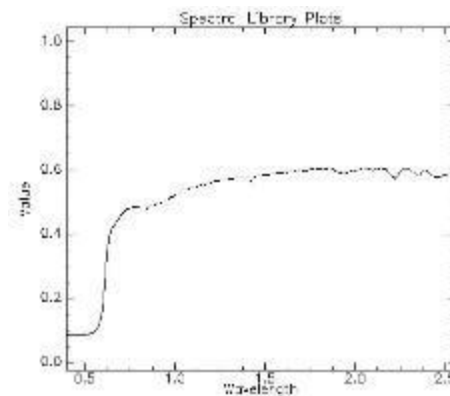
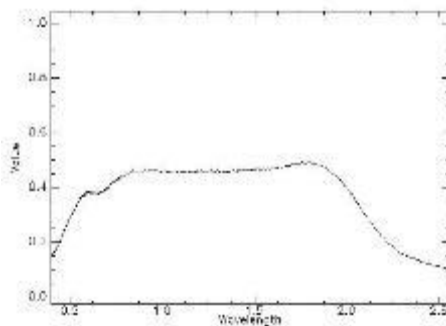


Tabla 8.

*Minerales del Zinc.*

<b>Minerales del Zinc</b>		
<b>Nombre</b>	<b>formula</b>	<b>Firma espectral</b>
Esfalerita	ZnS	

### 2.4.3. Discriminación de agua y vegetación.

#### 2.4.3.1. Mascara de agua

Para discriminar el agua en el siguiente estudio se utilizó la fórmula de (Bravo, 2017). El cual filtra datos que corresponden a cuerpos de agua haciendo uso de la reflectancia en la banda infrarrojo cercana – NIR y la reflectancia en la banda GRE.

$$NDWI = \frac{(GRE - NIR)}{(GRE + NIR)}$$

Donde:

NDWI: Índice de Diferencia Normalizada Agua

NIR: Reflectancia de la banda infrarrojo cercano – NIR.

GRE: Reflectancia de la banda verde – GRE

Esta fórmula tiene una variación y depende del tipo de imagen satelital que se trabaje, para el caso del siguiente estudio se trabajó con un producto ASTER L1B y se tuvo en cuenta lo siguiente:

$$NDWI = \frac{(B1 - B3N)}{(B1 + B3N)}$$

Donde:

NDWI: Índice de Diferencia Normalizada Agua

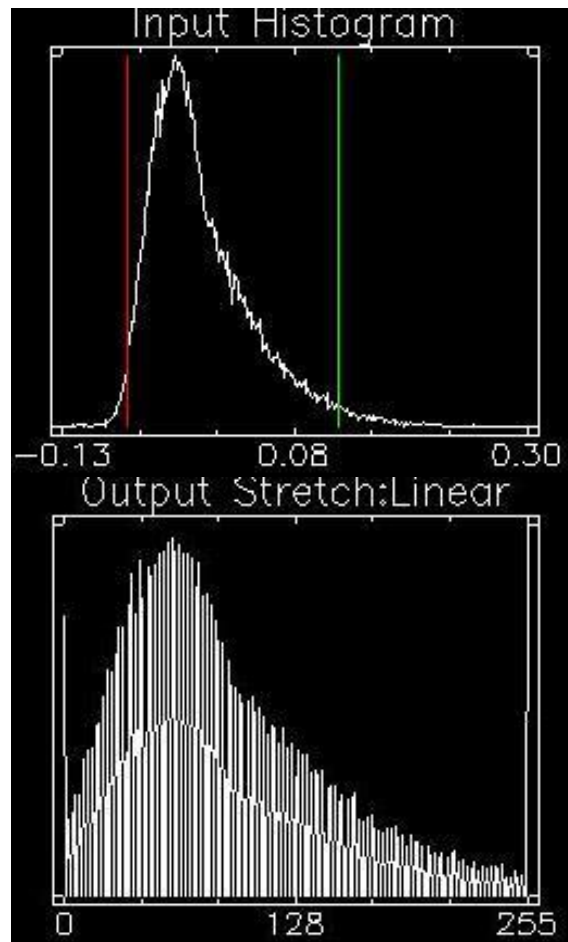
B3N: Banda del subsistema VNIR de resolución espectral 0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ .

B1: Banda del subsistema VNIR de resolución espectral 0.52 a 0.60  $\mu\text{m}$ .

Una vez obtenido el resultado se generó el variograma de certeza que permite adquirir los límites y porcentaje de certeza en función de los componentes principales de cada banda, los cuales contienen información espectral de los cuerpos de agua.

La siguiente imagen representa el variograma de certeza, con valores de 0 a 255 en función de los rangos espectrales analizados

Estos rangos fueron filtrados a partir de la información espectral de toda la zona de estudio con certeza de agua del 99 por ciento aplicando la fórmula de (Bravo, 2017).



*Figura N° 3.* Variograma de certeza para enmascaramiento de agua.

La siguiente figura muestra la máscara de creada a partir de la fórmula de (Bravo, 2017). representada en color de pixel celeste las zonas con presencia de agua loticas y lenticas en la zona de estudio.

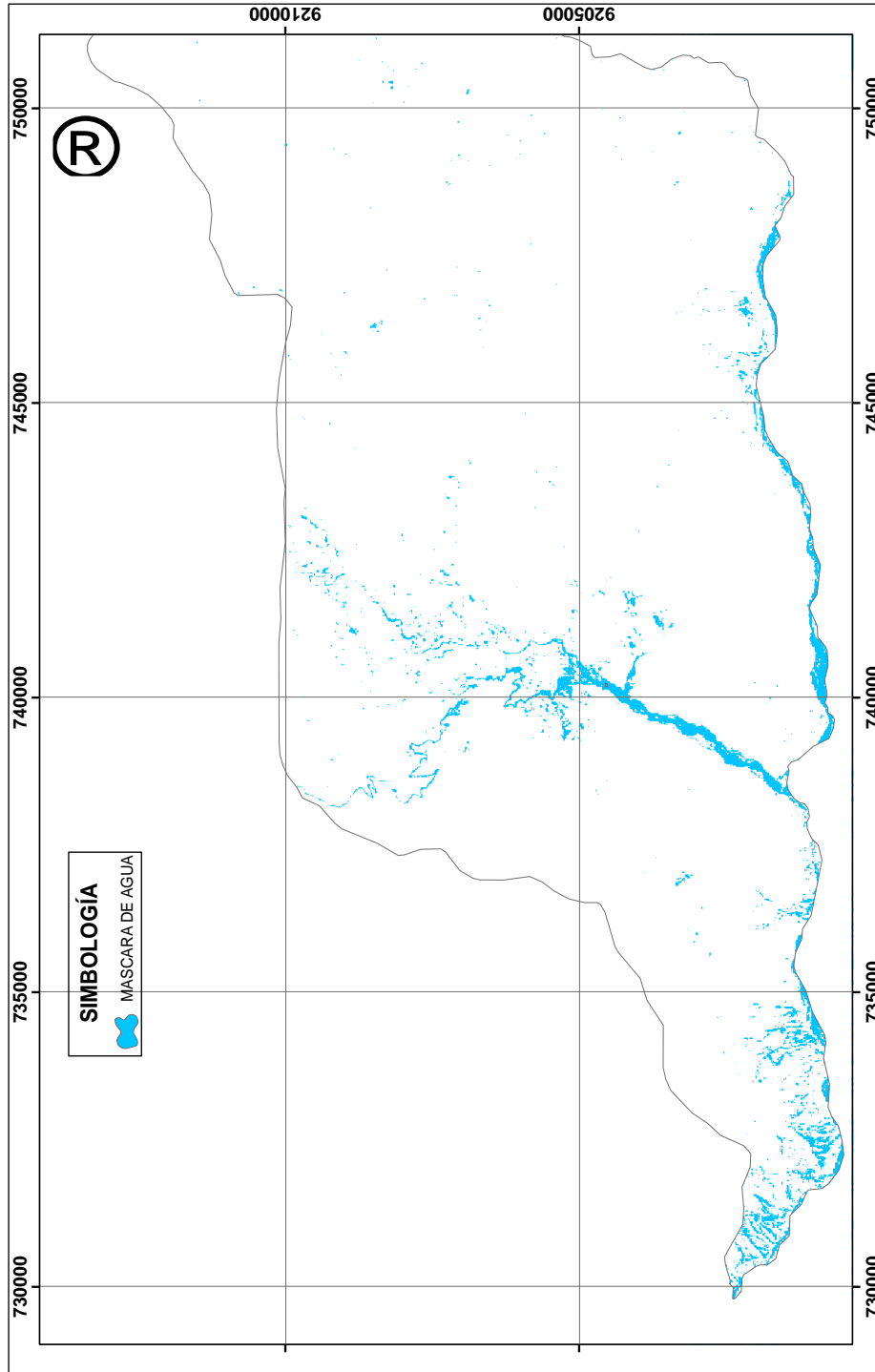


Figura N° 4. Mascara de agua de la zona de estudio – certeza 99 %.

### 2.4.3.2. Mascara de vegetación

Para discriminar la vegetación en el siguiente estudio se utilizó la fórmula de (Bravo, 2017). El cual filtra datos que corresponden a zonas con presencia de vegetación poco vigorosa a vigorosa haciendo uso de la reflectancia en la banda infrarrojo cercana – NIR y la reflectancia en la banda RED.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

NIR: Reflectancia de la banda Infrarrojo cercano – NIR.

RED: Reflectancia de la banda roja – RED.

Esta fórmula tiene una variación y depende del tipo de imagen satelital que se trabaje, para el caso del siguiente estudio se tendrá en cuenta lo siguiente:

$$NDVI = \frac{(B3N - B2)}{(B3N + B2)}$$

Donde:

NDVI: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

B3N: Banda del subsistema VNIR de resolución espectral 0.78 a 0.86  $\mu\text{m}$ .

B2: Banda del subsistema VNIR de resolución espectral 0.63 a 0.69  $\mu\text{m}$ .



Una vez obtenido el resultado se generó el variograma de certeza que permite adquirir los límites y porcentaje de certeza en función de los componentes principales de cada banda, los cuales contienen información espectral de los tipos de vegetación de la zona de estudio.

La siguiente imagen representa el variograma de certeza, con valores de 0 a 255 en función de los rangos espectrales analizados

Estos rangos fueron filtrados a partir de la información espectral de toda la zona de estudio con certeza de agua del 95 por ciento aplicando la fórmula de (Bravo, 2017).

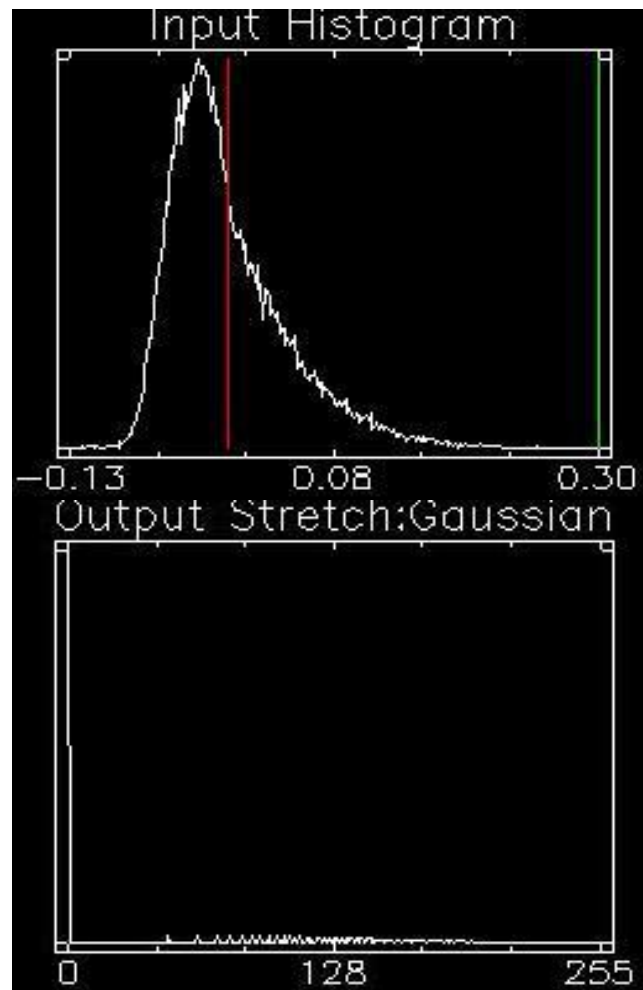


Figura N° 5. Variograma de certeza para enmascaramiento de vegetación.

La siguiente figura muestra la máscara de vegetación creada a partir de la fórmula de (Bravo, 2017). representada en color de pixel verde las zonas con presencia de vegetación poco vigorosa a vigorosa

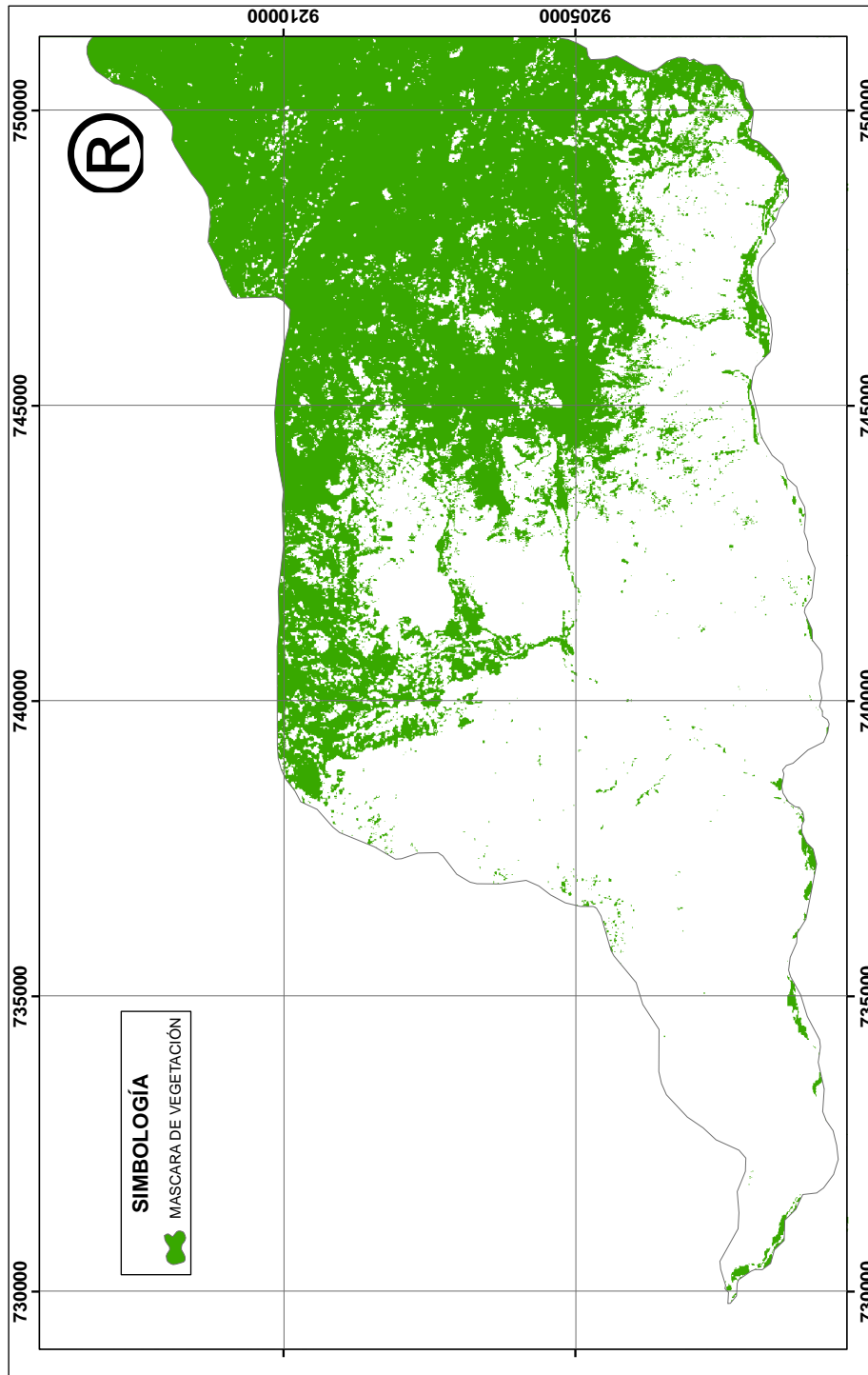


Figura N° 6. Mascara de vegetación de la zona de estudio – certeza 95 %.

Una vez obtenidas las máscaras de agua y vegetación se procedió a realizar la unión de estas, posteriormente fueron aplicadas a la imagen ASTER LIB a trabajar con la finalidad de suprimir características espectrales que no sean necesarias y las cuales limiten la cantidad de firmas espectrales a analizar.

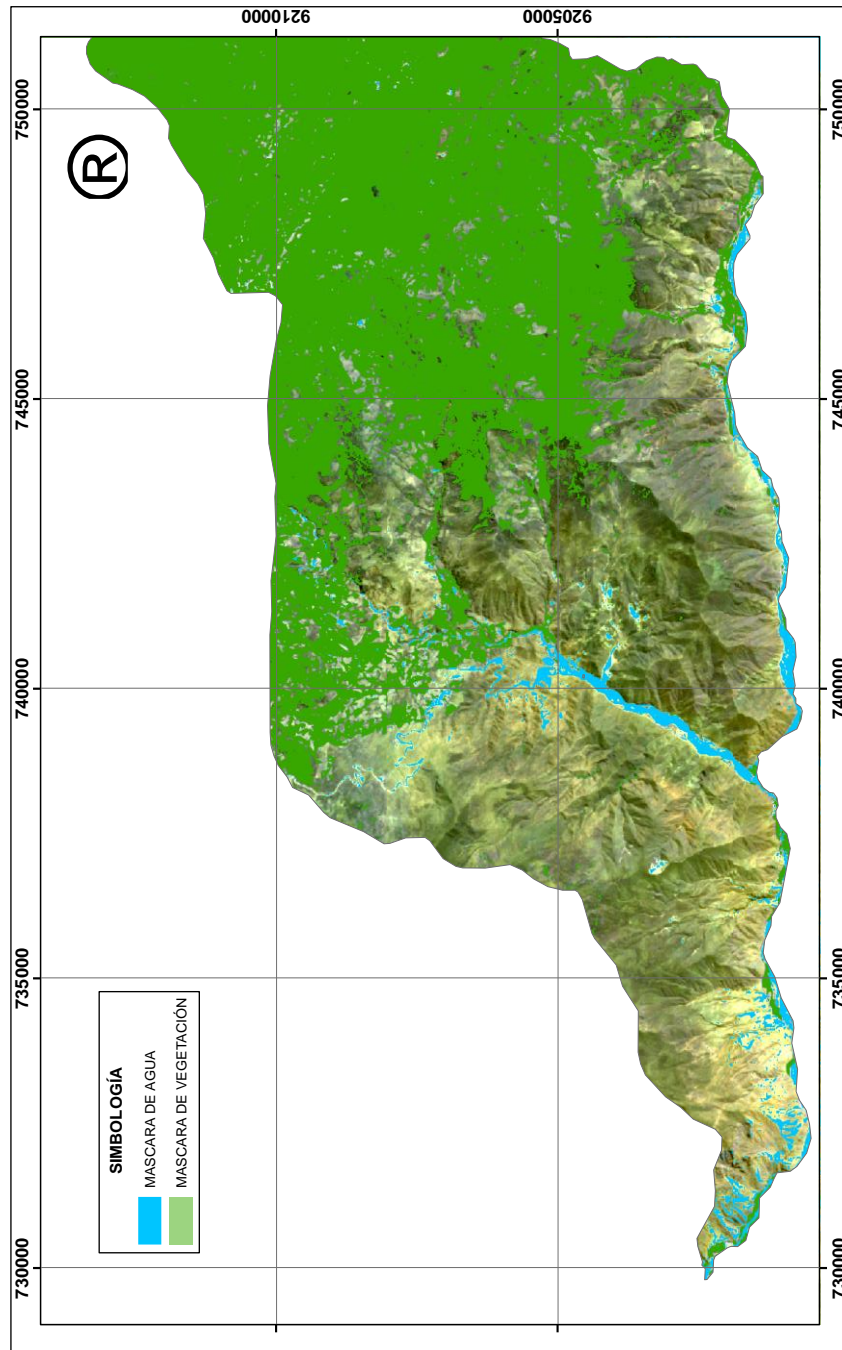


Figura N° 7. Unión de mascara de agua y vegetación de la zona de estudio.

La siguiente imagen muestra la imagen satelital ASTER L1B corregida y enmascarada; en color negro se aprecia la discriminación de la información espacial y espectral que corresponde a agua y vegetación enmascarada

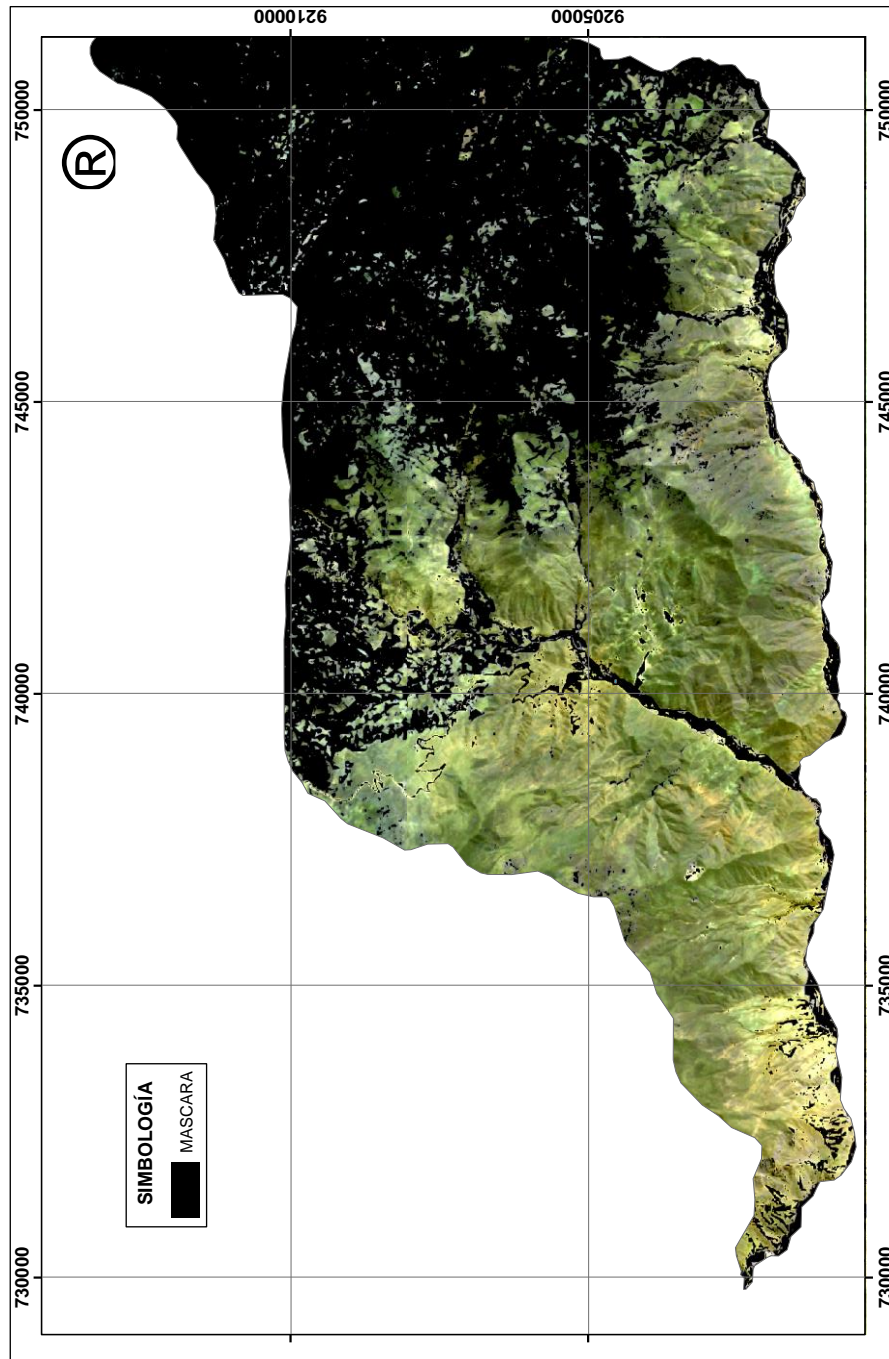


Figura N° 8. Aplicación de máscara de agua y vegetación en la imagen ASTER de la zona de estudio.

#### 2.4.4. Creación de librerías espectrales

Una vez corregida y enmascarada la imagen se procedió a realizar el análisis espectral de la zona de estudio en la cual se tendrá en cuenta dos librerías base de trabajo y la cual se obtiene a partir de la base de datos satelitales como se especifica a continuación

Base espectral del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), minerales como pirita, pirrotita, calcopirita, esfalerita, galena y cinabrio con longitud de onda de 0.3951 a 2.56 Micrómetros

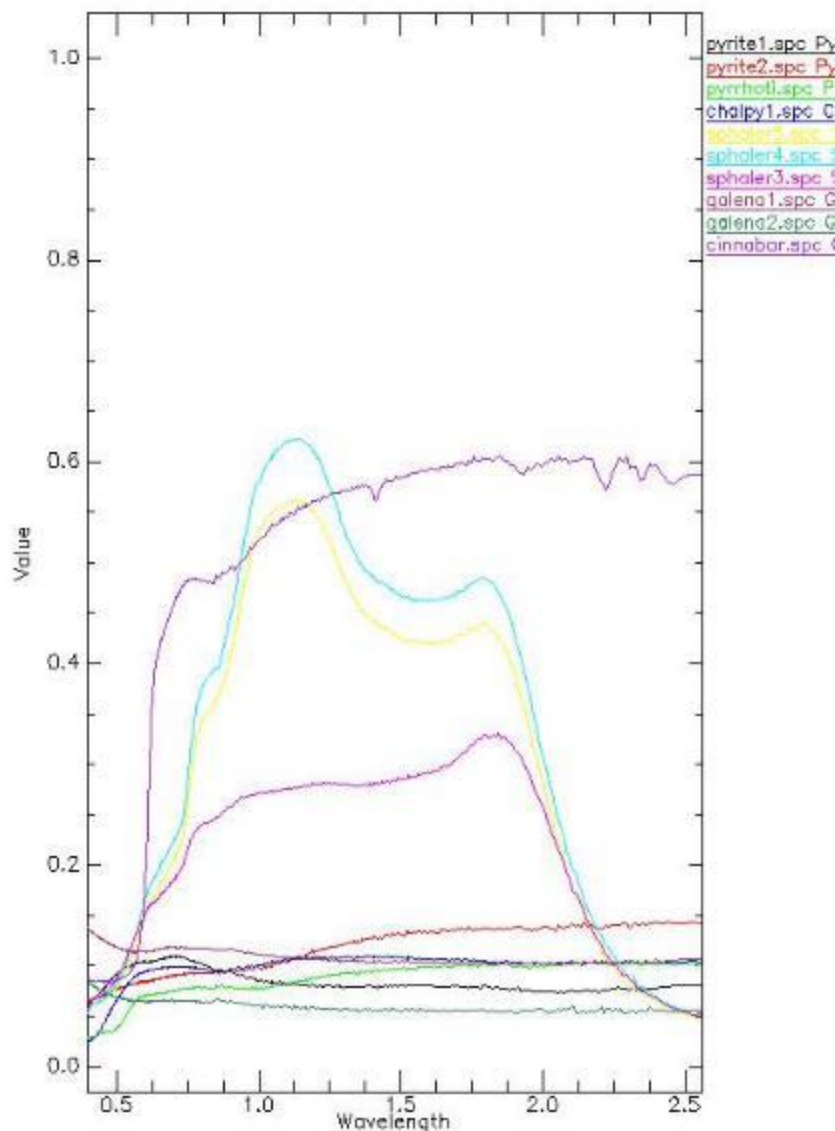


Figura N° 9. Firmas espectrales seleccionadas de la USGS, 2019.

Base espectral del Laboratorio de reflectancia espectral (JLP), minerales como bornita, calcopirita y molibdenita con longitud de onda de 0.4 a 2.5 Micrómetros

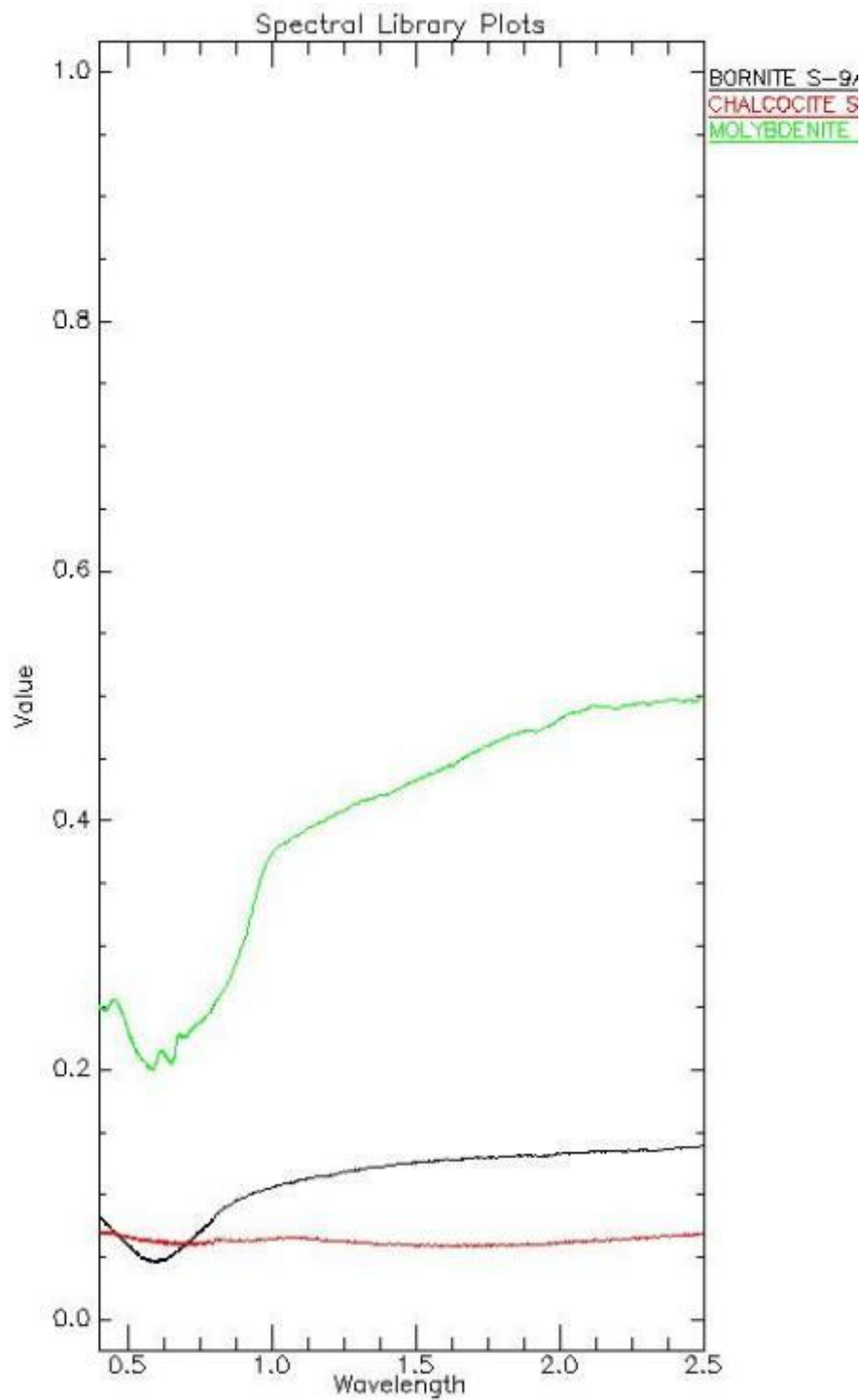


Figura N° 10. Firmas espectrales seleccionadas de la JLP.

Una vez creada la librería espectral se procedió a realizar el mapeo espectral por el método SAM, que consistió en la determinación de similitud entre dos espectros, el del pixel de la imagen ASTER y el otro del mineral acidogénico de interés. El algoritmo de este método determina la similitud espectral calculando el ángulo de mejor aproximación, para lo cual se utilizan firmas espectrales de minerales acidogénicos de la imagen ASTER y los espectros seleccionados de la librería de la USGS y JLP como piritita, pirrotita, calcopiritita, esfalerita, galena, cinabrio, bornita, calcopiritita y molibdenita. Con esta base se realiza la identificación individual de los minerales acidogénicos, y se obtiene un mapa de zonas con presencia de estos minerales que tienen la posibilidad de generar drenaje ácido de roca.

#### **2.4.5. Análisis de reflectancia y absorción por mineral**

Para el análisis de reflectancia se utilizó la técnica de la envolvente, la cual transforma una firma espectral compleja en rasgos representativos sencillos de reflectancia y absorción característicos por mineral.

Para ello se colecta los picos de reflectancia y absorción más representativos de cada mineral y por medio del software Envi 5.3 se realiza la comparación de estos espectros, identificándolos de manera efectiva y rápida, así posteriormente presentarlos en planos que muestren su ubicación espacial.



### Calcopirita

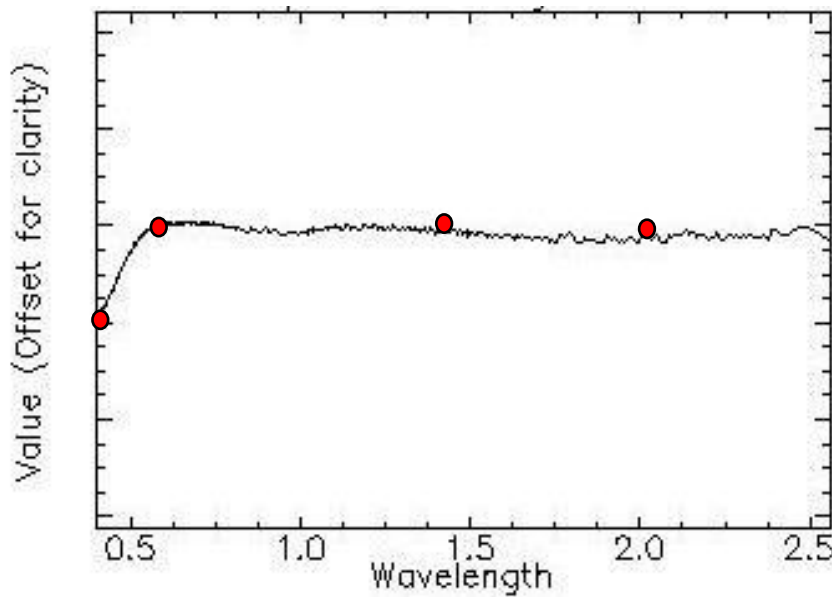


Figura N° 11. Firma espectral de calcopirita con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019).

La calcopirita Es un mineral muy común en los filones de sulfuros diseminados por las rocas ígneas. Puede formarse y encontrarse en rocas pegmatitas neumatolíticas, rocas hidrotermales de alta temperatura, depósitos de metamorfismo de contacto, tiene un color amarillo dorado, que a menudo se asemeja al oro. Sin embargo, sus propiedades físicas como la raya y la tenacidad son muy diferentes de las del oro y pueden distinguirlo fácilmente. La calcopirita es un mineral hermoso, con buenos cristales bastante común y de gran extensión superficial. Asociada a la pirita, esfalerita, bornita, calcosina, barita, dolomita, fluorita, cuarzo, calcita.



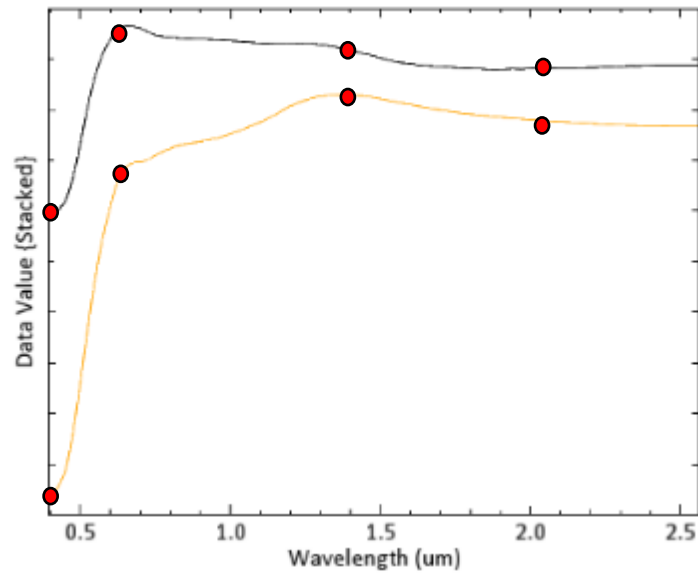


Figura N° 12. Comparación espectral de la calcopirita.

En la siguiente figura se observa la comparación de espectros de calcopirita, en color naranja se aprecia el espectro de calcopirita identificada en la imagen ASTER y en color negra la firma espectral proveniente de la USGS

Tabla 9

*Puntos característicos de absorción y reflectancia de la calcopirita*

Puntos característicos	Longitud de onda micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	
	Absorción	0.40
Reflectancia	-	0.65
Reflectancia	-	1.40
Reflectancia	-	2.05

### Cinabrio

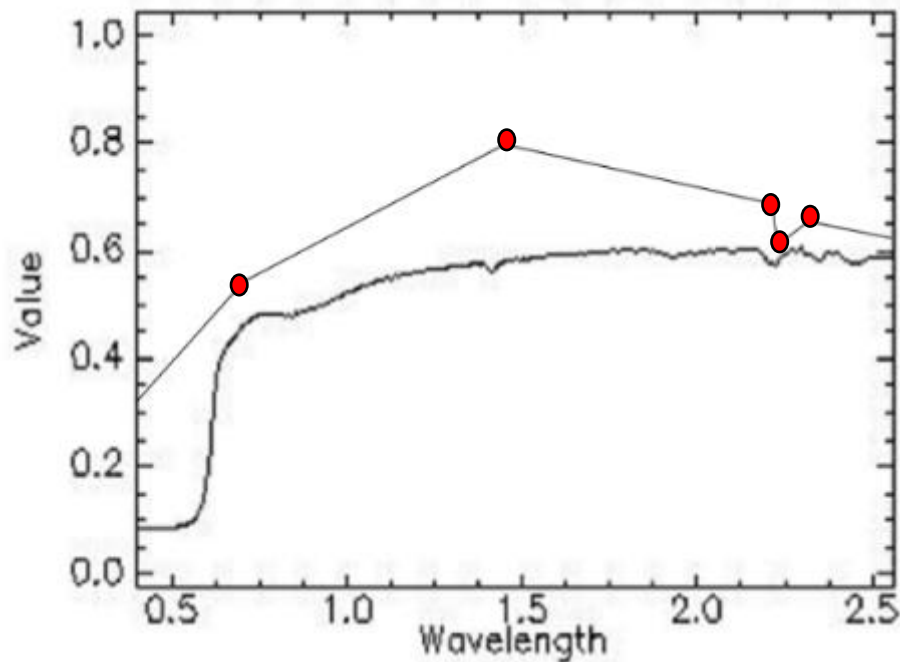


Figura N° 13. Firma espectral de cinabrio con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019).

También conocido como cinabarita, es un mineral de la clase de los sulfuros (sulfuro de mercurio). Está compuesto en un 85 % por mercurio y 15 % de azufre. En cuanto a su simetría y propiedades ópticas presenta un parecido notable con el cuarzo. Como el cuarzo, exhibe una polarización circular. Se presenta normalmente en una masa granular de cristales trigonal. Se forma junto a las rocas volcánicas y fuentes hidrotermales. Su color es rojizo y asociado a minerales como: cuarzo, calcita, calcedonia, ópalo, barita, Estibina, rejalgar, mercurio y sulfuros en general.

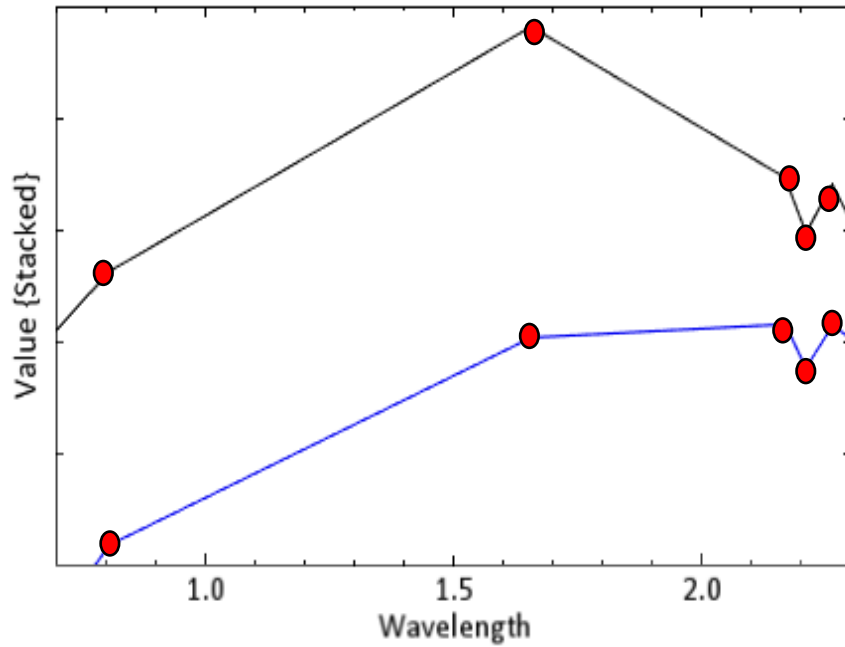


Figura N° 14. Comparación espectral del cinabrio.

En la siguiente figura se observa la comparación de espectros del cinabrio, en color azul se aprecia el espectro de cinabrio identificada en la imagen ASTER y en color negra la firma espectral proveniente de la USGS

Tabla 10

*Puntos característicos de absorción y reflectancia del cinabrio*

Puntos característicos	Longitud de onda micrómetros (μm)	
	Absorción	0.8
Reflectancia		1.65
Reflectancia		2.15
Absorción	2.20	
Reflectancia		2.25

### Esfalerita

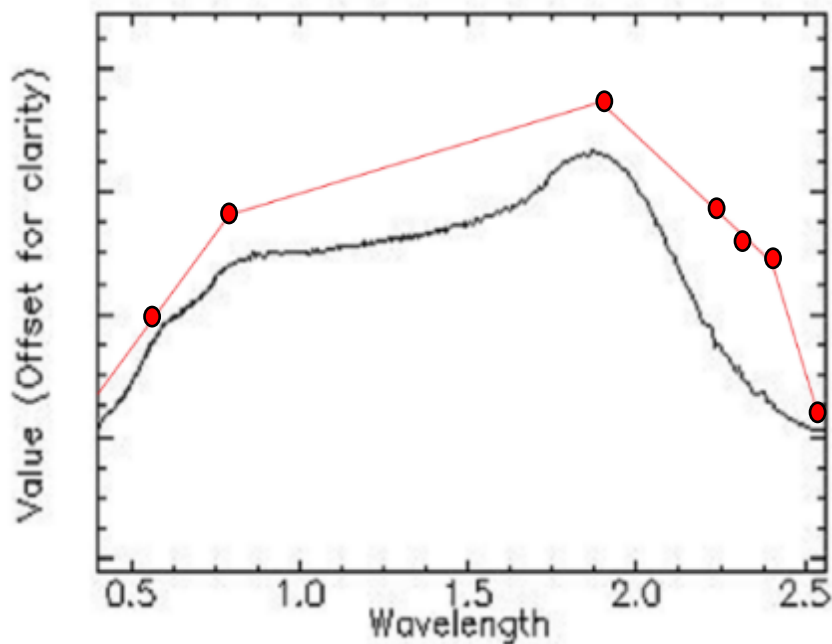


Figura N° 15. Firma espectral de esfalerita tipo 1 con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019).

La esfalerita o blenda es un mineral muy común, constituido por sulfuro de zinc (ZnS), y se encuentra en decenas de miles de yacimientos

La esfalerita suele estar asociada casi siempre con galena, pirita y calcopirita. La asociación con calcopirita se produce a escala macroscópica, en forma de intercrecimientos, como crecimientos de microcristales de calcopirita sobre cristales de esfalerita, en muchas ocasiones de forma epitaxial, y también a escala microscópica, de una forma conocida como “enfermedad de la calcopirita”. Se planteó que la calcopirita se forma por coprecipitación o por reemplazamiento, que son los dos procesos posibles, y puede darse uno u otro dependiendo del yacimiento.

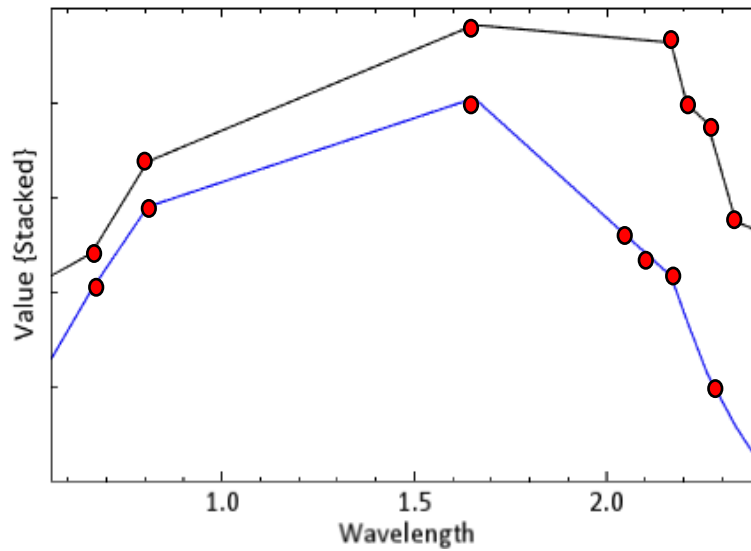


Figura N° 16. Comparación espectral de la esfalerita tipo 1.

En la siguiente figura se observa la comparación de espectros de esfalerita tipo 1, en color azul se aprecia el espectro de esfalerita tipo 1 identificada en la imagen ASTER y en color negra la firma espectral proveniente de la USGS

Tabla 11

*Puntos característicos de absorción y reflectancia de esfalerita tipo 1*

Puntos característicos	Longitud de onda micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	
Absorción	0.7	
Reflectancia		0.85
Reflectancia		1.65
Reflectancia		2.05
Absorción	2.10	
Reflectancia		2.2
Reflectancia		2.3

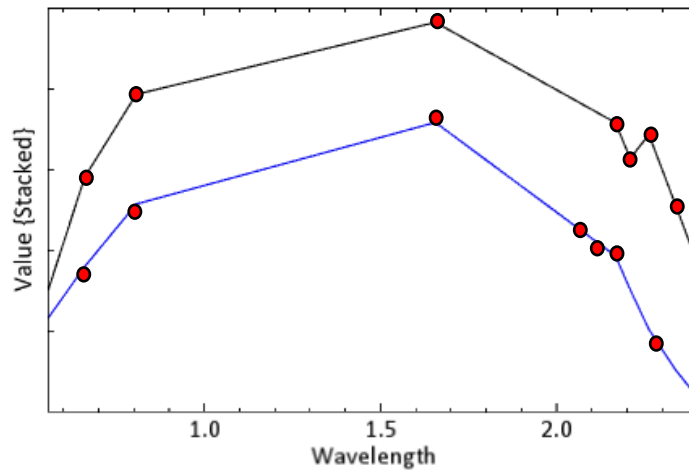


Figura N° 17. Comparación espectral de la esfalerita tipo 2.

En la siguiente figura se observa la comparación de espectros de esfalerita tipo 2, en color azul se aprecia el espectro de esfalerita tipo 2 identificada en la imagen ASTER y en color negra la firma espectral proveniente de la USGS.

Tabla 12

*Puntos característicos de absorción y reflectancia de esfalerita tipo 2.*

Puntos característicos	Longitud de onda micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	
Absorción	0.70	
Reflectancia		0.80
Reflectancia		1.70
Reflectancia		2.00
Absorción	2.15	
Reflectancia		2.25
Reflectancia		2.30

## Pirita

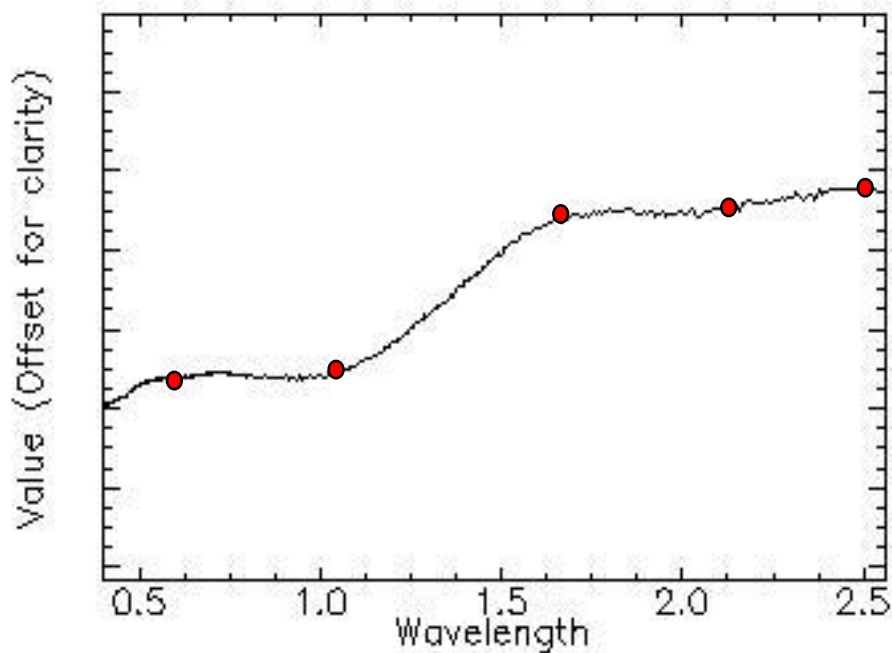


Figura N° 18. Firma espectral de pirita con puntos de absorción y reflectancia característicos (USGS, 2019).

La pirita es un mineral del grupo de los sulfuros cuya fórmula química es  $\text{FeS}_2$ . Se compone de un 53,48 % de azufre y un 46,52 % de hierro. Frecuentemente macizo, granular fino, algunas veces subfibroso radiado; reniforme, globular, estalactítico. Insoluble en agua, y magnética por calentamiento. Tiene una forma cúbica, las caras a veces cementadas, también a menudo en octaedros, piritoedros (doce caras pentagonales) y raramente icosaedro (veinte caras triangulares). A menudo maclada, masiva, radiada, granular, su color es amarillo latón y su brillo es metálico, dureza: es duro 6-6,5, de manera que no se exfolia, y las fracturas son de forma concoidea (de concha). Color raya: verde negruzco, diafanidad: opaco.

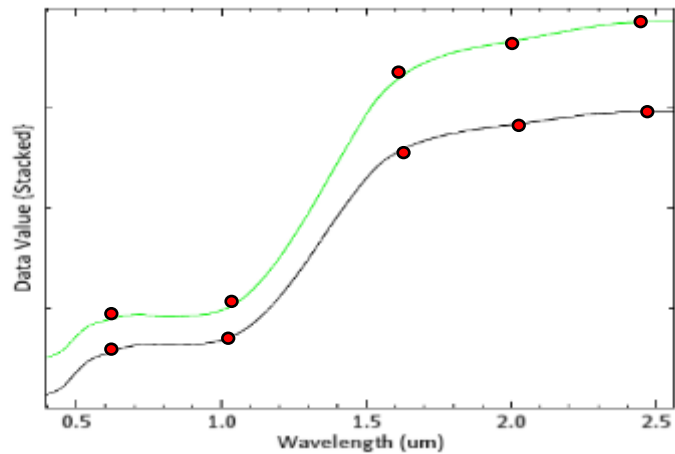


Figura N° 19. Comparación espectral de la pirita.

En la siguiente figura se observa la comparación de espectros de pirita, en color verde se aprecia el espectro de pirita identificada en la imagen ASTER y en color negra la firma espectral proveniente de la USGS.

Tabla 13

*Puntos característicos de absorción y reflectancia de la pirita*

Puntos característicos	Longitud de onda micrómetros ( $\mu\text{m}$ )	
Absorción	0.7	
Reflectancia		0.85
Reflectancia		1.65
Reflectancia		2.05
Absorción	2.10	
Reflectancia		2.2
Reflectancia		2.3



### CAPÍTULO III. RESULTADOS

Se presenta a continuación los resultados de la ubicación espacial de minerales acidogénicos encontrados en la zona de estudio.

En la siguiente figura se aprecia en color azul la distribución espacial de la esfalerita tipo 1 en la zona de estudio, observándose que abarca por lo general la zona central y zona sur este del distrito de San Bernardino

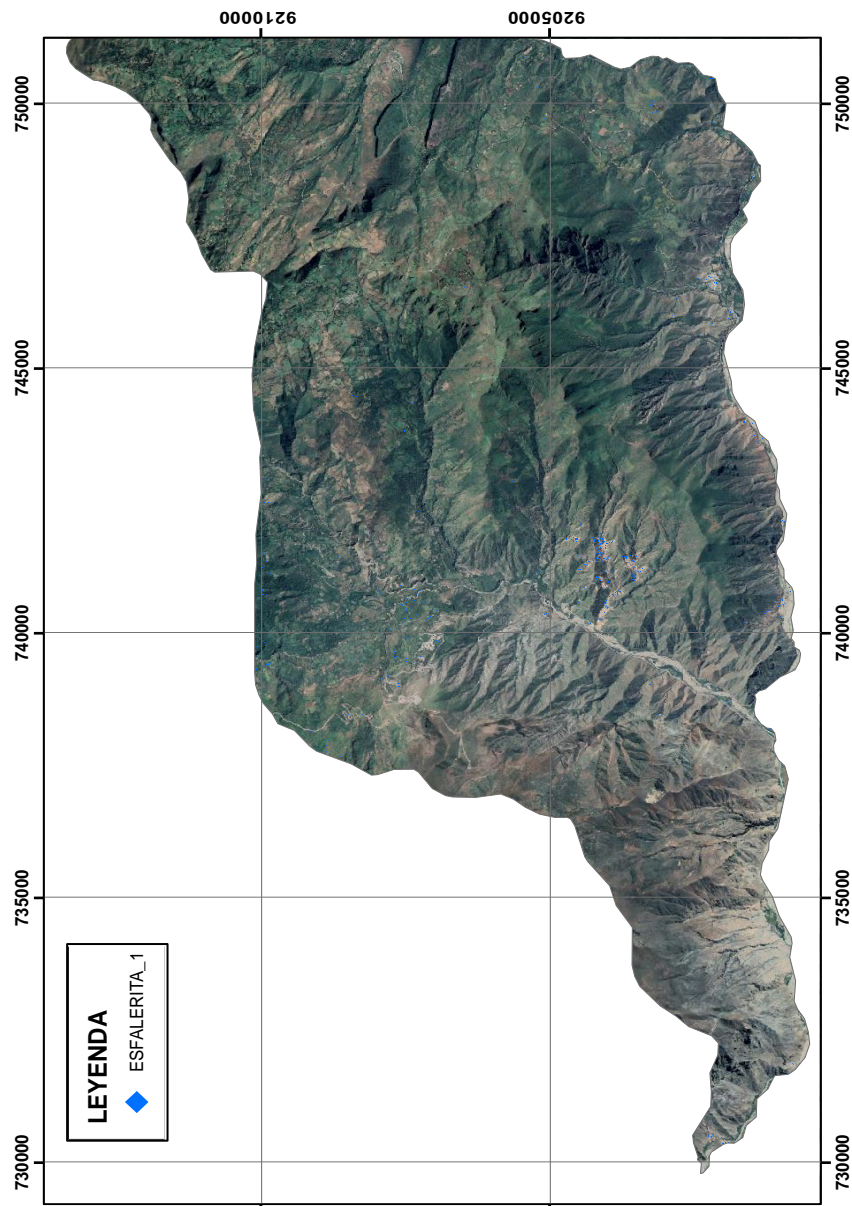


Figura N° 20. Representación espacial de calcopirita en la zona de estudio.

En la siguiente figura se observan los resultados de la esfalerita tipo 2, en color azul se representa su distribución espacial en la zona de estudio, observándose que abarca por lo general la zona central del distrito de San Bernardino

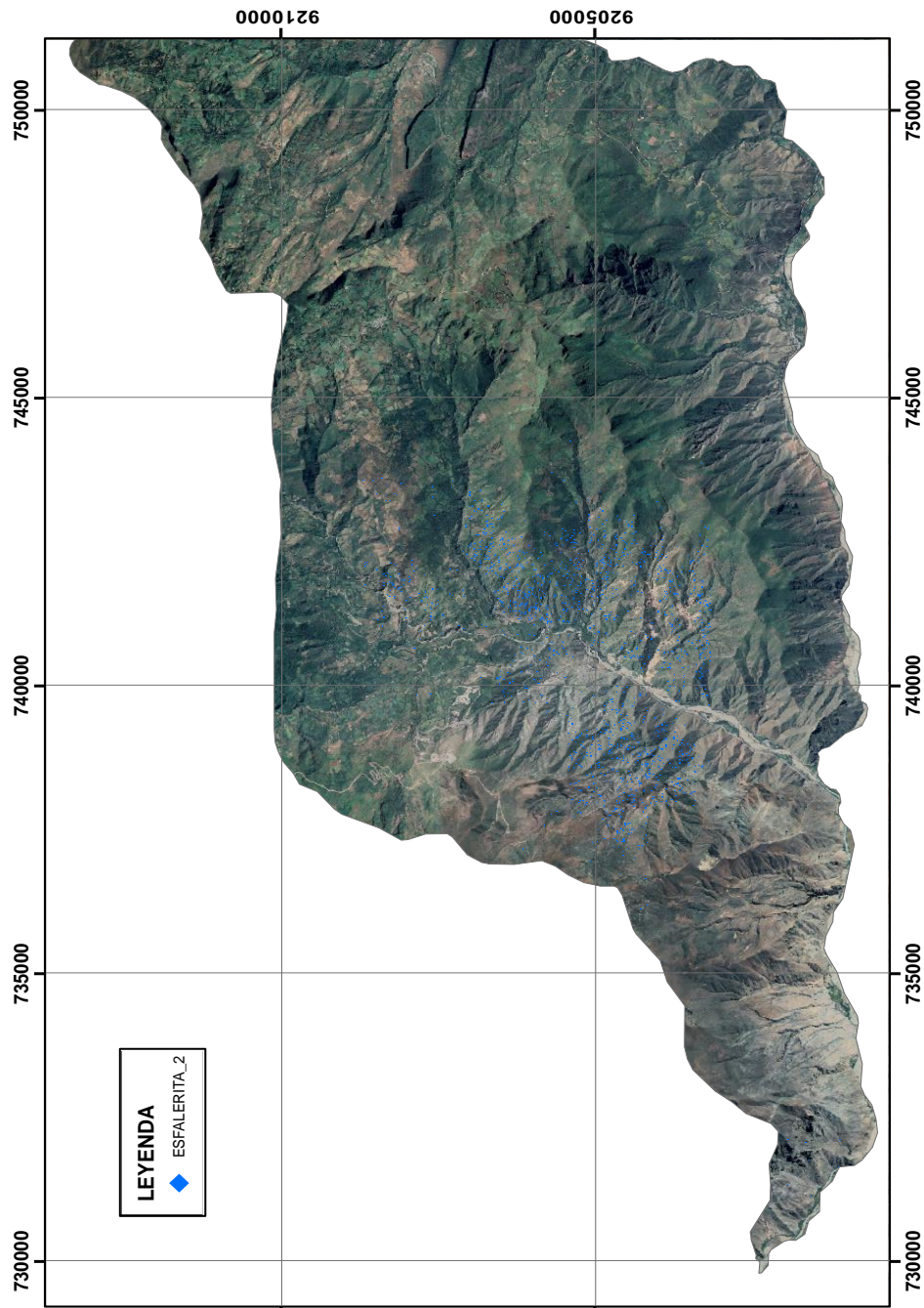


Figura N° 21. Representación espacial de esfalerita tipo 2 en la zona de estudio.

En la siguiente figura se observan los resultados de la calcopirita, en color amarillo se representa su distribución espacial en la zona de estudio, observándose que abarca por lo general la zona central y la zona sur este del distrito de San Bernardino

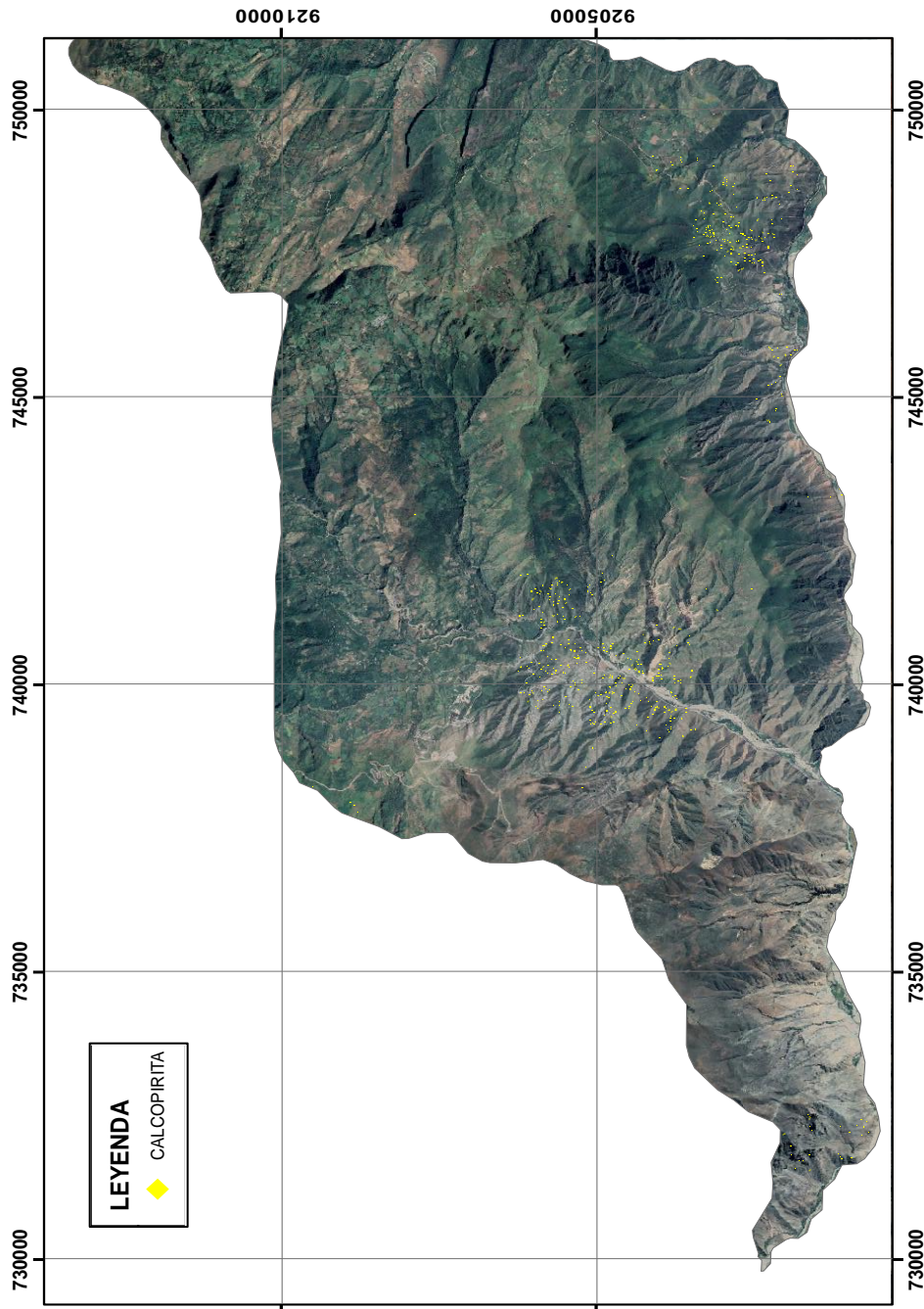


Figura N° 22. Representación espacial de calcopirita en la zona de estudio.



En la siguiente figura se observan los resultados de la pirita, en color verde se representa su distribución espacial en la zona de estudio, observándose que abarca por lo general la zona central zona sur oeste y la zona sur este del distrito de San Bernardino

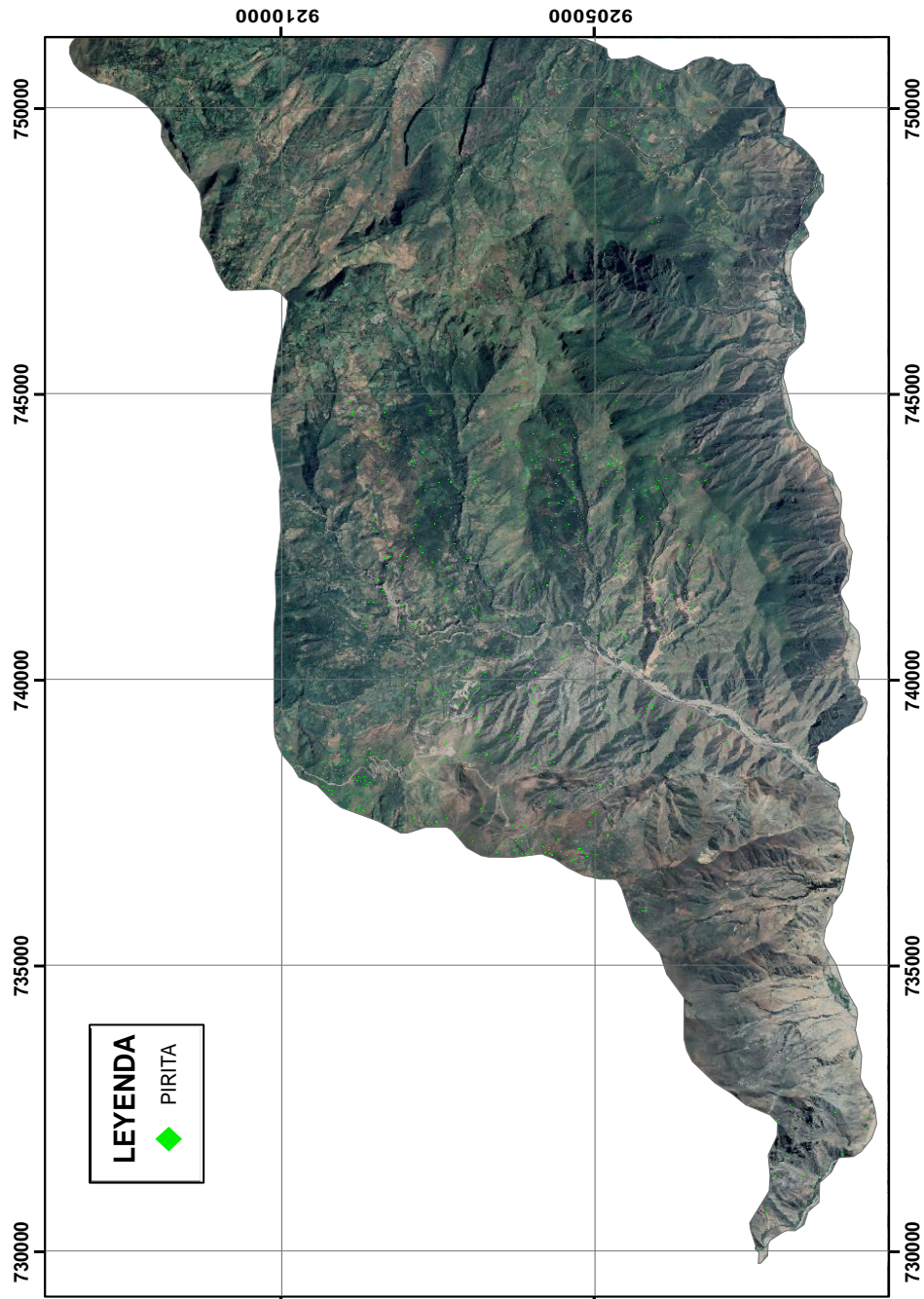


Figura N° 23. Representación espacial de pirita en la zona de estudio.

En la siguiente figura se observan los resultados del cinabrio, en color rojo se representa su distribución espacial en la zona de estudio, observándose que abarca por lo general la zona central del distrito de San Bernardino

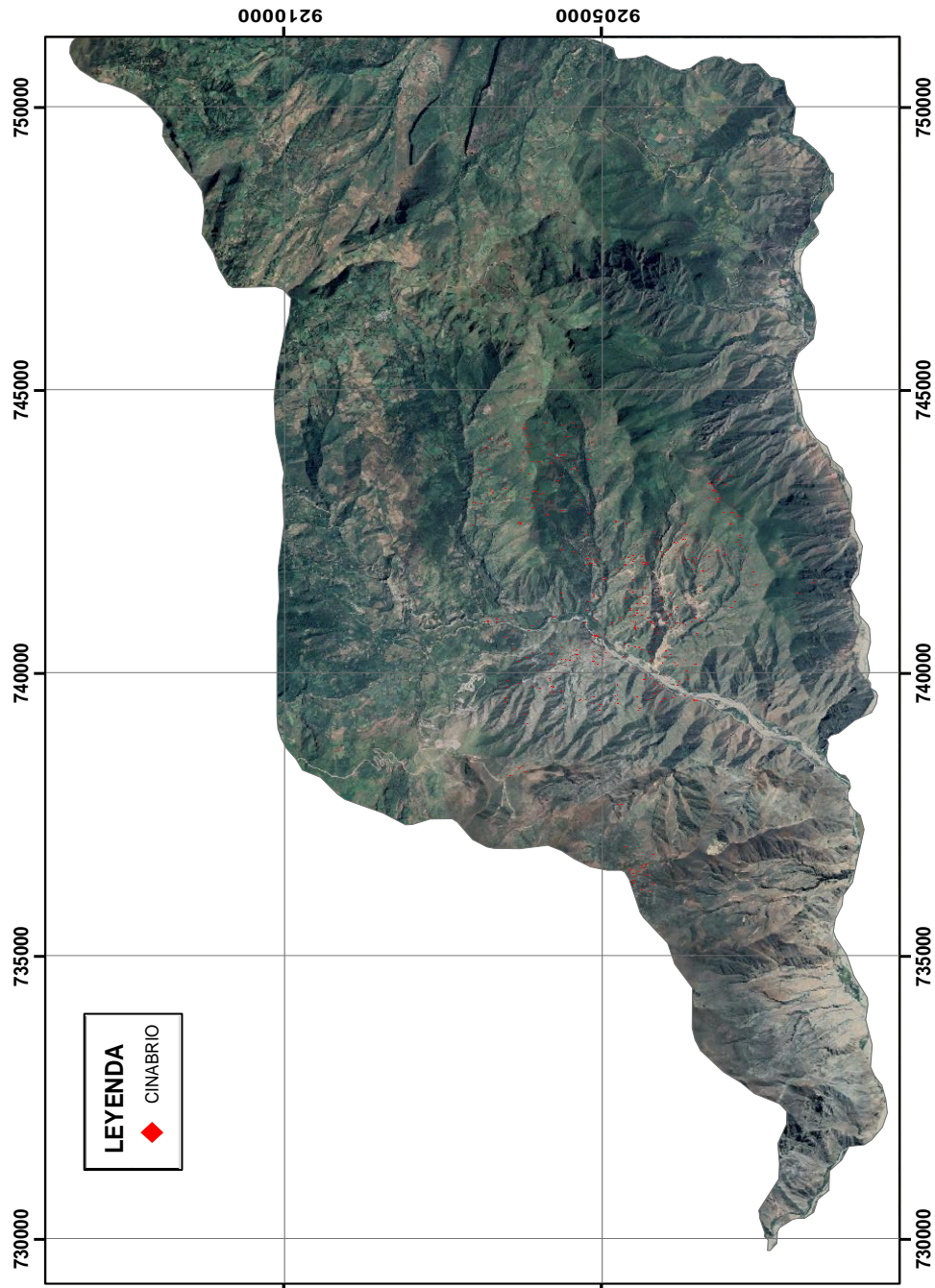


Figura N° 24. Representación espacial del cinabrio en la zona de estudio.

En la siguiente figura se observan los resultados generales de todos los minerales acidogénicos encontrados en la zona de estudio teniendo como minerales a la pirita, calcopirita, esfalerita y cinabrio, observándose que estos minerales tienen su mayor concentración en la zona central y zona sur este del distrito de San Bernardino.

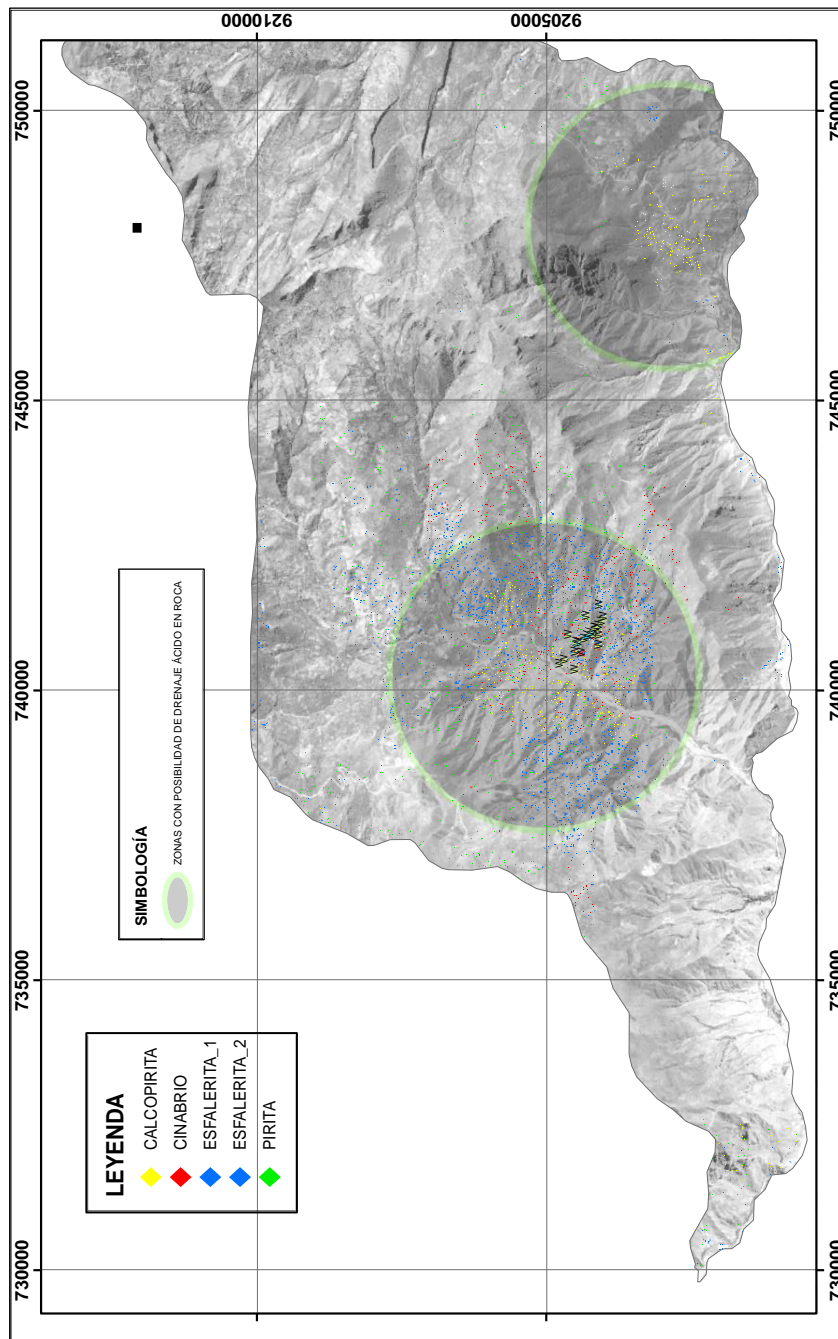


Figura N° 25. Concentración de minerales acidogénicos en la zona de estudio.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

El conocimiento anticipado de la posibilidad de que una característica mineral o componente de mina, generará drenaje ácido es esencial para prevenirlo. Es por ello que es necesario la caracterización mineralógica de una zona para definir de manera correcta la amplitud del impacto.

La predicción del potencial de generación ácida y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva minera, ambiental y también desde la económica.

En el Perú, recientemente se ha reconocido la magnitud de los impactos ambientales adversos del drenaje ácido de roca contaminado. Se ha reconocido también que puede haber considerables implicancias económicas en los requerimientos para dar solución al drenaje ácido en un asiento minero.

La identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas mineras correctivas según (Grandia et al., 2009 & Dold, 2010).

Además, la identificación prematura y la incorporación de medidas de control, pueden reducir las obligaciones financieras de mantener instalaciones de recolección y tratamiento a largo plazo generando eficiencia en el desarrollo minero; Es importante que tanto la compañía minera como las autoridades competentes efectúen las pruebas suficientes y apropiadas para garantizar que todos los problemas potenciales hayan sido identificados y tratados.

Sin embargo, debe reconocerse que, en la predicción del drenaje ácido de roca, se intenta predecir el comportamiento de sistemas complejos y naturales, que varían de



asiento a asiento y hasta de tipo de mineral a tipo de mineral dentro de un mismo asiento minero.

Es por ello que la investigación planteó una nueva técnica limpia predictiva de bajo costo que mediante la percepción remota permita caracterizar mineralógicamente zonas donde exista posibilidad de generación de drenaje ácido de roca.

Encontrándose en esta; minerales como pirita, calcopirita, esfalerita y cinabrio que son minerales acidogénicos que se encuentran expuestos a la oxidación superficial concordando con (Murray, 2006), el cual plantea que una de las causas principales de la generación de acidez de roca es la presencia de minerales expuestos a oxidación. Estos minerales son mineralógicamente predispuestos a la generación de acidez por su estructura molecular débil y composición elemental que permite la liberación de acidez por oxidación.

Estas transformaciones físicas, químicas y biológicas, dan origen a drenaje ácido de roca que no solo se caracteriza por su pH sino que contienen elevadas concentraciones de Fe, Al, SO<sub>4</sub>, además de Zn, Mn, Mg, Cu, Cd, Pb y As, que provienen de la disolución de sulfuros y otros minerales asociados.

Estos efluentes son una de las principales fuentes potenciales de biodisponibilidad de elementos contaminantes, que degradan la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Dado que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizada la vida de la explotación, es conveniente estudiar su generación y realizar un inventario de los puntos de descarga, así como determinar sus características principales.

Por tal motivo se buscó definir si estas zonas con presencia de sulfuros están relacionadas a la ubicación zonas de minería inactiva o residuos mineros abandonados.



Determinándose así lo siguiente:

Tabla 14

Residuo y labor minera en el distrito de San Bernardino

N°	Tipo	Subtipo	Este	Norte
1	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740468.00	9204739.00
2	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740553.00	9204785.00
3	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740867.00	9204401.00
4	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	741052.00	9204139.00
5	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740910.00	9204203.00
6	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	741402.00	9204101.00
7	RESIDUO MINERO	RELAVES	740311.00	9204682.00
8	RESIDUO MINERO	RELAVES	740086.00	9204182.00
9	LABOR MINERA	BOCAMINA	741061.00	9204156.00
10	LABOR MINERA	BOCAMINA	740937.00	9204193.00
11	LABOR MINERA	BOCAMINA	741102.00	9204113.00
12	LABOR MINERA	BOCAMINA	740437.00	9204784.00
13	LABOR MINERA	BOCAMINA	740654.00	9204517.00
14	LABOR MINERA	BOCAMINA	740343.00	9204526.00
15	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740654.00	9204517.00
16	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	741806.00	9204469.00
17	LABOR MINERA	BOCAMINA	740819.00	9204490.00
18	LABOR MINERA	BOCAMINA	741267.00	9204324.00
19	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	741267.00	9204331.00
20	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740934.00	9204084.00
21	LABOR MINERA	BOCAMINA	740940.00	9204100.00
22	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	741181.00	9204011.00
23	LABOR MINERA	BOCAMINA	741167.00	9204055.00
24	LABOR MINERA	BOCAMINA	741249.00	9204022.00
25	LABOR MINERA	BOCAMINA	741467.00	9204097.00
26	LABOR MINERA	BOCAMINA	740508.00	9204704.00
27	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740502.00	9204602.00
28	LABOR MINERA	MEDIA BARRETA	740636.00	9204406.00
29	LABOR MINERA	TAJEO COMUNICADO	740805.00	9204459.00
30	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	740811.00	9204467.00
31	LABOR MINERA	BOCAMINA	740872.00	9204361.00
32	LABOR MINERA	CHIMENEA	740928.00	9204296.00
33	LABOR MINERA	TAJEO COMUNICADO	740981.00	9204251.00
34	LABOR MINERA	BOCAMINA	741071.00	9204175.00
35	LABOR MINERA	BOCAMINA	740769.00	9204105.00
36	LABOR MINERA	BOCAMINA	740952.00	9204635.00

En la tabla 14 se evidencia la presencia de 36 puntos con presencia de labores y residuos mineros en la zona de estudio.

Los cuales al ubicarlos en el plano de minerales obtenido mediante la técnica de percepción remota nos evidencia que:

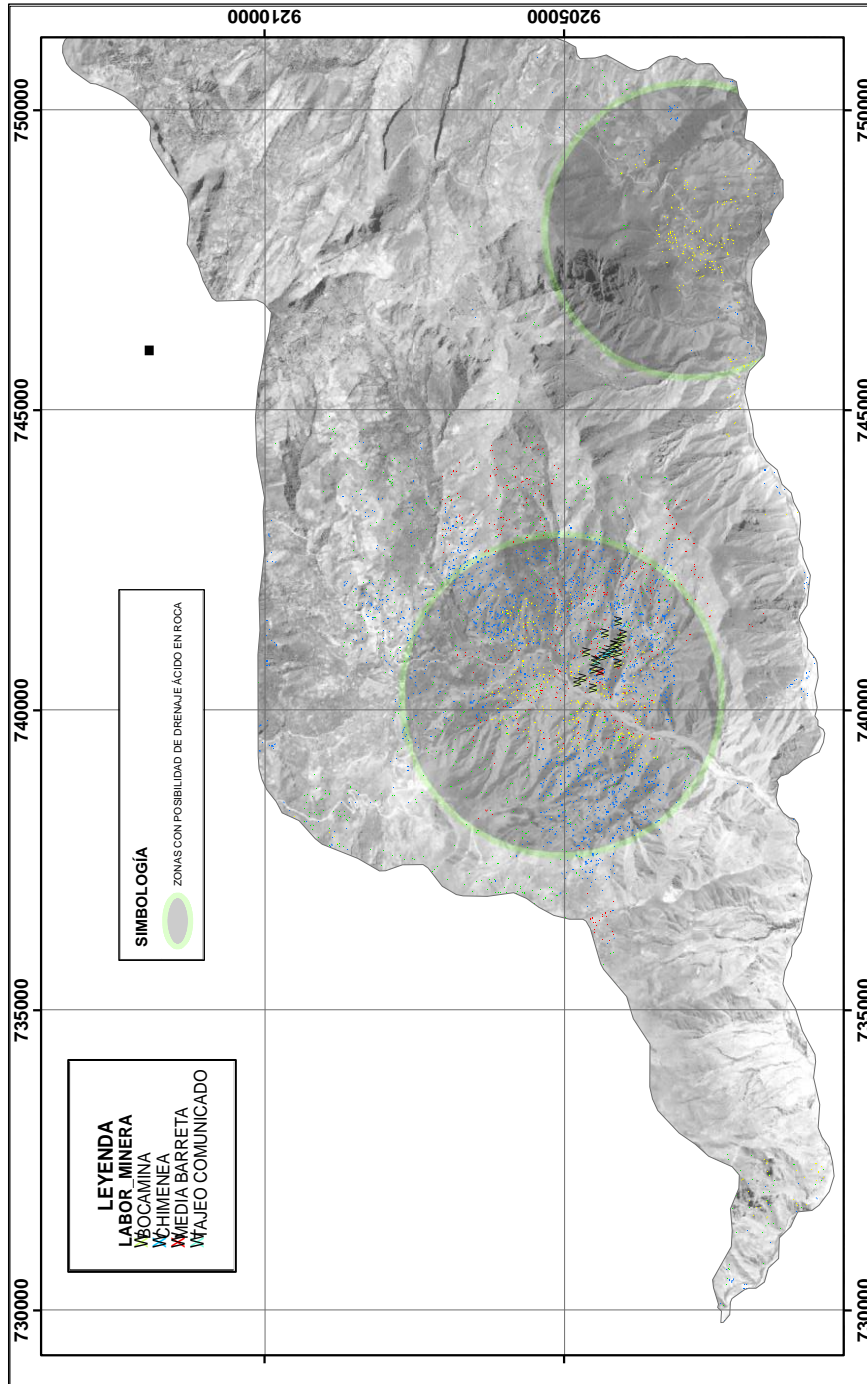


Figura N° 26. Concentración de minerales y zonas con presencia de labores mineras.

Por lo general las zonas que presentan mayor acumulación de mineral expuesto a oxidación, corresponden a zonas con presencia de labores mineras como bocaminas, tajos o chimeneas; además estas zonas además de presentar labores mineras presentan también puntos con residuo minero no controlado lo cual vendría a ser una causa de la exposición a superficie de estos minerales acidogénicos

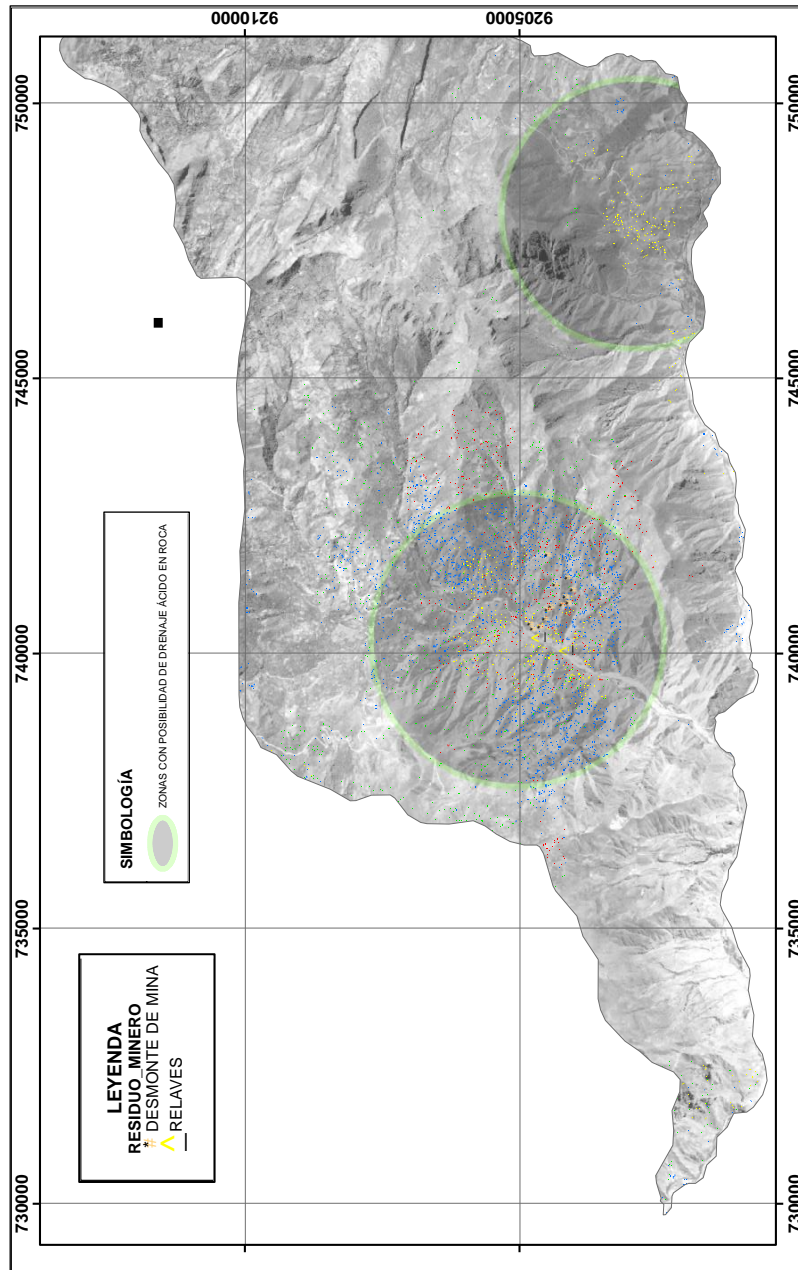


Figura N° 27. Concentración de minerales y zonas de relave y desmonte.

A partir de los resultados también se llegó a determinar dos zonas con posibilidad de drenaje ácido minero a partir de la caracterización mineralógica de la zona, determinándose la primera en la zona central del distrito de San Bernardino y la segunda en la zona sur este del mismo distrito, concordando con MEM-Perú, (1995), el cual enfatiza la importancia de ubicar las zonas con posibilidad de drenaje ácido de roca los cuales deberían tener frecuencia y monitoreo en zonas o sitios dedicados a la minería y o actividades antrópicas que generen la oxidación de minerales acidogénicos.

## 4.2. Conclusiones

Se concluye del presente estudio que a partir de la caracterización mineralógica mediante percepción remota y el uso de espectros de minerales sulfurosos es posible determinar zonas con posibilidad de drenaje ácido de roca en el distrito de San Bernardino.

Se llega a la conclusión que los minerales generadores de ácido de roca por lo general comprenden minerales de Hierro, Cobre, Plomo, Molibdeno, Antimonio, Mercurio y Zinc que contengan en su estructura sulfuro, estos minerales tienen predisposición a la acidez por su estructura molecular y su composición elemental que permite la liberación de moléculas de acidez.

Se determinaron minerales como pirita, calcopirita, cinabrio y esfalerita en la zona central, sur oeste y sur este del distrito de San Bernardino, minerales que fueron identificados haciendo uso de la percepción remota, concluyéndose así que si es posible identificar minerales que generan acidez, pero con cierta limitante pues las librerías espectrales aun no contienen todas las firmas espectrales de los minerales que contienen sulfuro en su estructura

Se identificaron dos zonas con mayor acumulación de minerales acidogénicos, concluyéndose que estas zonas están relacionadas a la presencia de labores mineras y/o residuo minero que exponen estos minerales sulfurosos a la oxidación superficial.

## REFERENCIAS

- Adams, J. (1975). *Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock forming minerals*. Infrared and Raman Spectroscopy of Lunar and Terrestrial. Academic Press, In: Karr, C. (Ed), New York, 91-116.
- Aguilar, H. y Mora, R. (2016). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo flash de software Envi. *Revista Geográfica de América Central*, 10 (11), 39-59.
- Bravo, N. (2017). *Teledetección espacial*. Huanuco: Copyright ©.
- Clark, R., Gallagher, A., and Swayze. (1990). *Material absorption band depth mapping of imaging spectrometer data using a complete band shape least. Squares fit with library reference spectra*. USA, NASA-JPL, 90(54), 176-186.
- Diaz, J. y Castrejon, A. (2018). *Teledetección de minerales generadores de acidez y metales pesados, usando imágenes satelitales Áster en el distrito de Bambamarca, Cajamarca-2018* (Tesis de pregrado). Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.
- Dold, B., (2010). Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. *Institute of Applied Economic Geology (GEA)*. 80 (232), 173-198.
- Grandia, F., Salas, J., Arcos, D., Archambault, A. & Cottard, F., (2009). Impacto del drenaje ácido de explotaciones mineras en la cuenca del Río Margarita y Embalse de Hatillo (República Dominicana). *Bol. Geol. Minero*, 120 (4): 595-606.
- Grove, C., Hook, S. and Paylor, I. (1992). *Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometer*. NASA-JPL, 92(2), 300.

Hernandez, R., Fernandez, C. y Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6<sup>ta</sup> Edición). Chile: Mc Graw Hill Education.

Hunt, G. (1977). *Spectral signatures of particular minerals in the visible and near-infrared*. *Geophysics*, 42, 501-513.

Hunt, G. and Salisbury, J. (1971). *Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, II. Carbonates*. *Modern Geology* 2, 23-30.

Hunt, G., Salisbury, J. and Lenhoff, C. (1971). *Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, III. Oxides and Hydroxides*. *Modern Geology* 2, 195-205.

Hunt, G., Salisbury, J. and Lenhoff, C. (1973). *Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, VII. Additional Silicates*. *Modern Geology* 4, 85-106.

Hunt, G., Salisbury, J. and Lenhoff, C. (1974). *Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, IX. Basic and Ultrabasic igneous rocks*. *Modern Geology* 5, 115-126.

Hurtado, J. (2002). *El proyecto de investigación holística*. Bogotá: Cooperativa Editorial Magisterio.

Lottermoser, B. (2010). *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. Australia: Springer

Ministerio de Energía y Minas de Perú (MEM-Perú), (1995). *Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas*.

Meijerink, A. (2007). *Remote Sensing Applications to Groundwater*. Pariz: UNESCO.

Murray Moncrieff, V. (2006) *The effect and economics of the use of permanganate passiva tion on acid rock drainage as demonstrated in the epa's multi-cell*



*technology evaluation at the gilt edge mine site* (Tesis doctoral), University of Nevada, Nevada, Estados Unidos.

Rejas, J. (2014). *Detección de patrones y anomalías espectrales del terreno mediante espectrometría de imagen de alta resolución* (Tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de canales y puertos, Madrid, España.

Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D. & Harían, J. (1974). Monitoring the vernal advancement andretrogadation (Greenwave effect) of natural vegetation. Greenbelt, MD. USA, NASA/GSFCT.

Servicio Geológico De Los Estados Unidos. (2014). Teledetección. Recuperado de: <https://www.usgs.gov/>

Servicio Geológico De Los Estados Unidos. (2018). Imagen ASTER. Recuperado de: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

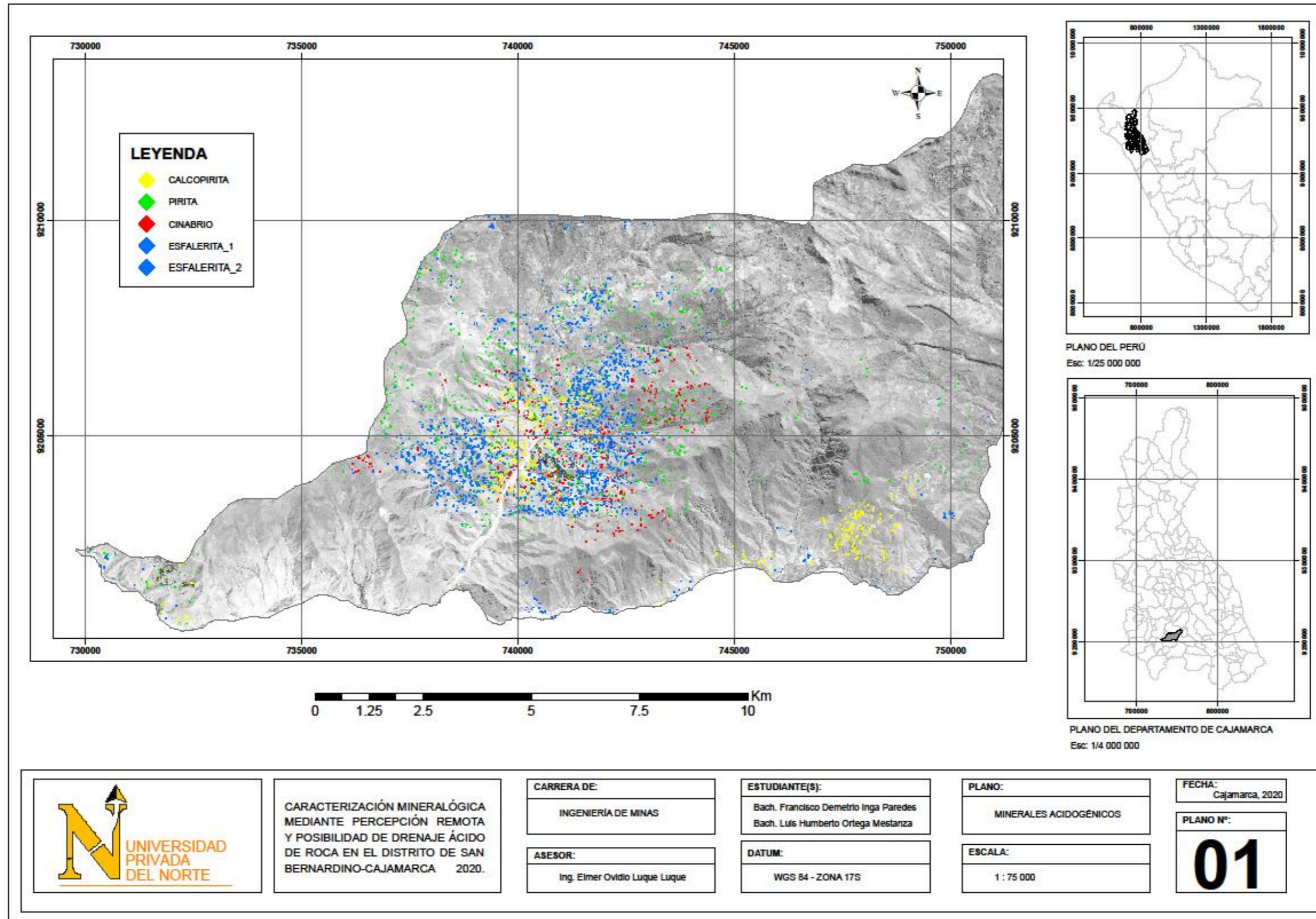
Servicio Geológico De Los Estados Unidos. (2019). Librería Espectral. Recuperado de: <https://www.usgs.gov/labs/spec-lab>

Vilca, S. (2014). *Caracterización mineralógica, geoquímica y posibilidad de drenaje ácido de roca, en pasivos mineros del cerro Yanaorcco* (Tesis de maestría). Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

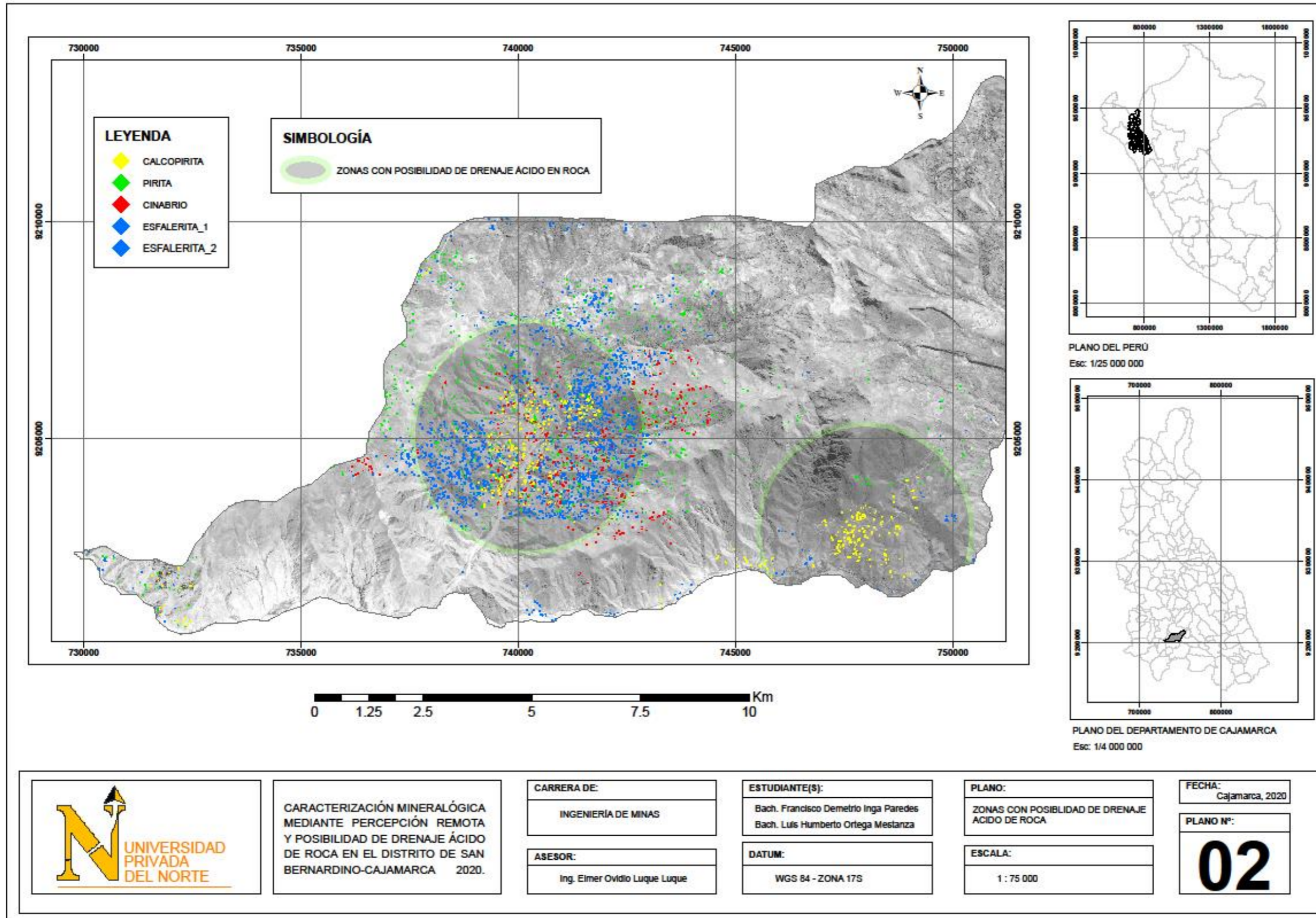
Wolkersdorfer, C. (2006). *Water management at abandoned flooded underground mines*. Germany.



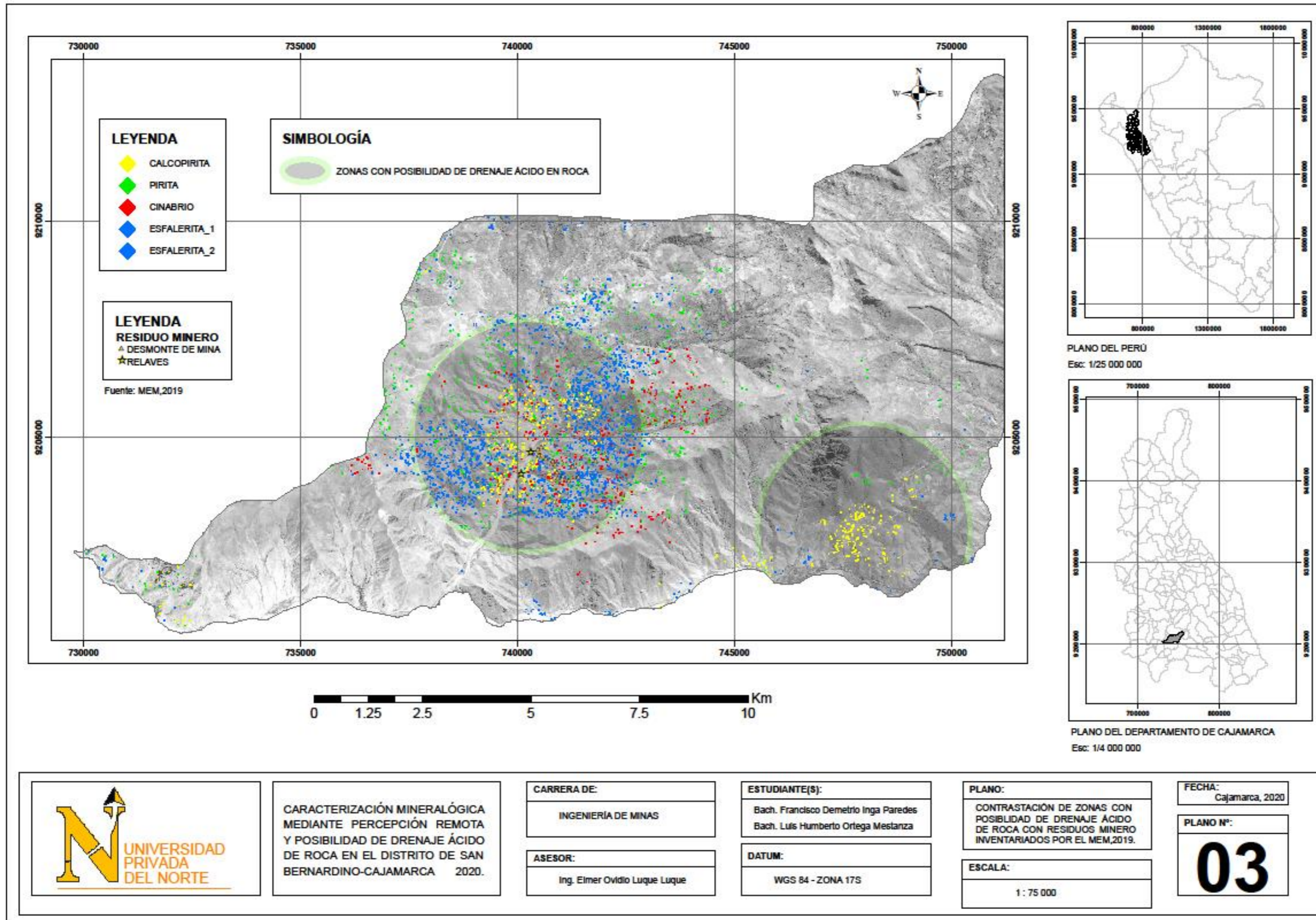
## ANEXOS











CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA Y POSIBILIDAD DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA EN EL DISTRITO DE SAN BERNARDINO-CAJAMARCA 2020.

**CARRERA DE:**  
INGENIERÍA DE MINAS

**ASESOR:**  
Ing. Elmer Ovidio Luque Luque

**ESTUDIANTE(S):**  
Bach. Francisco Demetrio Inga Paredes  
Bach. Luis Humberto Ortega Mestanza

**DATUM:**  
WGS 84 - ZONA 17S

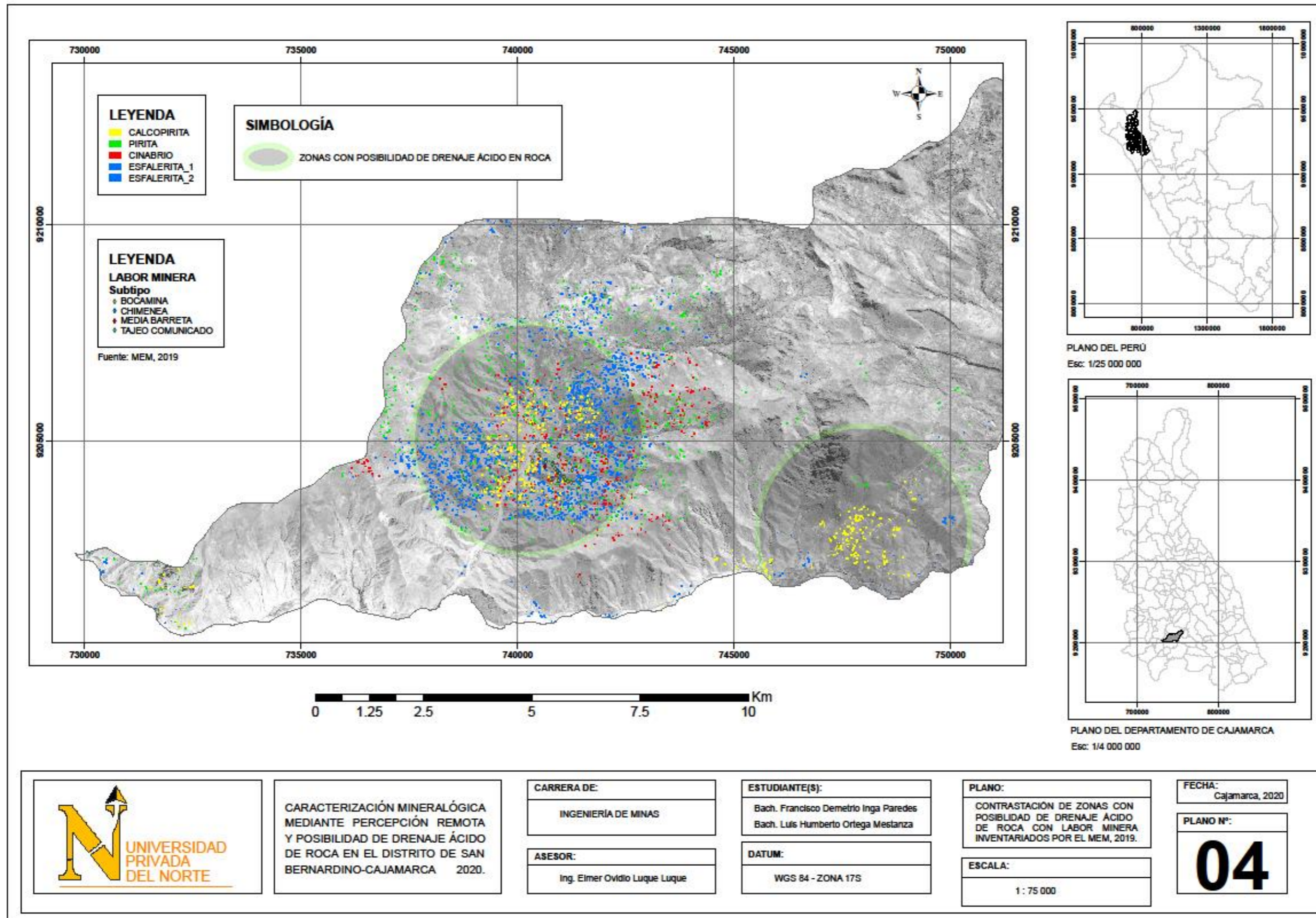
**PLANO:**  
CONTRASTACIÓN DE ZONAS CON POSIBILIDAD DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA CON RESIDUOS MINEROS INVENTARIADOS POR EL MEM,2019.

**ESCALA:**  
1 : 75 000

**FECHA:**  
Cajamarca, 2020

**PLANO N°:**  
**03**





CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA Y POSIBILIDAD DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA EN EL DISTRITO DE SAN BERNARDINO-CAJAMARCA 2020.

CARRERA DE:  
INGENIERÍA DE MINAS

ASESOR:  
Ing. Eimer Ovidio Luque Luque

ESTUDIANTE(S):  
Bach. Francisco Demetrio Inga Paredes  
Bach. Luis Humberto Ortega Mestanza

DATUM:  
WGS 84 - ZONA 17S

PLANO:  
CONTRASTACIÓN DE ZONAS CON POSIBILIDAD DE DRENAJE ÁCIDO DE ROCA CON LABOR MINERA INVENTARIADOS POR EL MEM, 2019.

ESCALA:  
1 : 75 000

FECHA:  
Cajamarca, 2020

PLANO N°:  
**04**