



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“TELEDETECCIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES DE ORIGEN QUÍMICO UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 EN LA PROVINCIA DE HUALGAYOC-2017”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Ramírez Meléndez Edwin Elvis

Bach. Villena Llaxa Elvis

Asesor:

Msc. Ing. Deicy Sánchez Espinoza

Cajamarca – Perú
2017

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por los Bachilleres: **Ramírez Meléndez Edwin Elvis y Villena Llaxa Elvis**, denominada:

“TELEDETECCIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES DE ORIGEN QUÍMICO UTILIZANDO IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8 EN LA PROVINCIA DE HUALGAYOC-2017”

Msc. Ing. Deicy Sánchez Espinoza
ASESOR

Ing. Gary Christiam Farfán Chilicaus
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán
JURADO

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñon
JURADO

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación a mi madre Buenaventura, quien me apoyo durante mi carrera profesional, a mis abuelitos Concepción e Hipólito, quienes me inculcaron valores y principios para la vida, y a mi hermano Diego, quien fue pilar importante en mi formación académica, gracias a su apoyo integro.

Ramírez Meléndez Edwin Elvis

Dedico este proyecto de investigación a mi padre, así como a mi tío quienes me apoyaron durante mi carrera profesional, también a mis abuelitos Levi y María, quienes me inculcaron valores y principios para la vida, quienes fueron el motivo y la razón para seguir adelante en mi formación académica, gracias a su apoyo integro.

Villena Llaxa Elvis

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres y familiares por su apoyo moral, durante todo nuestro camino y darnos fuerzas para superar obstáculos y dificultades a lo largo de nuestras vidas, quienes nos enseñaron a no desfallecer, ni rendirnos ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos.

A nuestra asesora la ingeniera Deicy Sánchez, agradecer por su tiempo y valiosa guía para el asesoramiento a la realización de la misma.

Por otro lado, queremos agradecer a nuestra alma mater, La Universidad Privada del Norte, la cual nos proporcionó las herramientas necesarias para desarrollarme profesionalmente, a nuestros docentes, quienes contribuyeron al logro de nuestra formación profesional

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE FOTOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1 Realidad problemática.....	13
1.2 Formulación del problema.....	14
1.3 Justificación	14
1.4 Limitaciones.....	14
1.5 Objetivos.....	14
1.5.1 Objetivo general	14
1.5.2 Objetivos específicos	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 Antecedentes	16
2.2 Bases teóricas	18
2.2.1. Pasivos Ambientales Mineros.	18
2.2.2. Fundamentos Físicos de la Teledetección.....	27
2.2.3. Características de los Satélites Landsat 8	31
2.2.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	33
2.2.5. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)	34
2.2.6. Definición de términos básicos	36
2.3 Hipótesis.....	37
CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	38
3.1. Ubicación:.....	38
3.2. Población.....	39
3.3. Accesibilidad	39
3.4. Recursos naturales	41
3.5. Hidrografía.....	42
3.6. Mineralogía regional.....	43

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	45
4.1. Operacionalización de variables	45
4.2. Diseño de investigación	46
4.3. Unidad de estudio	46
4.4. Población.....	46
4.5. Muestra (muestreo o selección)	47
4.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.....	47
4.7. Procedimientos y análisis de datos.....	48
4.7.1 Calibraciones la imagen satelital.....	48
4.7.2 Análisis espectral de minerales.....	52
4.7.3 Análisis de probabilidad vs improbabilidad de los minerales más representativos asociados a los PAMs de origen químico.....	55
4.7.4 Cálculo del índice de vegetación (NDVI)	65
4.7.5 Cálculo del índice de agua (NDWI).....	67
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	69
5.1 Minerales representativos encontrados en los PAMs de origen Químico.	69
5.2 Metales asociados a los principales minerales encontrados en la zona de estudio.....	70
5.3 PAMs identificados que más afectan los cuerpos de agua de Hualgayoc.	71
5.4 PAMs identificados que más afecta la vegetación en Hualgayoc.....	72
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN	73
6.1 Minerales representativos encontrados en los PAMs de origen Químico.	73
6.2 PAMs identificados que más afectan los cuerpos de agua de Hualgayoc	73
6.3 PAMs identificados que más afecta la vegetación en Hualgayoc.....	74
CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS.....	78
ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tipos de pasivos ambientales	18
Tabla 2: Numero de PAMs en cada cuenca de la región Cajamarca.	21
Tabla 3: Pasivos Ambientales Mineros por provincias y distritos – Región Cajamarca.	21
Tabla 4: Sulfuros característicos que generan contaminación	23
Tabla 5: Características del Satélite Landsat 8.....	32
Tabla 6: Características de las imágenes Landsat 8.	33
Tabla 7: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.	39
Tabla 8: Marco operacional de variables e indicadores.....	45
Tabla 9: Características de las imágenes Landsat 8 para la presente investigación.....	49
Tabla 10: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.	51
Tabla 11: Sulfuros característicos que generan contaminación	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El espectro electromagnético.....	28
Figura 2: Firmas espectrales características.	30
Figura 3: Ubicación de la zona de estudio cuadrángulo 14f-14g.....	38
Figura 4: Accesibilidad..	40
Figura 5: Imagen Landsat 8 – barrido completo sin corrección atmosférica ni tratamiento para su procesamiento en él Envi 5.3.	50
Figura 6: Imagen Landsat 8 – barrido completo con corrección atmosférica de la zona de estudio.	50
Figura 7: Recorte de la zona de trabajo - imagen Landsat 8 Corregida.	51
Figura 8: Firmas espectrales de minerales contaminantes:	52
Figura 9: Firmas características de los diferentes materiales en la zona.....	54
Figura 10: Comparación de firmas espectrales para la covelina.....	55
Figura 11: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la covelina.....	55
Figura 12: Zonas minerales con presencia espectral de Covelina.	56
Figura 13: Comparación de firmas espectrales para la calcopirita.	57
Figura 14: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la calcopirita.	57
Figura 15: Zonas minerales con presencia espectral de Calcopirita.....	58
Figura 16: Comparación de firmas espectrales para la pirita.....	59
Figura 17: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la pirita.....	59
Figura 18: Zonas minerales con presencia espectral de Pirita.....	60
Figura 19: Comparación de firmas espectrales para la pirita asociada a limonita.	61
Figura 20: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la pirita-limonita.....	61
Figura 21: Zonas minerales con presencia espectral de Pirita con alteración de limonita.....	62
Figura 22: Comparación de firmas espectrales para la galena.....	63
Figura 23: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la galena.....	63
Figura 24: Zonas minerales con presencia espectral de Galena.....	64

Figura 25: Análisis espectral de NDWI para la zona de estudio	66
Figura 26: Análisis espectral de NDWI para la zona de estudio	68
Figura 27: Análisis espectral de minerales en la zona de estudio	69
Figura 28: Análisis espectral de elementos contaminantes	70
Figura 29: PAMs de origen químico que afectan al agua	71
Figura 30: PAMs de origen químico que afectan la vegetación.....	72

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: bocamina - labor minera con presencia de zonas oxidadas.....	84
Foto 2: Labor minera sin control de cierre de operaciones.....	84
Foto 3: Cerro Carolina, alteración de la vegetación por relaves.....	83
Foto 4: Bocamina sin control de cierre de operación con presencia de aguas acidas.....	83
Foto 5: Alteración de la vegetación por relaves.....	84
Foto 6: Toma de puntos Hulgayoc.....	84

RESUMEN

La presente investigación tuvo por objetivo utilizar técnicas de teledetección como herramienta previa a la identificación de Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) a través de análisis de firmas espectrales en minerales, cuerpos de agua y tipos de vegetación. La investigación se realizó dentro de los cuadrángulos 14F y 14G de la provincia de Hualgayoc, región Cajamarca, Perú. En la investigación se utilizó una imagen Landsat 8 WRS-2 del año 2016, el barrido fue realizado por el satélite Landsat 8 con Path / Row (9/65), imagen recopilada de la USGS (U.S. Geological Survey) de la NASA, la imagen no presentaba ningún tipo de tratamiento, por lo cual se realizó una corrección atmosférica, (con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles), geométrica y radiométrica (en la cual se descompuso la imagen en valores de niveles digitales); luego se realizó el recorte de la zona de interés y se procedió a elegir los posibles minerales más representativos de la zona de la librería espectral del software. Para determinar los niveles de abundancia de agua y vegetación, se utilizaron: El Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), así como firmas espectrales. Todos estos parámetros dentro de las imágenes satelitales fueron procesados por medio del programa ENVI 5.3. Los resultados mostraron que los minerales más representativos en la zona fueron: Covelina, calcopirita, piritita, piritita- limonita y galena, encontrándose en mayor proporción Galena y los principales metales asociados a los minerales fueron: Cobre, hierro y plomo; siendo el más abundante el hierro. Así también se identificaron los principales cuerpos de agua en la zona y los tipos de vegetación donde se emplazarían los PAMs, de ello se determinó, que los principales PAMs más cercanos a cuerpos de agua y que tendrían suelos pobres en términos de vegetación, serían los ubicados en : Rio Llaucano en las coordenadas (774000, 9265000), Rio Arascorque (767000, 9254000), Rio de la quebrada (772000, 9265000), y Rio el tingo (762000, 9254000), por lo cual serían los de mayor prioridad para la remediación ambiental. Con estos resultados, esta investigación pretende ser una fuente de consulta y una guía metodológica para ser utilizada en la localización y priorización de PAMs.

ABSTRACT

The objective of this research was to use remote sensing techniques as a tool prior to the identification of old mines (Mining Environmental Liabilities) through the analysis of spectral signatures in minerals, bodies of water and vegetation types. The investigation was carried out within the quadrangles 14F and 14G of the province of Hualgayoc, Cajamarca region, Peru. In the research, a Landsat 8 WRS-2 image from the year 2016 was used, the sweep was done by the Landsat 8 satellite with Path / Row (9/65), image compiled from the USGS (US Geological Survey) of NASA. The image did not present any type of treatment, for which atmospheric, geometric and radiometric correction was made. This with the purpose of eliminating the effect of the aerosols, and decomposed into values of digital levels. Then, we choose the most representative minerals of the area and we compared the shape with the spectral library of the software. To determine the levels of abundance of water and vegetation, we used, Normalized Water Differential Index (NDWI), and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as well as spectral signatures. All these parameters within the satellite images were processed through the ENVI 5.3 program. The results showed that the most representative minerals in the area were Covelina, chalcopyrite, pyrite, pyrite-limonite and galena, with Galena being in a greater proportion. The main metals associated with the minerals were: copper, iron and lead; being iron the most abundant. Then, we identified the main water bodies in the area and the types of vegetation, where the old mines would be located. Finally, we observed that the main old mines closest to bodies of water and with poor soils in terms of vegetation, would be the located in: Rio Llaucano in the coordinates (774000, 9265000), Rio Arascorque (767000, 9254000), Rio de la Quebrada (772000, 9265000), and Rio el Tingo (762000, 9254000). These points would be the highest priority for environmental remediation. With these results, this research aims to be a source of consultation and a methodological guide to be used in the location and prioritization of old mines.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Realidad problemática

En el Perú existen 8854 Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) de los cuales en Cajamarca se ubican 1183 y en la provincia de Hualgayoc 1067 PAMs (MEM, 2016). Del total de PAMs en el sector minero, 7.531 casos carecen de responsables y estudios ambientales. (El comercio, 2017).

Los PAMs son aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas y pueden estar compuestos por 3 tipos de componentes: infraestructura, residuo minero y labor minera; de los cuales nos centraremos en los PAMs de origen químico que son los que pertenecen al tipo labor minera. (Ley N° 28271, 2005).

Un pasivo ambiental minero se genera cuando una actividad minera y abandona el lugar donde operaba sin reparar los daños ambientales que ocasionó. Estos pasivos pueden contaminar el agua, el suelo, el aire, afectar la salud de la población que vive cerca de ellos e incluso puede perjudicar la propiedad de terceros (Defensoría del pueblo, 2015)

La remediación de PAMs es en la actualidad uno de los 10 principales problemas ambientales del país (Ráez and Dourojeanni, 2016). El gobierno peruano ha destinado un fondo para su remediación y determinar los que más impactan a las poblaciones, sin embargo, hasta la fecha no se tiene una metodología ni parámetros establecidos para determinar cuál pasivo debe ser priorizado. Por ello esta investigación, busca proporcionar una herramienta de fácil aplicación para poder determinar áreas de impacto de PAMs de origen químico. Así mismo, el actual inventario de estos no proporciona información sobre el origen y el área de influencia de estos pasivos; por lo cual la presente investigación utilizará técnicas de teledetección como herramienta previa a la identificación de Pasivos Ambientales Mineros a través de análisis de minerales, cuerpos de agua y tipos de vegetación. Una vez identificados todos estos parámetros, se combinarán en un mapa temático, que nos mostrará las principales zonas con mayor potencial de presencia de contaminación ambiental y las zonas con más prioridad en la remediación de PAMs. Para ello, se utilizarán los parámetros como el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y estado del terreno. Estos parámetros serán obtenidos a través imágenes satelitales, las cuales serán procesada por medio del programa ENVI 5.3 utilizando técnicas espectrales para así poder dar un aporte para generar nuevos métodos de identificación de PAMS de origen químico.

1.2 Formulación del problema

¿Cuán efectivo es el análisis de las imágenes satelitales LANDSAT 8 para detectar pasivos ambientales de origen químico en la provincia de Hualgayoc?

1.3 Justificación

En el Perú se han identificado 8854 PAMs (MEM, 2016). En Cajamarca se identificaron 1183, de los cuales 1067 se encontraron en Hualgayoc. Los PAMs son materia de gran preocupación en Cajamarca y mucho más para la provincia de Hualgayoc, ya que la mayoría de PAMs se encuentran afectando la calidad de aguas de los ríos Tingo Maygasbamba y el río Hualgayoc (Efluente del Río Llaucano) (Aranda, 2017). Tal ha sido el impacto de estos históricos PAMs que han generado que la población se haya levantado, solicitado y logrado la declaración de un estado de emergencia ambiental en toda la provincia de Hualgayoc. (MINAN, 2016).

Aunque se haya declarado un estado de emergencia ambiental, el actual inventario de PAMs no especifican el tipo de componente mineral asociado a cada PAM (Pasivo Ambiental Minero), es por ello que la presente investigación pretende utilizar imágenes satelitales LANDSAT 8 para identificar PAMs de origen químico y así identificar cuáles tienen mayor impacto en el agua, suelo y vegetación usando nuevas técnicas como es la teledetección mediante el uso del software ENVI 5.3 se propondrá nuevos aportes para la ubicación de zonas de contaminación ambiental y la priorización para la remediación de los mismos

1.4 Limitaciones

- Condiciones meteorológicas en las imágenes que muchas veces genera la pérdida de información, sin embargo, esto será corregido con filtros atmosféricos y radiométricos, además de descargar imágenes satelitales en época de estiaje.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

- Utilizar técnicas de teledetección como herramienta previa a la identificación de Pasivos Ambientales Mineros a través de análisis de firmas espectrales en minerales, cuerpos de agua y tipos de vegetación.

1.5.2 Objetivos específicos

- Identificar los minerales con mayor abundancia en zonas de Hualgayoc donde existan Pasivos Ambientales Mineros.

- Identificar y priorizar PAMs que estén afectando a cuerpos de agua superficial de la provincia de Hualgayoc.
- Identificar y priorizar PAMs que estén afectando la vegetación de la provincia de Hualgayoc

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

La universidad Pinar del Río-Cuba, llevó a cabo una investigación para determinar principales zonas afectadas por pasivos ambientales mineros utilizando el método de Fotointerpretación. El trabajo tuvo el propósito de evaluar, desde el punto de vista minero-ambiental, el medio físico en el yacimiento pirítico polimetálico Santa Lucía (Pinar del Río, Cuba), el cual fue explotado a cielo abierto y hoy constituye un pasivo ambiental y una fuente potencial de degradación del medio. Se caracterizaron los depósitos de barita, el material oxidado del sombrero de hierro, las escombreras, frentes de canteras y antiguo socavón de exploración. Para la caracterización se emplearon los métodos de fotointerpretación, compilación de datos del estado actual del medio ambiente, descripción geotectónica detallada del yacimiento y áreas aledañas. Se pudo establecer la existencia de dos zonas, una de impacto intenso y otra de impacto atenuado. La generación de drenaje ácido y la contaminación de las aguas con elevados niveles de toxicidad, figuran entre los impactos más importantes, por lo que entre las medidas de rehabilitación se propone el tratamiento de las aguas para consumo humano por estar contaminadas por metales pesados (Milián, *et; al*, 2012).

El Instituto Tecnológico de Monterrey-México, realizó un estudio de caracterización de niveles de contaminación en una planta extractora de azufre utilizando imágenes de satélite de alta resolución para optimizar el plan de muestreo. Este estudio fue desarrollado en una mina de azufre abandonada en Jáltipan, Veracruz, que operó desde los años 50 hasta principios de los 90. Como era común en esa época, no había preocupación alguna sobre los impactos ambientales por la actividad de extracción, embalaje y envío de azufre. De ésta manera, de las 400 ha de la propiedad, aproximadamente el 20 % quedó afectada por derrames de azufre. El trabajo involucró dos aspectos: a) la determinación de las áreas contaminadas dentro y alrededor de la mina usando datos de alta resolución y SIG y b) la determinación de los volúmenes de material que requirieron trabajos de remediación. Los resultados indicaron que el volumen a remediar dependerá de los objetivos de limpieza que impongan las autoridades ambientales correspondientes. Sin embargo, de acuerdo con los resultados es posible considerar como técnicamente viable la posibilidad de establecer como límite objetivo de remediación una acidez de 200 mg CaCO₃ y/o pH 4. Esto implicará el remover las principales fuentes de contaminación: los depósitos de carbón y azufre, los "vats" y los derrames de azufre. Dadas las condiciones del terreno, los procesos naturales permitirán neutralizar los suelos impactados y permitir el crecimiento de la cubierta vegetal (Bremer, *et; al*, 2016).

La Universidad Nacional de la Plata, llevo a cabo una investigación que consistió en la evaluación de tres índices de vegetación, como estimadores de cambios. Usando diferentes tipos de cobertura vegetal en la provincia de Loja al sur de Ecuador. Los índices empleados fueron: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI, Índice de Estrés Hídrico MSI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo SAVI, aplicados a imágenes satelitales provenientes de dos sensores, Landsat 7 ETM+ y ASTER. Dando como resultado que los tres índices presentan diferencias para cada cobertura vegetal, también que los tres índices de vegetación permiten caracterizar y discriminar los diferentes tipos de cobertura vegetal analizados, aunque el SAVI en coberturas menos densas, a pesar de ser un índice que incorpora un coeficiente de corrección del efecto suelo, no discriminó mejor las coberturas que el NDVI. Además, que la diferencia entre imágenes satelitales usadas es que en la imagen ASTER se obtienen muestras de coberturas vegetales más homogéneas (Gonzaga, 2014).

Una investigación realizada en España en Andalucía, tuvo como objetivo principal evaluar las posibilidades de aplicación de la Teledetección espacial al estudio de aguas litorales complejas, especialmente las ligadas a ámbitos estuarinos (estuario del Tinto-Odiel en Huelva), centrándose fundamentalmente en algunos parámetros para caracterizar su calidad, como (turbidez, sólidos en suspensión y clorofila) en la zona de estudio a partir de datos medidos in situ e imágenes de satélite obteniendo como resultado la caracterización hidrodinámica del río de Huelva y la Bahía de Cádiz, identificándose la disposición más común de las masas de agua en ambos espacios y llegando a encontrar un comportamiento homogéneo del agua en la Ría de Huelva. (Sánchez, 2015).

La Universidad Nacional Mayor de San Marcos realizo una investigación en el distrito de Villa María del Triunfo, en la cual se estimó la zona potencial para cubrirse con vegetación de lomas, por análisis de verdor, realizado mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), de imágenes satelitales, en la cual se determinó dos superficies con potencial de cubrirse de vegetación denominadas "normal" y "extraordinaria", clasificadas según la presencia e intensidad extraordinaria del fenómeno El Niño. Esta estimación determinó que 2221.3 ha de superficie cuentan con el potencial de cubrirse con vegetación en temporada de lomas normal, y 4099.6 ha de lomas extraordinarias como máxima extensión de la cobertura durante el fenómeno El Niño 1997-1998. (Miyashiro & Ortiz, 2016)

2.2 Bases teóricas

2.2.1. Pasivos Ambientales Mineros.

En Perú se consideran como PAM todas aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras actualmente abandonadas o inactivas que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad. (Art. 2º de la Ley N° 28271).

2.2.1.1. Tipos de pasivos ambientales mineros

Se considera 3 tipos de PAMs y más de 10 subtipos, según MEM (2016), como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Tipos de pasivos ambientales

TIPO	SUBTIPO
LABOR MINERA	Bocaminas, chimeneas, piques, tajeos comunicados, trincheras y tajos abiertos
RESIDUO MINERO	Relaves, Desmontes de mina, botaderos de lixiviación
INFRAESTRUCTURA	Campamentos, oficinas, talleres, plantas de procesamiento y otras instalaciones relacionadas con el proyecto minero

Fuente: El Ministerio de Energía y Minas

De las cuales los PAMs de tipo Labor minera y residuo minero, tienen amplia relación con la mineralización de la zona que explotamos pues el elevado contenido de los sulfuros en Au, Ag, Fe, Cu, Zn y Pb han provocado su explotación y aprovechamiento por parte del hombre, originando procesos que incrementan enormemente los procesos de oxidación de los sulfuros, produciendo acidez, sulfatos, metales y metaloides tóxicos, pero en cantidades mucho mayores debido a la creación de grandes escombreras con residuos de extracción minera y la creación de kilómetros de túneles y galerías por los que penetra el oxígeno atmosférico, los métodos de explotación y tratamientos

empleados históricamente (como las teleras), la excavación de grandes cortas a cielo abierto, las plantas de fundición y las balsas de residuos de la actividad hidrometalúrgica, todas estas generan la desestabilización de los sulfuros y en consecuencia una contaminación difícil de controlar. (Oyarzun, *et al*, 2011). A continuación, detallaremos cada uno de los tipos de PAMs.

Bocamina: Es el espacio físico por donde se hace el ingreso a una mina subterránea. Se puede decir que es el límite entre el espacio exterior y el espacio interior donde se realizan las actividades mineras de explotación de minerales. Sus características están en función del tamaño (ancho x alto) que le dan facilidades para los accesos de los trabajadores, los equipos de transporte para la extracción del mineral y/o los camiones.

Chimenea: Es una perforación vertical que se ejecuta en la roca y que tiene la misión de comunicar a más de una galería en el interior de las minas subterráneas, las que salen a superficie generalmente sirven para la ventilación de la mina.

Corte: Es el área cercana a la bocamina (ingreso), que por su estructura y composición es similar a un rajo.

Depósito de desmonte: Es el área ocupada por los materiales extraídos del interior de la mina o del área de explotación a tajo abierto, que no contiene valores extraíbles u/o que su extracción no es económica, por lo que se han dispuesto en un lugar donde no se realizan actividades de explotación.

Depósito de relave o relavera: Es el área ocupada por los materiales (de grano fino) sin valor, que se obtiene, como producto de los procesos de concentración de minerales, estos relaves se han dispuesto en forma de pulpa, eliminando el agua después de la sedimentación de los sólidos. Su disposición exige generalmente la construcción de una presa de sostenimiento, la misma que por lo general se construye con el mismo material grueso que está contenido en la pulpa.

Edificaciones e instalaciones: Son las construcciones tales como: planta concentradora, laboratorios, campamentos, oficinas, talleres, almacenes, suministro de energía y agua.

Rajo: Es el área de explotación superficial, por lo general de los afloramientos de minerales de veta y que tienen dimensiones pequeñas. Consisten en cortes alargados.

Socavón: Es la labor horizontal de ingreso a una mina subterránea.

Tajo abierto: Es la depresión o cavidad dejada por la explotación de minerales desde la superficie del suelo.

2.2.1.2. PAMs en el Perú

En el Perú existen 8854 PAM, inventariados hasta el año 2016, de los cuales 6783 PAMs están pendientes de Gestión (76.1%), 2071 PAMs en gestión (23.39%), 91 PAMs en reaprovechamiento (1.03%), 671 PAMs encargados para remediación (MEM + Activos Mineros SAC) 7.58%, 1309 PAMs que están dentro de un instrumento de Gestión Ambiental aprobado (14.78%). (Dirección General de Minería, 2016)

Problemática Ambiental y Conflicto en la región Cajamarca

La región Cajamarca, ubicada en la sierra norte del país, es la segunda región a nivel nacional con el mayor número de pasivos ambientales mineros, después de Ancash. (MEM, 2016)

De acuerdo al inventario publicado por el Ministerio de Energía y Minas en marzo del 2016, en la región Cajamarca hay 1075 PAMs. En el intervalo del año 2014 al año 2015 se habrían incorporado 27 nuevos PAMs y remediado 2 PAMs. Los PAMs posiblemente remediados corresponderían al PAM "Panda" del distrito de Pucará en la provincia de Jaén, y el PAM "Ushcumachay" del distrito de Chugur de la provincia Hualgayoc.

Un aspecto a destacar del Inventario Nacional es la identificación de PAMs a nivel de cuencas, y en el caso de la región Cajamarca, se consideran 06 cuencas. Las cuencas con mayor número de PAMs son la cuenca del río Llaucano, que tiene 972 PAMs inventariados, seguido de la cuenca del Crisnejas con 45 PAM y del Jequetepeque con 29, tal como se puede apreciar en la Tabla 02.

Tabla 2: Número de PAMs en cada cuenca de la región Cajamarca.

Cuencas	N° PAMs
Chicama	1
Crisnejas	45
Jequetepeque	29
Llaucano	972
Motupe - La Leche - Chancay	10
Zaña	8
TOTAL	1075

Fuente: (MINEM, 2015). Resolución Ministerial N° 102-2015-MEM/DM.

A nivel de provincias, de las trece provincias que conforman la región, en ocho de ellas se encuentran PAMs. Considerando el inventario del MINEM y del Gobierno Regional de Cajamarca, la provincia Hualgayoc es la que tiene el mayor número de PAMs, alrededor de 970 PAMs, y se concentra en la provincia de Hualgayoc, tal como se puede apreciar en la Tabla 3.

Tabla 3: Pasivos Ambientales Mineros por provincias y distritos – Región Cajamarca.

PROVINCIA	DISTRITO	N° PAMs
Cajabamba	Cachachi	23
	Cospan	1
Cajamarca	Encañada	23
	Calquis	18
San Miguel	Chumuch	4
Celendín	Contumazà	2
	Cupisnique	1
Contumazà	Chugur	12
	Hualgayoc	960
Bambamarca	Hualgayoc	960

Santa Cruz	Pulan	10
San Pablo	San Bernardino	29
TOTAL		1083

Fuente: (MINEM, 2015). Resolución Ministerial N° 102-2015-MEM/DM

2.2.1.3. Generación de pasivos ambientales de origen químico.

Los sulfuros son minerales poco frecuentes en la corteza terrestre. Sin embargo, en ciertas situaciones la abundancia de estos minerales aumenta, llegando a convertirse en mayoritarios. El elevado contenido de los sulfuros en Au, Ag, Fe, Cu, Zn y Pb ha provocado su explotación y aprovechamiento por parte del hombre a lo largo de la historia. La pirita (FeS_2) es el sulfuro más común en la naturaleza encontrándose en formaciones hidrotermales, rocas ígneas y depósitos sedimentarios. (Aduvire, 2006)

Los sulfuros son estables y muy insolubles bajo las condiciones reductoras que existen en el subsuelo. Pero la exposición de estos minerales a condiciones atmosféricas desestabiliza su estructura mediante reacciones de oxidación. El agente oxidante para que se produzca este proceso puede ser el oxígeno (O_2) o el hierro férrico (Fe^{3+}). (Aduvire, 2006)

Por otro lado, los metales rara vez se suelen encontrar en estado puro en la naturaleza, sino que se encuentran formando parte de la estructura de los minerales. La actividad minera se inicia con la extracción del mineral, que posteriormente debe ser concentrado y purificado para su uso comercial mediante el procesado o beneficio del mineral y la metalurgia extractiva.

Todos estos procesos incrementan enormemente los procesos de oxidación de los sulfuros, produciendo acidez, sulfatos, metales y metaloides tóxicos, pero en cantidades mucho mayores debido a la creación de grandes escombreras con residuos de extracción minera y la creación de kilómetros de túneles y galerías por los que penetra el oxígeno atmosférico, los métodos de explotación y tratamientos empleados históricamente (como las teleras), la excavación de grandes cortas a cielo abierto, las plantas de fundición y las balsas de residuos de la actividad hidrometalúrgica, todas estas generan la desestabilización de los sulfuros. (Aduvire, 2006)

Estos procesos de contaminación constituyen uno de los más graves por su naturaleza, extensión y dificultad de resolución, así como por los costes económicos de su remediación tradicional. Los ríos y suelos afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por su acidez, así como por el alto contenido en sulfatos y metales pesados además del contenido metálico. Los

daños producidos varían desde alteraciones subletales para algunos individuos de los ecosistemas afectados en los casos de polución muy débil, con problemas asociados de bioacumulación y de biomagnificación hasta la desaparición de la fauna terrestre y fluvial, así como la pérdida de los recursos al tornarse inservible el agua y suelo para el uso humano, agrícola o industrial.

Tabla 4: Sulfuros característicos que generan contaminación

SULFUROS	FÓRMULA
Argentita	S ₂ Ag ₂
Bornita	S ₄ Cu ₅ Fe
Galena	SPb
Esfalerita	SZn
Calcopirita	S ₂ CuFe
Pirrotita	SFe _{1-x}
Covelina	SCu ₂
Estibina	S ₃ Sb ₂
Pirita	S ₂ Fe
Marcasita	S ₂ Fe
Molibdenita	S ₂ Mo
Silvanita	Te ₂ (Au, Ag)
Calaverita	Te ₂ Au

Fuente: Elaboración propia

La pirita es el mineral con mayor incidencia sobre el potencial generador de contaminantes ácidos en PAM de origen químico por su tendencia oxidarse fácilmente una vez expuesta a la intemperie.

2.2.1.4. Riesgos y daños ambientales de un PAM

Constituye un potencial riesgo de contaminación ambiental, riesgo para la salud humana, efectos negativos en la fauna, así como la pérdida de bienes y servicios ambientales.

Existen PAMs que contaminan fuentes de agua superficial y subterránea, suelos y el aire de sus alrededores, y otros que han causado daños ambientales, pero el Estado aún no cuenta con adecuados mecanismos y estrategias para su atención. Cabe mencionar que la Ley General del Ambiente define daño ambiental como “todo menoscabo material que sufre el ambiente y/o alguno de sus componentes, que puede ser causado contraviniendo o no disposición jurídica, y que genera efectos negativos actuales o potenciales” (Artículo 142.2 de la Ley N° 28611). Se entiende como sus componentes a los elementos físicos, químicos y biológicos de origen natural o antropogénico que, en forma individual o asociada, conforman el medio en el que se desarrolla la vida.

Para los daños ambientales generados por los PAMs no existe un marco legal de indemnización o reparación. Lo que se viene desarrollando son instrumentos de prevención, remediación y compensación.

a. Contaminación de aguas superficiales y subterráneas:

El mayor riesgo ambiental de los PAMs es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. La contaminación del agua se debe a liberación de contaminantes tóxicos contenidos en los residuos mineros y desde las obras mineras, los tajos abiertos y los socavones entre otros. La contaminación desde un botadero minero es un problema sensible para el país por la cantidad de pasivos ambientales mineros (PAM) que tiene el Perú; además, al tratarse de aguas subterráneas, este problema no se hace visible a corto plazo, lo que retrasa la toma de decisión para la ejecución de medidas de prevención, contención y remediación. Medidas posteriores comprenden el tratamiento ex situ de las aguas contaminadas y, dependiendo de la factibilidad económica y técnica, la reinyección de las aguas tratadas al acuífero. (Montoya, 2013)

Los ríos son corrientes naturales sometidas a los cambios climáticos y a las características propias de la cuenca, la calidad de su agua varía naturalmente a lo largo del tiempo y de su curso debido a la combinación de factores ambientales. Sin embargo, las actividades humanas alteran, a veces de manera irreversible, las

características físicas, químicas y biológicas del ecosistema. (Guzmán *et al.*, 2011).

Los metales pesados ingresan al ambiente acuático principalmente por descargas directas o indirectas de fuentes industriales, siendo la industria minera una de las más importantes (Gómez *et al.*, 2004a).

Los estudios que se han realizado sobre el impacto de la actividad minera por lo general, muestran que el fenómeno más extendido en estos sitios es drenaje de mina ácido que se debe a la oxidación de sulfuros metálicos (Bitton *et al.* 2007).

La liberación de metales de los lugares mineros ocurre, principalmente, a través de drenaje ácido de mina y erosión de desechos en pilas y depósitos de relaves. Cuando estos depósitos contienen sulfuros (pirita) y hay acceso de oxígeno, se obtienen resultados de drenaje ácido de mina (DAM). Dependiendo de la naturaleza de los desechos de rocas y depósitos de relaves, este DAM contendrá elevados niveles de metales pesados.(Romero *et al.*, 2008).

Los drenajes ácidos de mina, por lo general, contienen además de sulfato elevados contenidos de metales disueltos, tales como el cobre, y en algunos casos van acompañados de una gran cantidad de sólidos en suspensión (Romero *et al.*, 2008). Puede ser considerado como un contaminante potencial principal en los sistemas acuáticos, ya que promueve una disminución en el pH natural, altera Eh (potencial de oxidación / reducción), y afecta a la conductividad (Arcega *et al.*, 2010).

El procesamiento de minerales produce una cantidad de residuos y productos que pueden causar la contaminación del agua. La minería rompe y comprime la roca, creando túneles para que el oxígeno, aire y microbios, reaccionen con los minerales. En consecuencia, las rocas pueden generar ácido, movilizándolo a muchos constituyentes químicos, los que podrían contaminar cuerpos de agua por décadas o incluso cientos de años después del cierre de la mina. La roca residual a menudo contiene concentraciones elevadas de sulfatos, metales tóxicos, no metales, y componentes radioactivos. Dicha roca generalmente se desecha en montones en la superficie del suelo, al borde de los tajos o fuera de las obras. Muchos contaminantes se pueden filtrar de estos montones de desecho contaminando las aguas superficiales y subterráneas, formando lo que se conoce como drenaje ácido de mina. Este material muchas veces contiene un pH muy alto (10 a 12), así como concentraciones potencialmente tóxicas de numerosos

metales y no metales, radiactividad, cianuro y compuestos orgánicos relacionados, lo que podría dañar la calidad de agua y organismos acuáticos (Moran, 2001).

b. Degradación de la calidad de los suelos.

Los suelos pueden sufrir un impacto por efectos de la contaminación, y la erosión eólica e hídrica. La contaminación se origina por los contaminantes provenientes de los PAMs que llegan al suelo por el viento o el agua, y por la inadecuada disposición de residuos y químicos sobre el suelo, como desmontes de mina, relaves, pilas de lixiviación y otros residuos. La erosión eólica e hídrica se debe a la destrucción de la capa vegetal protectora de laderas de cerro, zonas de pastoreo, entre otros. (GRUFIDES, 2006)

c. Pérdida de bienes y funciones ambientales.

Comprende la pérdida de bosques, biodiversidad, suelos o fuentes de agua en ecosistemas donde los PAMs se encuentran. Para la inversión óptima en la recuperación de ambientes naturales degradados se requieren ejecutar evaluaciones ambientales y sociales, así como estudios de valoración económica que permita, de alguna manera, compensar los daños.

d. Normativa legal

Las normas legales que regulan los pasivos ambientales mineros son:

Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (Ley N° 28271, de julio del 2004), y sus modificatorias (Ley N° 28526, de mayo del 2005; y D.L. N° 1042, de junio del 2008).

El Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (D.S. N° 059-2005-EM, de diciembre del 2005) y su modificatoria (D.S. N° 003-2009-EM, de enero del 2009). En adelante llamado el Reglamento.

El Decreto Legislativo N° 1042 modificó y adicionó diversos artículos a la Ley N° 28271, con el fin de posibilitar una mayor variedad de modalidades de participación de terceros en la remediación de pasivos ambientales, establecer incentivos para su identificación y remediación, y permitir su reutilización, reaprovechamiento y, uso alternativo o turístico.

El D.S. N° 003-2009-EM modificó el Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera, adecuando, incorporando y desarrollando en su regulación las disposiciones del Decreto Legislativo N° 1042.

Con estas normativas legales se estableció mecanismos para la identificación, la responsabilidad y el financiamiento para la remediación de las áreas impactadas por los pasivos. Así como también la elaboración del Plan de Cierre como instrumento de gestión sujeto a fiscalización y sanción.

Asimismo, para las actuales operaciones mineras, en el 2003 –antes de la regulación de los pasivos ambientales mineros- se establecieron normas que regula el cierre de minas a través de:

- La Ley que Regula el Cierre de Minas (Ley N° 28090) y sus modificatorias (Ley N° 28234 y Ley N° 28507).
- El Reglamento de Cierre de Minas (D.S. N° 033-2005-EM) y sus modificatorias (D.S. N° 035-2006-EM y D.S. N° 045-2006-EM)

2.2.2. Fundamentos Físicos de la Teledetección

2.2.2.1. El espectro electromagnético

La teledetección es la técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma la observación remota puede basarse en energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fue capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. (Sigmur, 2006)

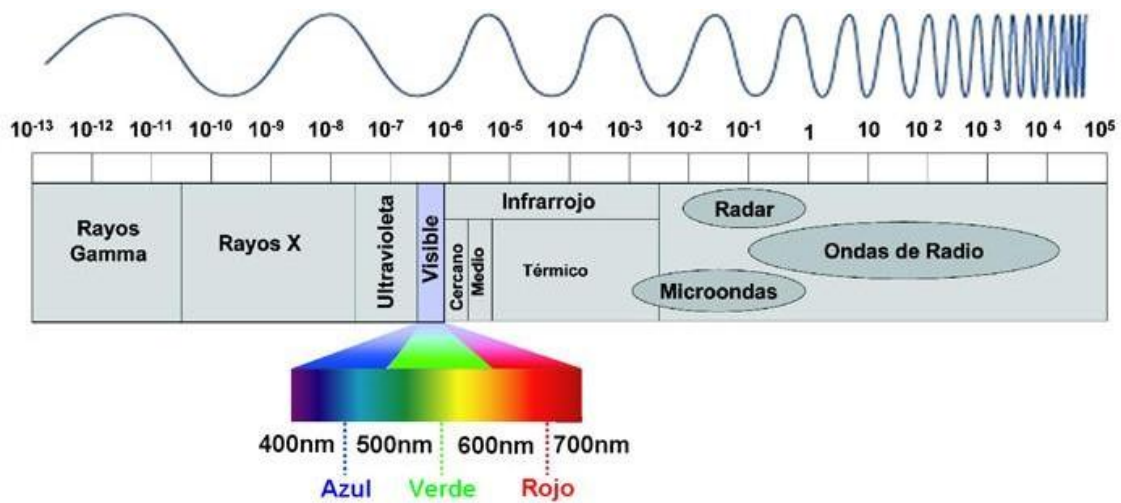


Figura 1: El espectro electromagnético

Fuente: (USGS, 2016)

La banda de radio abarca aquellas longitudes de onda mayores de 10 cm (frecuencias menores de 3 GHz). Esta región es usada principalmente por sensores activos y en menor medida por otros de carácter pasivo. Limitando con la banda de radio nos encontramos con la banda de microondas, extendiéndose hasta las frecuencias de 300 GHz (o equivalentemente, 1 mm de longitud de onda). En esta región las interacciones están gobernadas por rotaciones moleculares y es mayoritariamente usada por radiómetros de microondas y sistema de radar. (Sigmur, 2006)

La región espectral infrarroja se encuentra entre las longitudes de 1 mm y $0.7 \mu\text{m}$. Esta región se suele dividir en subregiones denominadas submilimétrica, infrarrojo lejano, infrarrojo térmico e infrarrojo cercano. En esta región, la rotación molecular y las vibraciones juegan un papel importante. Un gran abanico de sensores emplea estas frecuencias para su operación. El infrarrojo térmico abarca desde $3.0\text{-}12 \mu\text{m}$ y en este rango, la temperatura de la cubierta terrestre (incluida la superficie oceánica) es la variable de mayor interés.

La porción visible del espectro se extiende de $0.4 \mu\text{m}$ hasta $0.7 \mu\text{m}$ que junto con la banda infrarroja es la región con mayor presencia de sensores. En el rango visible, la reflectancia de las plantas está dominada por los pigmentos, entre los que destaca la clorofila. Es por ello que esta banda se emplea, junto con la del infrarrojo cercano, para estudiar el estado de la cubierta vegetal. En el agua, la materia orgánica disuelta atenúa mucho las longitudes de onda más cortas de esta banda espectral. Las partículas suspendidas y los pigmentos presentes en el agua también afectan a la radiación recibida por los sensores que operan en este rango.

En la siguiente banda, la ultravioleta ($0.4 \mu\text{m}$ hasta 300 \AA) los niveles electrónicos de energía juegan un papel clave en las interacciones onda-materia.

Los sensores ultravioletas han sido empleados principalmente para el estudio de atmósferas planetarias o el estudio de superficies sin atmósferas debidas a su opacidad que presentan a estas frecuencias. Esta banda no es empleada demasiado en teledetección debido a que los niveles de luz ultravioleta que podrían captarse no permiten obtener una relación S/N aceptable debido a la absorción producida por el ozono y el bajo nivel de emisión de esta frecuencia por parte del Sol, si lo comparamos por ejemplo con la longitud de onda del azul. Sus posibles aplicaciones son la detección de manchas de petróleo ya que éste absorbe eficientemente la radiación ultravioleta, así como la identificación de rocas o suelos con un alto contenido en hierro.

Los rayos X (300 \AA a 0.3 \AA) y gamma ($< 0.3 \text{ \AA}$) son raramente empleados debido a la opacidad de la atmósfera en estas frecuencias. (Sigmurt, 2006)

2.2.2.2. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga mediante ondas que se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz (300000 Km/s) transportando cantidades discretas de energía. (García, 2013)

2.2.2.3. EL efecto de la atmosfera sobre la energía electromagnética

Este efecto de la atmósfera (atenuación atmosférica) es producido particularmente por la presencia de partículas en suspensión. Las partículas, según su tamaño, afectan distintas longitudes de onda. El caso extremo son las nubes, las cuales pueden ocultar por completo el suelo, aunque cuando son tenues también afectan la transmisión de luz de una manera distinta según las longitudes de onda. (Chuvienco, 2008)

2.2.2.4. Firma espectral

La teledetección se basa en la interacción del espectro electromagnético y la cubierta terrestre. Cuando realizamos un gráfico en el que representamos la cantidad la radiación reflejada por una superficie y la relacionamos con la longitud de onda de la onda electromagnética, obtenemos lo que se denomina firma espectral.

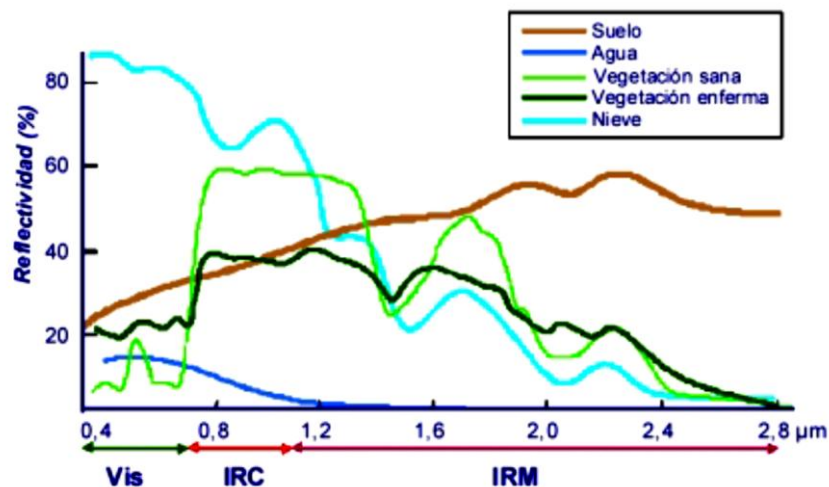


Figura 2: Firmas espectrales características.

Fuente: (USGS, 2016).

Conociendo la firma espectral de la cubierta que necesitamos estudiar, podemos clasificar de manera más o menos sencilla, los píxeles correspondientes a dicha cubierta. Así, citando un ejemplo clásico, la vegetación tiene una firma espectral caracterizada por un pico de reflexión en infrarrojo cercano, lo que permite diferenciarla de otras cubiertas que en el rango del visible tengan una respuesta espectral semejante.

Dentro de la firma espectral, dependiendo de las longitudes de onda analizadas, es posible el análisis particularizado de características de la cubierta bajo estudio. (García, 2013)

2.2.2.5. Imágenes satelitales

Una imagen satelital es el producto obtenido por un sensor instalado a bordo de un satélite artificial a través de la captación de la radiación electromagnética emitida o reflejada por un cuerpo celeste; producto que posteriormente se transmite a estaciones terrestres para su visualización, procesamiento y análisis.

2.2.2.6. Correcciones geométricas-georreferenciación

La corrección geométrica es la modificación de la geometría de la imagen respecto de la geometría de la superficie terrestre. La georreferenciación es su adaptación a un sistema geodésico de referencia y una proyección geográfica

determinada (ejemplo la UTM (Universal Transverse Mercator). (Pérez y Muñoz, 2006).

2.2.2.7. Correcciones radiométricas

Una vez que la radiación electromagnética es generada y se propaga, interactúa con la atmósfera afectando a la radiación en su longitud de onda, intensidad, distribución espectral y/o su dirección. Hay dos tipos de efectos que produce la atmósfera: absorción y dispersión. El ruido introducido por la atmósfera tiene efectos importantes en la teledetección y su remoción es necesaria (APN, 2005).

Las correcciones radiométricas buscan mejorar la precisión de las medidas de reflectancia, apuntan a eliminar ruidos en los ND (niveles digitales) de la imagen compensando las diferencias en los valores de radiancia y la conversión de los ND a valores de radiancia y reflectancia, utilizando modelos de atmósfera y las geometrías de iluminación/observación (APN, 2005).

2.2.3. Características de los Satélites Landsat 8

2.2.3.1. Satélite Landsat 8

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana (NASA) diseñó a finales de los años 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres. Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (Earth Resource Technology Satellite) el 23 de Julio de 1972. Esta familia de satélites fue rebautizada como Landsat a partir del segundo lanzamiento, en 1975 (Landsat 2).

Entre los satélites de recursos, el programa Landsat puede considerarse el más fructífero puesto que ha proporcionado datos multiespectrales de alta resolución a una amplia gama de usuarios durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio. (USGS, 2016).

A mediados de los 80, el programa Landsat entra en una nueva etapa en cuanto a financiación y funcionamiento con la transferencia del programa al sector privado. En 1985 la compañía EOSAT recibe los derechos para vender productos Landsat por un período de 10 años con el compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. El gobierno mantenía la responsabilidad en el

control físico de la plataforma y se comprometía a colaborar en el desarrollo de los Landsat 6 y 7. (USGS, 2016).

Recortes presupuestarios pusieron en entredicho este compromiso y se temió por la continuidad de los Landsat. Ante las presiones de la comunidad científica y profesional, en 1992 una nueva ley, devuelve la gestión del programa al gobierno y se adquieren compromisos para una financiación estable que asegure la continuidad del Landsat 6 y 7 en los 90.

Tabla 5: Características del Satélite Landsat 8.

LANDSAT 8	
ALTITUD NOMINAL	705km
INCLINACION	98.2°
RESOLUCION RADIOMETRICA	12bits
SWATH	180km
TIEMPO DE REVISITA	16 días
SENSORES	Pushbroom (OLI Y TIRS)

Fuente: (USGS, 2017).

2.2.3.2. Imágenes Landsat 8

Este satélite contiene dos sensores: El satélite comprende 2 sensores: El Sensor operacional de imágenes de tierra (OLI) y un Sensor Infrarrojo Térmico (TIRS).

- OLI está formado por 9 bandas espectrales que van desde lo visible pasando por los infrarrojos hasta el espectro de radiación de bajas ondas. Con las imágenes de resolución espaciales, que oscilan entre los 15 y los 30m (ver tabla 1), LANDSAT-8 proporciona imágenes de satélite de calidad que podrían demostrar los diferentes usos que se le podría dar a la tierra desde el espacio.

TIRS está compuesto por dos bandas espectrales, las cuales detectan infrarrojos térmicos, una herramienta imprescindible para medir la temperatura de la superficie de la Tierra. (USGS, 2017).

Tabla 6: Características de las imágenes Landsat 8.

DESCRIPCIÓN	BANDA	ANCHO (μM)	RESOLUCIÓN (M)
AEROSOL COSTERO	Band 1 Coastal	0.43 – 0.45	30
AZUL	Band 2 Blue	0.45 – 0.51	30
VERDE	Band 3 Green	0.53 – 0.59	30
ROJO	Band 4 Red	0.64 – 0.67	30
INFRARROJO CERCANO	Band 5 NIR	0.85 – 0.88	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 1	Band 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 2	Band 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30
PANCROMÁTICO	Band 8 Pan	0.50 – 0.68	15
CIRRO	Band 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30
INFRARROJO TÉRMICO 1	Band 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100
INFRARROJO TÉRMICO 2	Band 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100

Fuente: (USGS, 2016).

2.2.4. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

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. Este índice da lugar a isolíneas de vegetación de pendiente creciente y convergente en el origen. (Sánchez, 2015).

Respecto a otros índices de vegetación más complejos, el NDVI tiene las ventajas de tener una gran sencillez de cálculo y de facilitar la interpretación directa de los parámetros biofísicos de la vegetación. Además, permite la comparación entre datos obtenidos por diferentes investigadores. Por otro lado, tiene el inconveniente de que posee poca capacidad de minimizar la influencia del suelo y de la atmósfera. El NDVI permite identificar la presencia de vegetación verde en la superficie y caracterizar su distribución espacial, así como, la evolución de su estado a lo largo del tiempo. Esto está determinado fundamentalmente por las condiciones climáticas. La interpretación del índice debe, asimismo, considerar los ciclos fenológicos y de desarrollo anual, para distinguir

oscilaciones naturales de la vegetación con los cambios en la distribución temporal y espacial, causados por otros factores.

- El agua tiene reflectancia mayor en el infrarrojo que en el rojo, por lo tanto, valores negativos de NDVI.
- El suelo descubierto y con vegetación rala presenta valores positivos, aunque no muy elevados.
- La vegetación densa, sana y bien desarrollada presenta los mayores valores de NDVI.
- Las nubes presentan valores similares en el R e IRC, por lo que su NDVI es cercano a 0.
- El NDVI posee un gran valor en términos ecológicos, ya que es un buen estimador de la fracción de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la vegetación. (Paruelo, 2008)
- El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al rojo.

2.2.5. Índice de agua de diferencia normalizada (NDWI)

A través del cálculo del índice NDWI (Índice Diferencial de Agua Normalizado) podemos identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad por medio del análisis de imágenes satélite. De esta forma podemos emplear el índice como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses.

Disponemos de múltiples vertientes de análisis en base al juego de bandas multiespectrales. Para desempeñar nuestras opciones disponibles encontramos

combinaciones de bandas NIR-Verde, NIR-SWIR, SWIR-Verde. Todas ellas pueden ser gestionadas a través de los Sistemas de Información Geográfica y empleando las correspondientes imágenes aéreas provenientes de satélites o drones dotados con sensores multiespectrales.

Método Gao, 1996

Al igual que en el caso del índice de vegetación NDVI, los potenciales valores obtenidos a partir del NDWI oscilan entre -1 y 1 cuyos valores describirán superficies de agua y vegetación con contenido en agua o zonas terrestres y con ausencia de humedad.

En este caso, la relación de bandas multiespectrales a analizar estará basada en la banda NIR- Near InfraRed (o infrarrojo cercano) y la banda SWIR- Short Wavelength InfraRed (infrarrojo corto). La ecuación estará basada en la relación entre sus diferencias y sumas: (Gao, 1996)

$$\text{NDWI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

SWIR = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo de onda corta.

Método McFeeters, 1996

Otro de los planteamientos posibles se basa en la sustitución de la banda SWIR por la banda visible del verde quedando resaltadas las masas de agua. En este caso, la relación de análisis de bandas multiespectrales será:

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN} - \text{NIR}) / (\text{GREEN} + \text{NIR})$$

La relación entre bandas permite maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de ondas en el verde, maximiza la reflectancia de la vegetación y minimiza la reflectancia de masas de agua gracias al NIR. (Feeters, 1996)

Método Xu, 2006

Este método contempla una sistemática análoga a la de McFeeters. En este caso, la relación entre bandas no contempla el manejo de la banda NIR sino la SWIR. Es más

conocido como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado o MNDWI. (Xu, 2006)

$$NDWI = (GREEN-SWIR) / (GREEN+SWIR)$$

Gracias a este índice podremos advertir las potenciales zonas húmedas, reclasificaciones y delimitar entornos con presencia de agua. Pero no sólo las evidentes masas de agua. Zonas húmedas como turberas o ecosistemas acuáticos difíciles de ser percibidos por fotointerpretación habitual serán visualizadas de manera rápida. Para poder identificar estas potenciales zonas húmedas deberemos contar con las pertinentes bandas multispectrales y tener constancia de las bandas a utilizar en cada análisis.

2.2.6. Definición de términos básicos

2.2.6.1 Teledetección

Teledetección espacial o sensoramiento remoto a una serie de procesos que permiten obtener información sobre las propiedades físicas de los objetos, los fenómenos geológicos, los recursos naturales y las actividades antrópicas en base a mediciones y observaciones realizadas desde cierta distancia, es decir, sin estar en contacto con ellos. (Chuvieco, 2008)

2.2.6.2 Sensor:

Un sensor es un objeto capaz de detectar magnitudes físicas o químicas, llamadas variables de instrumentación, y transformarlas en variables eléctricas. Las variables de instrumentación pueden ser, por ejemplo: intensidad lumínica, temperatura, distancia, aceleración, inclinación, presión, desplazamiento, fuerza, torsión, humedad, movimiento, pH, etc. Una magnitud eléctrica puede ser una resistencia eléctrica (como en una RTD), una capacidad eléctrica (como en un sensor de humedad), una tensión eléctrica (como en un termopar), una corriente eléctrica (como en un fototransistor), etc.

No iluminan al blanco, limitándose a recibir la energía emitida o dispersada por dicho blanco.

2.2.6.3 Sensores activos:

Proporcionan su propia fuente de radiación electromagnética

2.2.6.4 Resolución espacial:

Especifica el tamaño del pixel de la imagen de teledetección.

2.2.6.5 Resolución espectral:

Especifica el número de bandas espectrales en el que el sensor puede captar radiación.

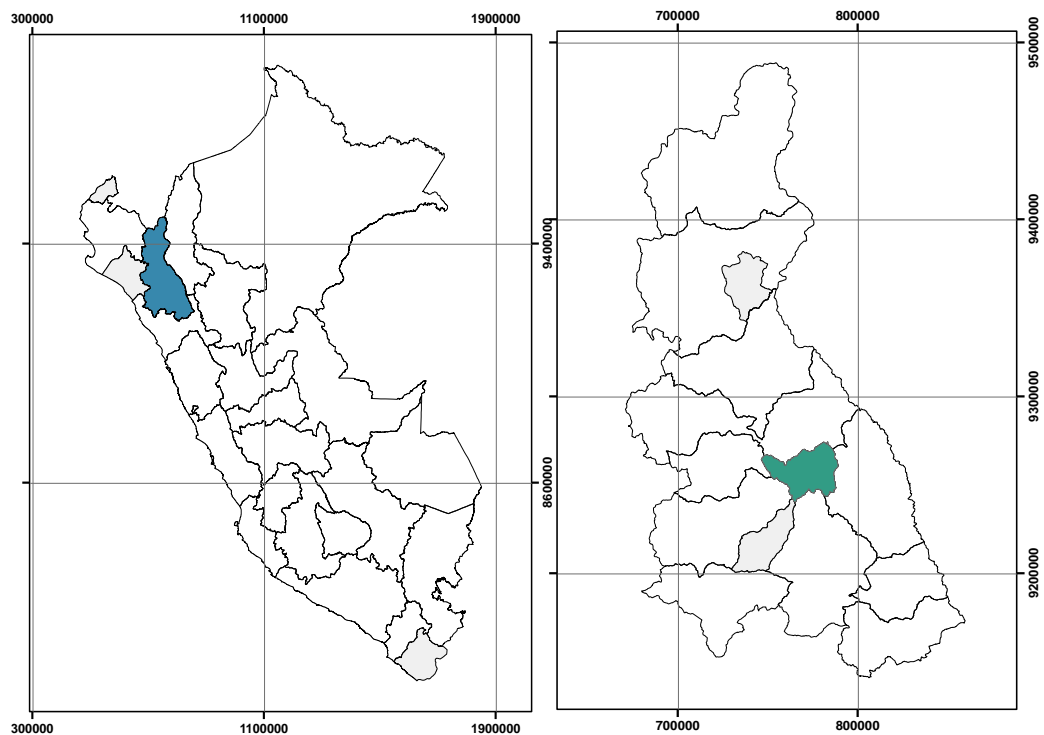
2.3 Hipótesis

La técnica de la teledetección con imágenes satelitales Landsat 8 a través de los parámetros NDWI, NDVI y Firmas espectrales interpretadas por el programa ENVI 5.3 será capaz de Identificar PAMs de origen químico, cuerpos de agua y tipos de vegetación en los cuadrantes 14f y 14g de Hualgayoc, sin la necesidad de trabajar directamente en la zona donde estos se encuentran. Una vez combinados estos elementos, podremos verificar y priorizar la remediación de Pasivos Ambientales Mineros.

CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Ubicación:

La zona de estudio se encuentra localizada enteramente en la provincia de Hualgayoc, Departamento de Cajamarca y abarca los cuadrángulos 14F y 14G



El área de estudio se encuentra ubicada políticamente en el departamento de Cajamarca - provincia de Hualgayoc.

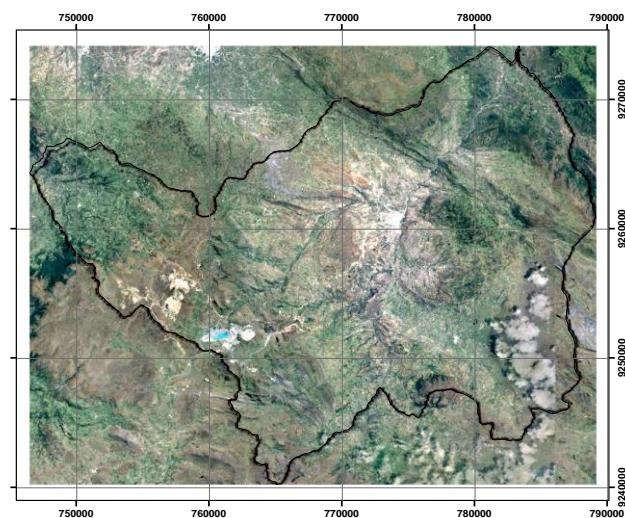


Figura 3: Ubicación de la zona de estudio cuadrángulo 14f-14g.

Coordenadas referenciales:

Tabla 7: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.

Punto	Este	Norte
1	721170	9281093
2	831487	9281093
3	721170	9225000
4	831487	9225000

Fuente: Elaboración propia

3.2. Población

La Provincia de Hualgayoc es una de las trece que conforman el departamento de Cajamarca, bajo la administración del Gobierno Regional de Cajamarca, con población aproximada de 94,076 habitantes, de lo cual solo en el distrito de Hualgayoc existen 17425 (INEI, 2017).

3.3. Accesibilidad

La principal vía de acceso es la carretera Cajamarca - Hualgayoc siendo aproximadamente 80 km con un tiempo de duración de 2 horas.

Con carretera afirmada desde Cajamarca hasta el Km. 30, y carretera afirmada desde el km 30 al kilómetro 50 que coincide con el inicio de la provincia de Hualgayoc

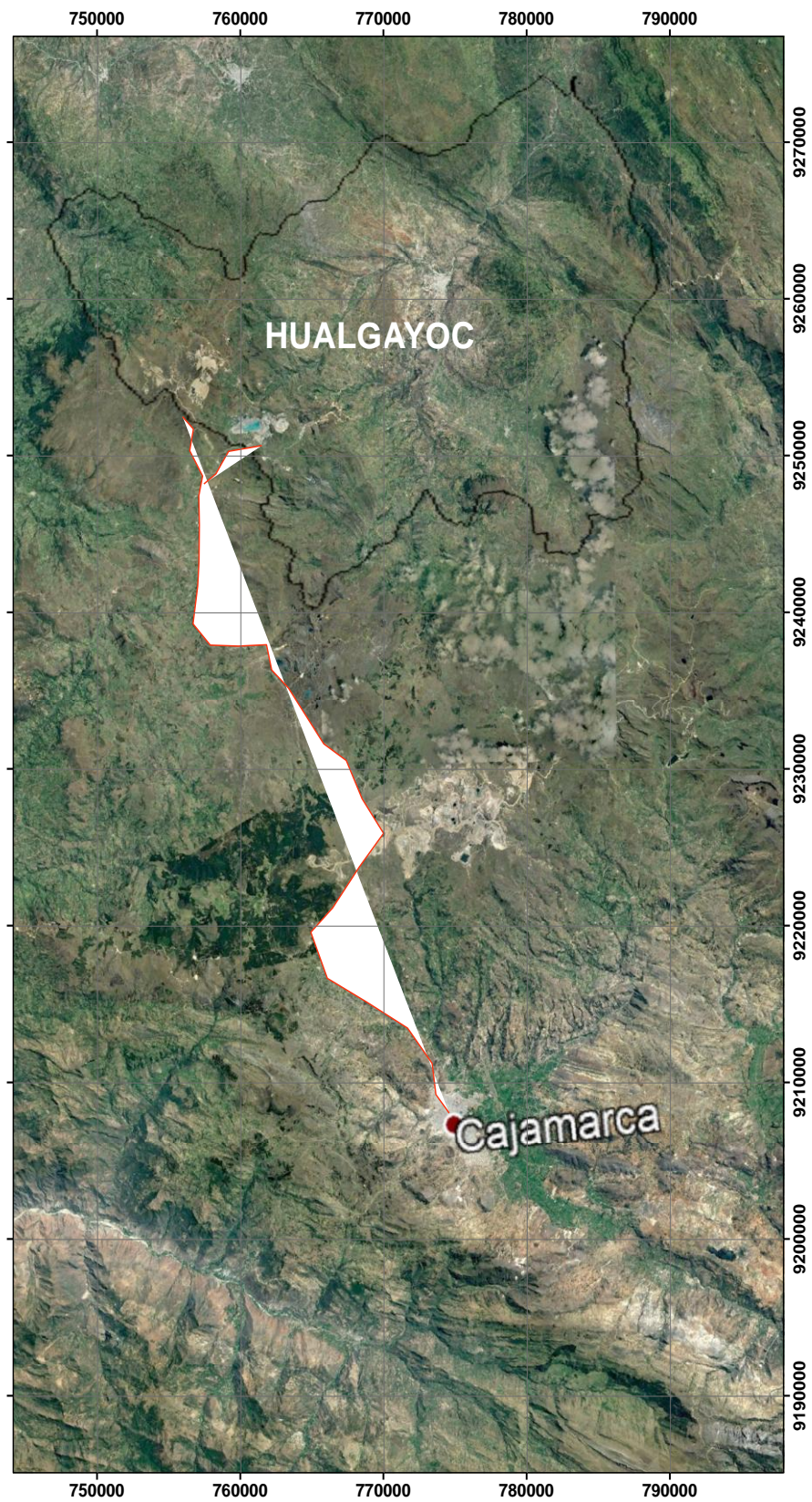


Figura 4: Accesibilidad. Elaboración propia.

3.4. Recursos naturales

Suelos.

Según la Universidad Autónoma de Coahuila U.A.D.C. (1986), la provincia de Hualgayoc tiene mayor porcentaje de tierras de uso agrícola y pastos naturales, además Hualgayoc cuenta con el 24% y 61 % del total de su territorio de tierras de uso agrícola y pastos naturales.

Por otro lado, de las tierras agrícolas sólo el 10% son con riesgo y el 90% de secano, permaneciendo anualmente más de la mitad de las últimas en descanso.

Minerales.

Se desconoce la cantidad de reservas mineras su cálculo es difícil debido a lo que hoy es económicamente explotable, y por lo tanto reserva, mañana no lo es, por lo que deja de ser reserva. Sin embargo, el hecho de que las compañías mineras estén operando cerca de 32 minas refleja que provincial y departamentalmente sus recursos mineros metálicos y no metálicos es importantes. Los metálicos contienen oro, plata, plomo, zinc y cobre, localizados principalmente en la provincia de Hualgayoc. Los recursos mineros no metálicos son de carbón de piedra y cal, localizados en el distrito de Bambamarca. (Benavides, 2013)

Recursos de flora y fauna

Flora

Entre las principales particularidades de su flora están:

- 1) La existencia de pequeños bosques residuales al NE. De la provincia.
- 2) La flora de orillas de los ríos, acequias, contorno de chacras o en los cercos, constituida por especies arbóreas, arbustivas o herbáceas como alisos, lanche, molle, sauce, carrizo, pájaro bobo, quinal, cola de caballo, helechos, ortiga, carhuacasha, pencas, etc.
- 3) La flora herbácea alto andina, donde prima el ichu, margaritas, lirios y otras hierbas pequeñas: bien cilíndricas y puntas espinosas o pequeñas hojas acorazonadas o partidas.
- 4) La flora herbácea de terrenos cultivados, como: cadillo, ballico, verbena, achicoria, malva, nudillo, grama, etc.
- 5) La flora arbustiva alto andina como quinal, hualangos, chilcos, etc.

Fauna

También la fauna es variada, pero escasa, con peligro de extinción en algunas especies como venados y peces, entre otras, debido a la contaminación de las aguas y caza descontrolada, así como la deforestación. Las especies son parecidas a la de las provincias de la región Quichua, Jalca y Puna. Los espacios cubiertos por pajonal y afloramientos rocosos brindan el hábitat ideal para mamíferos muy conocidos y endémicos del ecosistema como *Lagidium peruanum* "vizcacha" y *Calomys sorellus* "ratón de jalca" que ocupan los espacios rocosos, cubiertos en ocasiones por vegetación abundante. (Mena *et; al*, 2017)

3.5. Hidrografía

La mayoría de sus ríos pertenecen a la vertiente del Atlántico y son colectados por el Llaucano, afluente del Marañón; otros corren la vertiente del pacífico a través de la cuenca de Chancay, sub cuenca del río Tacamache o San Juan Pampa. (Bermex, 1986)

A) Ríos de la cuenca del Llaucano

Río Llaucano. Es el principal de la provincia de Hualgayoc, pero de poca utilidad por la contaminación de sus aguas a partir de la confluencia del río Arascorgue.

Nace en el distrito de la Encañada provincia de Cajamarca, con el nombre de Quebrada Honda e ingresa a la provincia de Hualgayoc como río Chonta; al pasar por el poblado de Llaucán adopta esta denominación y fuera ya de la provincia, desde la afluencia del Guineamayo hasta su desembocadura en el Marañón, el de río Silaco. Toda su cuenca incluyendo la de sus afluentes es de 2400 Km². (Tejada, 2011)

Atraviesa el territorio provincial aproximadamente entre los poblados Palo Blanco y el Tuco. Sus afluentes son los siguientes:

Por la margen derecha

Río Tambillo. Nace en la provincia de Celendín; en su tramo final, es limítrofe con la provincia de Cajamarca.

Río Ñinñún. Es uno de los más importantes, nace en la laguna de Namococha (en la carta Nacional como Quengorio provincia de Celendín y fuera del distrito). Luego aguas abajo se conoce como río Pomagón o Ñunñún; entrega sus aguas al Llaucano cerca del poblado Ahijadero, Entre otros afluentes están las Qs.Patahuasi, chururo, Cashapampa, Enterador y los Riachuelos Chorro Blanco y la Colpa.

Otras quebradas o riachuelos son Chururo, Cuñacales (de mayor cuenca que todas las demás de este grupo), Chalán, Alán, Paraguarán y Chontas.

Por la margen izquierda:

Río Cuzco, formado por los riachuelos de la Contadera y Pinguyo.

Río Arascorgue, nace con el nombre de Hualgayoc al E. del cerro Coimolache, cruza por el poblado de su nombre y baja precipitadamente hasta afluir en el Llaucano llevando los deslaves mineros y contaminando las aguas del Llaucano.

Río Maygasbamba. Nace con el nombre de río Tingo al noroeste de Hualgayoc, entrega sus aguas al Llaucano al noreste de la capital provincial. (Sus aguas, aunque en menor grado que el Arascorgue, también están contaminadas).

Otros afluentes, entre estos están las quebradas de los vargas, Quinamayo o Año Mayo, las 3 quebradas.

B) Ríos de la cuenca del chancay

Río Tacamache o San Juan. Nace al NO del cerro Tantahuatay, corre de SE. a NO, hasta unirse a las disminuidas aguas del Chancay a la salida del tragadero y ya dentro de las provincias de Santa Cruz. Sus afluentes son las quebradas Tantahuatay, Quencho y el más importante el río Perlamayo o Colorado, que se une en un lugar denominado el Tingo, donde deja el territorio de Hualgayoc y se interna en Santa Cruz, con el nombre de río San Juan. (Gobierno Regional Cajamarca, 2006)

3.6. Mineralogía regional

La provincia de Hualgayoc alberga mineralización abundante de tipo epitermales, pórfido y polimetálico, esta zona minera se caracteriza por presentar un terreno montañoso moderado a moderadamente empinado, con alturas que fluctúan entre los 3,600 y 4,000 msnm, aproximadamente.

Existen dos distritos con un alto grado de mineralización, uno de ellos se encuentra en el distrito de Hualgayoc, que se ubica en el norte, y es uno de los más antiguos del Perú, ampliamente conocido por su producción de plata en el pasado, y su producción de metales básicos más reciente. (Quispe, 2016)

Este distrito ha sido una importante zona de producción de plata desde la época incaica, con una obtención sobre los 50 millones de onzas de plata e importantes cantidades de plomo, zinc

y cobre, a partir de yacimientos de vetas y mantos, desde la conquista española del siglo XVI. El pueblo minero de Hualgayoc se funda en 1771.

La estructura local se caracteriza por presentar grandes pliegues abiertos de unidades sedimentarias del período Cretáceo, predominantemente calizas, con planos axiales que alcanzan aproximadamente los 315° , y buzamientos pronunciados hacia el sudoeste. Las fallas, por lo general, se limitan a fallas de deslizamiento normales y oblicuas, con desplazamientos que van desde unos cuantos metros a unas cuantas decenas de metros. (Quispe, 2016)

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Operacionalización de variables

- Variables Dependiente
 - NDWI
 - NDVI
- Variable Independiente
 - Firmas espectrales

Tabla 8: Marco operacional de variables e indicadores

VARIABLES				
Tipo	Variable	Definición conceptual	Dimensiones	Definición operacional Índice/Ítem
Dependiente	NDWI	Índice diferencial de agua normalizada, es la medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo en base a la medición de los sensores remotos	Variograma	Índice de agua
	NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada, usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación en base a la medición de los sensores remotos.	Variograma	Índice de vegetación.
Independiente	Firmas espectrales de las zonas de alteración	Medida cuantitativa de las propiedades espectrales en función de la radiación electromagnética de cualquier objeto	Grafica espectral	% reflectancia.

4.2. Diseño de investigación

La investigación será del tipo no experimental – transversal - correlacional/causal, usando un método descriptivo analítico.

Para la comprobación de la hipótesis de esta investigación se utilizará un modelo no experimental pues no se manipulará deliberadamente variables de campo como son la vegetación, presencia de agua o minerales contaminantes, sin embargo, utilizaremos información espectral para realizar un procesamiento que permita explicar cómo a partir de la presencia de ciertas condiciones ya mencionadas podemos llegar a ubicar pasivos ambientales de origen químico.

Además, se utilizará un modelo transversal pues la información recopilada espectralmente corresponde a un momento único espaciotemporalmente, con el propósito de describir estas variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado, momento que nos servirá para la calibración y obtención de parámetros exactos.

Finalmente se llegará a un modelo correlacional causal, puesto que, utilizando toda la información procesada, podremos definir con más claridad lo que deberíamos considerar con más relevancia, es decir no partir de lo ligero y solo guiarnos de un aspecto visual al momento de ubicar un pasivo ambiental, sino que encontrar la causa real que desencadena una consecuencia de contaminación en Hualgayoc, además de jerarquizar cuales de estos pasivos ambientales son realmente fuentes potenciales de contaminación.

4.3. Unidad de estudio

La unidad de análisis será el pixel de 15 x 15 m

4.4. Población

La población de estudio será en un área de 2,261,700 hectáreas, perteneciente a los cuadrángulos 14f y 14g, correspondiente a toda la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca.

4.5. Muestra (muestreo o selección)

Firmas espectrales de minerales contaminantes, NDVI y NDWI

4.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

Técnicas

Las técnicas utilizadas son la observación y el análisis espectral de las imágenes satelitales, el cual viene a ser la descomposición de dicha señal en sus diversas componentes dentro de un dominio frecuencial; a la vez es una técnica ampliamente utilizada para discriminar diferentes tipos de materiales y generar procesamiento de datos.

Instrumentos

El principal instrumento de trabajo será el software ENVI 5.3 que nos ayudara a procesar las imágenes satelitales, así como la información producto del análisis espectral, otros instrumentos se listan a continuación

Materiales.

- Libreta de campo
- Lápiz
- Papel bond
- Imágenes satelitales Landsat.

Equipos.

- GPS
- Cámara fotográfica
- Laptop

Servicios.

- Fotografía.
- Impresiones.
- Asesoramiento.
- Software Envi 5.3 y ArcGIS 10.5

Procedimientos de Recolección de datos

La recolección de datos, previos a las investigaciones teóricas, se realizó de la siguiente manera.

Se revisó información primaria en los temas de pasivos ambientales y contaminación por metales y sulfuros además se incorporó información sobre técnicas de ubicación satelital para pasivos ambientales, ya que, es un tema de vital importancia porque es el inicio de los conflictos sociales en nuestra región, obteniendo información de diversas fuentes, entre las que se destaca las tesis de doctorados, informes especializados, artículos científicos entre otros, mencionados en la bibliografía.

Para la recolección de datos de campo para el procesamiento se realizó a partir de imágenes satelitales utilizando métodos espectrales para clasificar vegetación agua y minerales contaminantes

4.7. Procedimientos y análisis de datos

Cada firma espectral es única y diferente en cada punto a analizar, es por ello que el software ENVI 5.3 nos ayuda a procesar toda la información captada por el sensor, para una interpretación visual y/o digital, de esta manera poder realizar su calibración, procesamiento de firmas espectrales y parámetros tales como: NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada), a continuación, se detalla el procedimiento

4.7.1 Calibraciones la imagen satelital

4.7.1.1 Selección de la imagen satelital

La imagen corresponde a una imagen Landsat 8 WRS-2 del año 2016, El barrido fue realizado por el satélite Landsat 8 con Path / Row (9/65), imagen proporcionada por la USGS (U.S. Geological Survey) de la NASA, La imagen no presenta ningún tipo de tratamiento, y a continuación se especificará su composición en función de las bandas que se trabajará en la presente investigación

Tabla 9: Características de las imágenes Landsat 8 para la presente investigación.

DESCRIPCIÓN	BANDA	ANCHO (μM)	RESOLUCIÓN (M)
AEROSOL COSTERO	Band 1 Coastal	0.43 – 0.45	30
AZUL	Band 2 Blue	0.45 – 0.51	30
VERDE	Band 3 Green	0.53 – 0.59	30
ROJO	Band 4 Red	0.64 – 0.67	30
INFRARROJO CERCANO	Band 5 NIR	0.85 – 0.88	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 1	Band 6 SWIR1	1.57 – 1.65	30
INFRARROJO DE ONDA CORTA 2	Band 7 SWIR2	2.11 – 2.29	30
PANCROMÁTICO	Band 8 Pan	0.50 – 0.68	15
CIRRO	Band 9 Cirrus	1.36 – 1.38	30
INFRARROJO TÉRMICO 1	Band 10 TIRS1	10.6 – 11.19	100
INFRARROJO TÉRMICO 2	Band 11 TIRS2	11.5 – 12.51	100

Fuente: (USGS, 2016).

De la banda 2 a la banda 4 son bandas representadas por rangos espectrales visibles al ojo humano, de la banda 5 a la banda 11 requiere un procesamiento espectral adecuado para la interpretación de su información.

4.7.1.2 Corrección atmosférica

Aplicaremos la corrección atmosférica con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmósfera. Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmósfera, ya sean nubes o aerosoles que nos generen pérdida de información espectral.

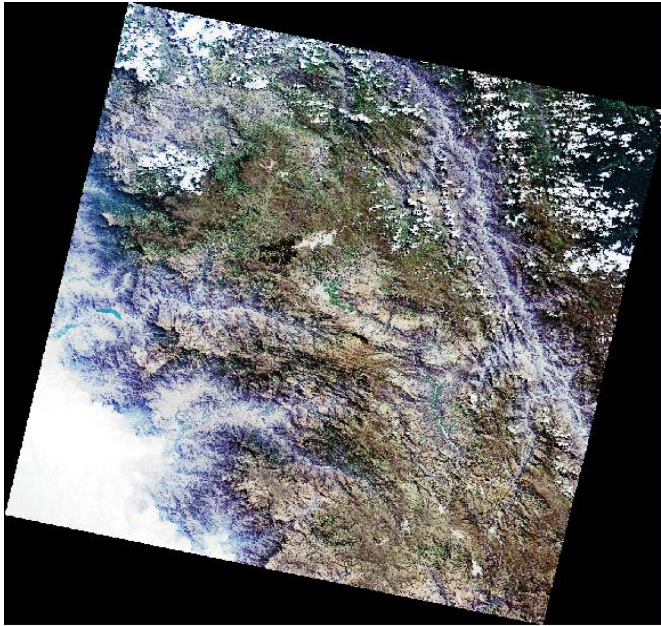


Figura 5: Imagen Landsat 8 – barrido completo sin corrección atmosférica ni tratamiento para su procesamiento en él Envi 5.3. Elaboración propia

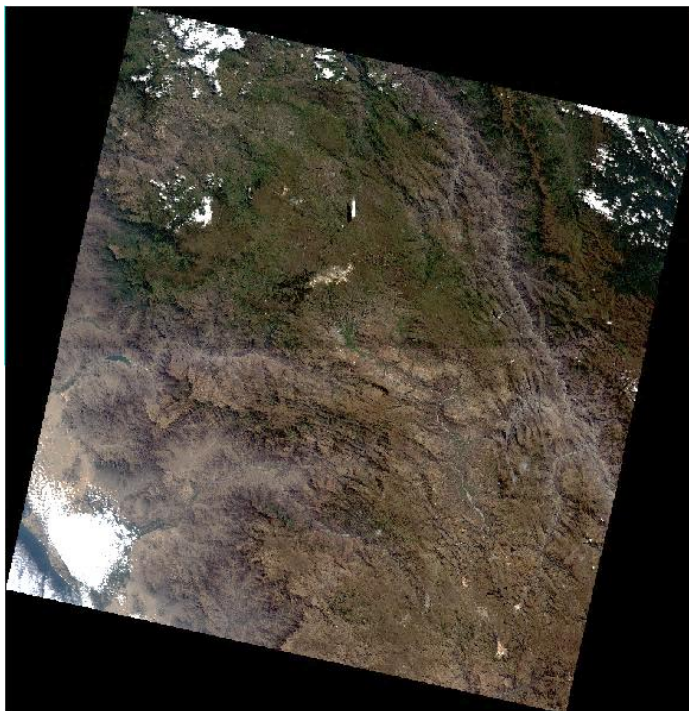


Figura 6: Imagen Landsat 8 – barrido completo con corrección atmosférica de la zona de estudio. Elaboración propia

4.7.1.3 Corrección radiométrica

Mediante la corrección radiométrica se mejora la precisión, en la cual se busca descomponer la imagen en valores de niveles digitales (ND), compensando así las diferencias en los valores de radiancia y la conversión de los ND a valores de radiancia y reflectancia, utilizando modelos de atmósfera y las geometrías de iluminación/observación. Para finalmente realizar el recorte de la zona de interés que queda encuadrada en las siguientes coordenadas.

Tabla 10: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.

Punto	Este	Norte
1	721170	9281093
2	831487	9281093
3	721170	9225000
4	831487	9225000

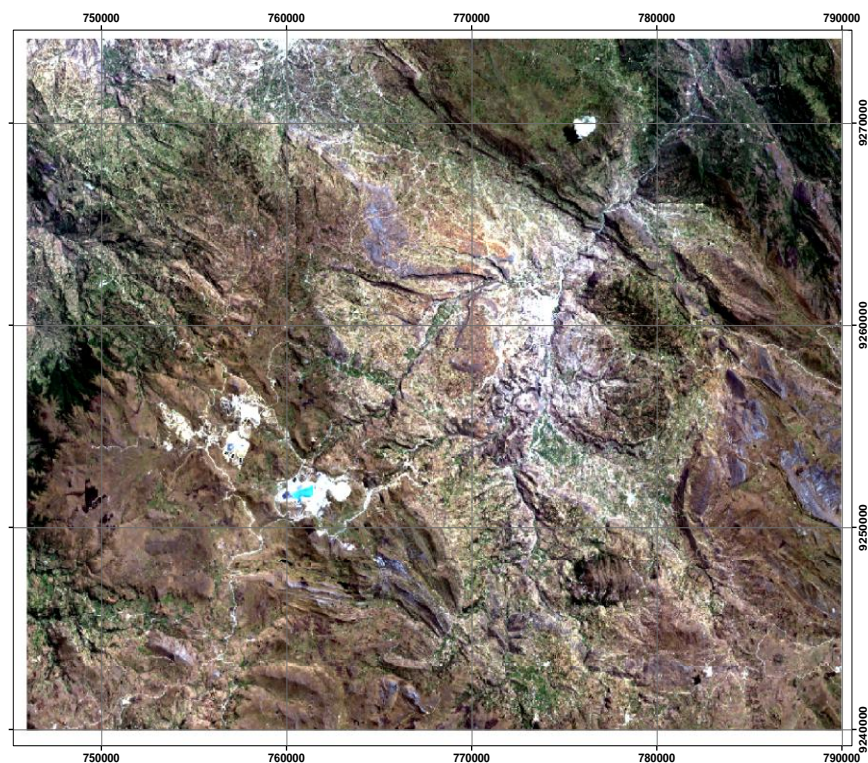


Figura 7: Recorte de la zona de trabajo - imagen Landsat 8 Corregida. Elaboración propia

El área de estudio fue elegida, porque es la segunda zona con mayor cantidad de PAM's, en el Perú según el inventario del MEN 2016.

4.7.2 Análisis espectral de minerales

Una vez que tenemos la imagen corregida y recortada procedemos a realizar el análisis espectral para lo cual el primer paso es seleccionar los minerales asociados a los PAMs, en una librería espectral de lo que planeamos identificar en campo.

Los metales rara vez se suelen encontrar en estado puro, en la naturaleza se encuentran formando parte de la estructura de los minerales, debido a la creación de grandes escombreras con residuos de extracción minera y la creación de kilómetros de túneles y galerías por los que penetra el oxígeno atmosférico desestabilizando de esta manera a los sulfuros, produciendo acidez, sulfatos, metales y metaloides tóxicos en el ambiente.

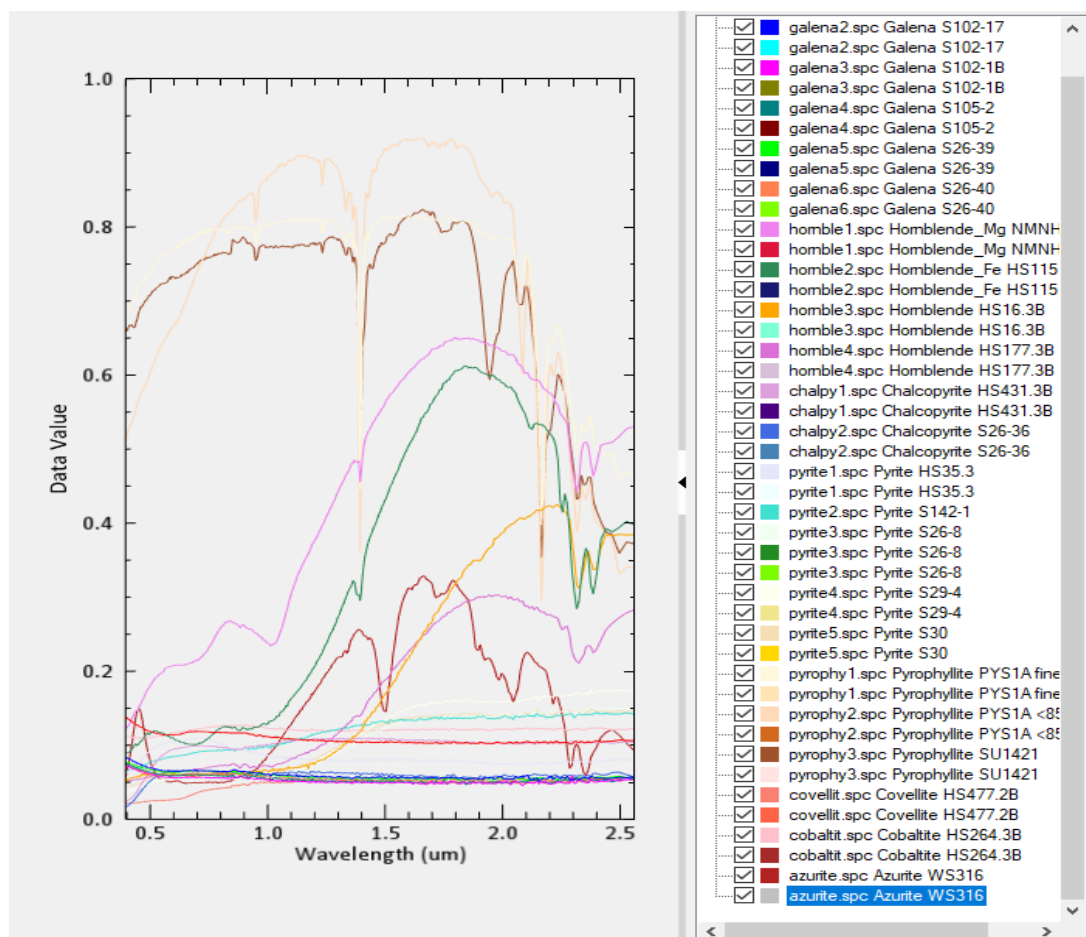


Figura 8: Firmas espectrales de minerales contaminantes: Elaboración propia
 Base de datos de la librería espectral del USGS.

Tabla 11: Sulfuros característicos que generan contaminación

SULFUROS	FÓRMULA
Argentita	S ₂ Ag
Bornita	S ₄ Cu ₅ Fe
Galena	SPb
Esfalerita	SZn
Calcopirita	S ₂ CuFe
Pirrotita	SFe _{1-x}
Covelina	SCu ₂
Estibina	S ₃ Sb ₂
Pirita	S ₂ Fe
Marcasita	S ₂ Fe
Molibdenita	S ₂ Mo
Silvanita	Te ₂ (Au, Ag)
Calaverita	Te ₂ Au

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizada la corrección y recorte se procede a analizar cada una de las firmas características de los materiales presentes en la zona para lo cual será de gran apoyo el programa ENVI 5.3 y así poder procesar dicha información recopilada por el satélite.

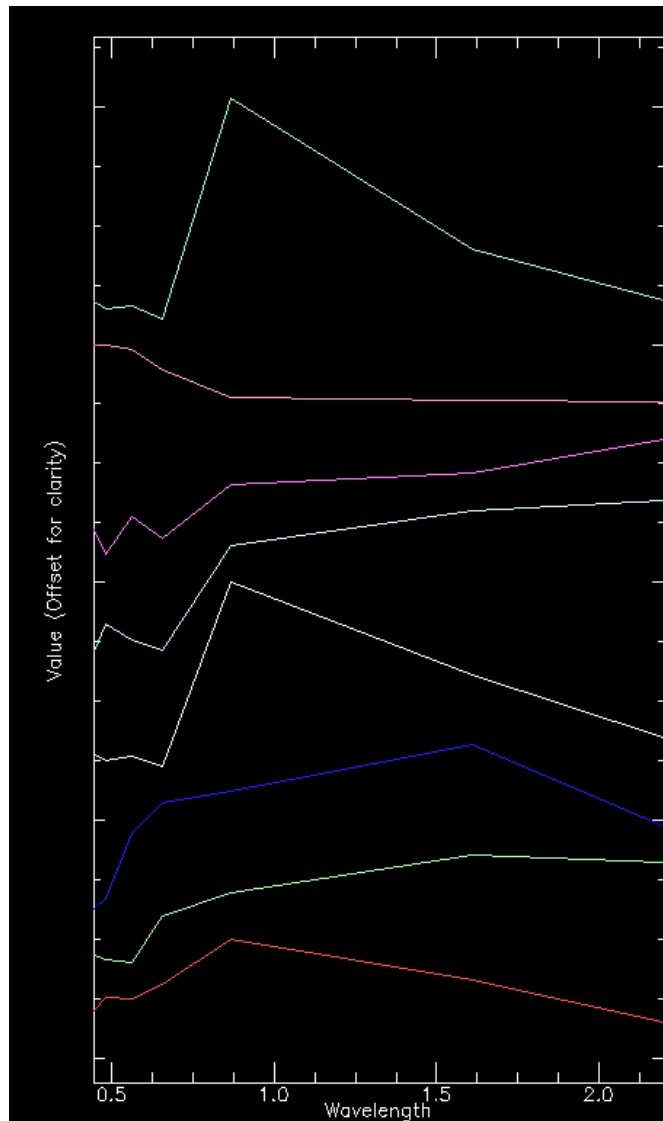


Figura 9: Firmas características de los diferentes materiales en la zona

Fuente: Elaboración propia

El presente gráfico contiene todas las firmas espectrales pertenecientes a los pixeles puros de los materiales identificados en la zona de estudio- Provincia de Hualgayoc. Una vez analizado cada uno de los tipos de materiales y comparados con la galería de firmas espectrales del USGS podemos identificar los siguientes materiales que guardan similitud con la gráfica espectral

4.7.3 Análisis de probabilidad vs improbabilidad de los minerales más representativos asociados a los PMAs de origen químico.

4.7.4.1 Análisis espectral y de probabilidad para la Colevina.

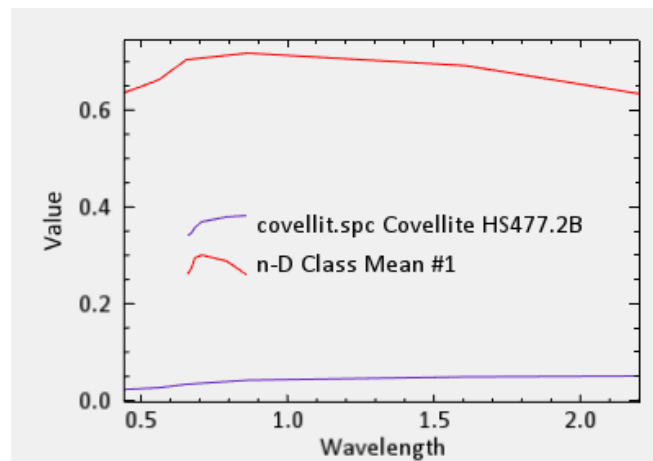


Figura 10: Comparación de firmas espectrales para la covelina

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura N° 10 las zonas de reflectancia y absorción para la covelina, así definir las similitudes con la firma del espectrómetro de la U.S.G.S comparada con la firma del software Envi 5.3.

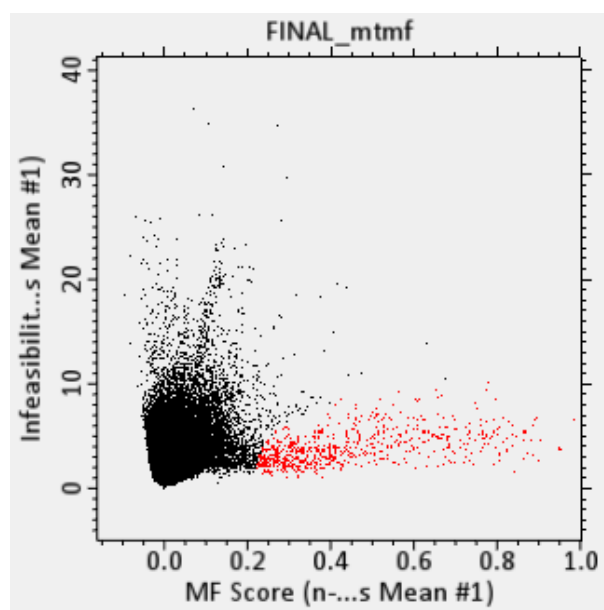


Figura 11: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la covelina

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°11 se observa el variograma de la probabilidad vs la improbabilidad el cual nos indica que cada pixel está representado por cada punto en color negro para la covelina. Analizamos las zonas más probables teniendo en cuenta la tendencia de los puntos que están más hacia el eje x marcándolos con color rojo.

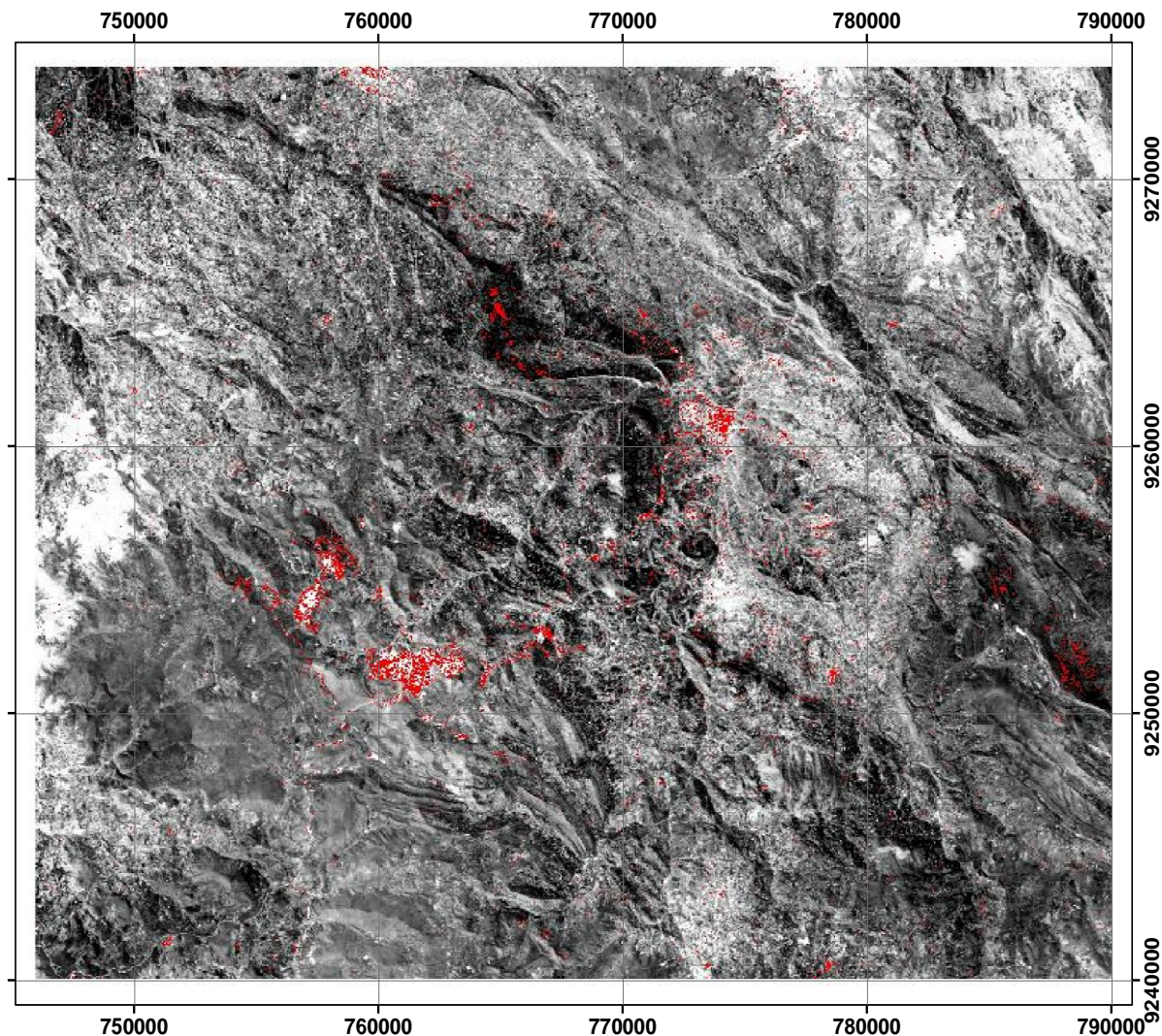


Figura 12: Zonas minerales con presencia espectral de Covelina.

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°12 se puede apreciar las zonas más probables de presencia de covelina obtenidos en el análisis del variograma.

4.7.4.2 Análisis espectral y de probabilidad para la Calcopirita.

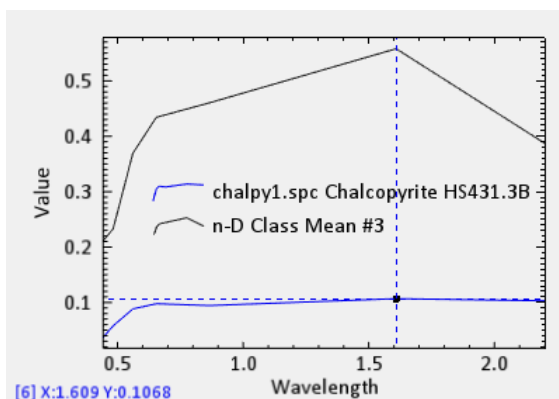


Figura 13: Comparación de firmas espectrales para la calcopirita.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura N° 13 las zonas de reflectancia y absorción para la calcopirita, así definir las similitudes con la firma del espectrómetro de la U.S.G.S comparada con la firma del software Envi 5.3.

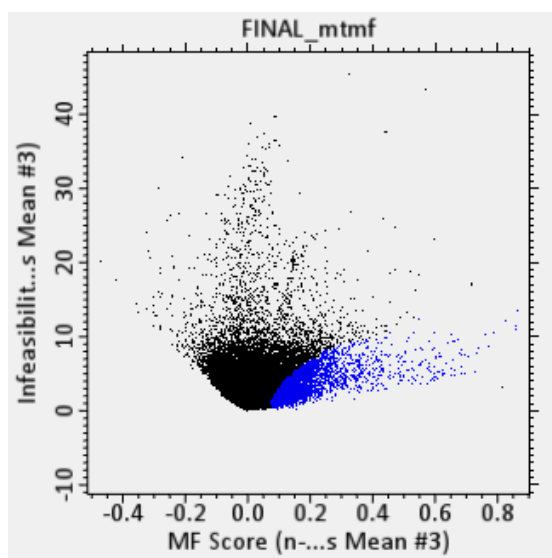


Figura 14: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la calcopirita.

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°14 se observa el variograma de la probabilidad vs la improbabilidad el cual nos indica que cada pixel está representado por cada punto en color negro para la calcopirita. Analizamos las zonas más probables teniendo en cuenta la tendencia de los puntos que están más hacia el eje x marcándolos con color azul.

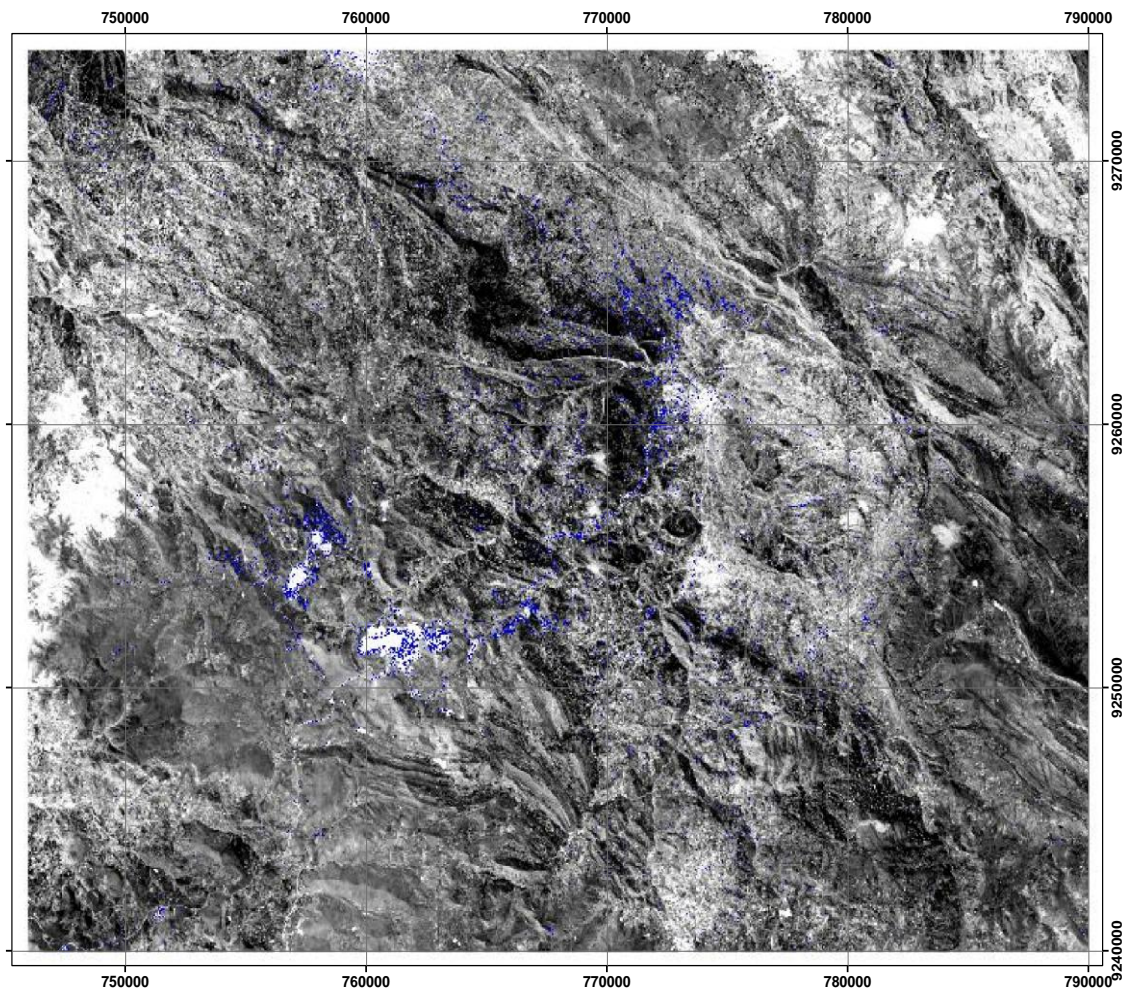


Figura 15: Zonas minerales con presencia espectral de Calcopirita

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°15 se puede apreciar las zonas más probables de presencia de calcopirita obtenidos en el análisis del variograma.

4.7.4.3 Análisis espectral y de probabilidad para la Pirita.

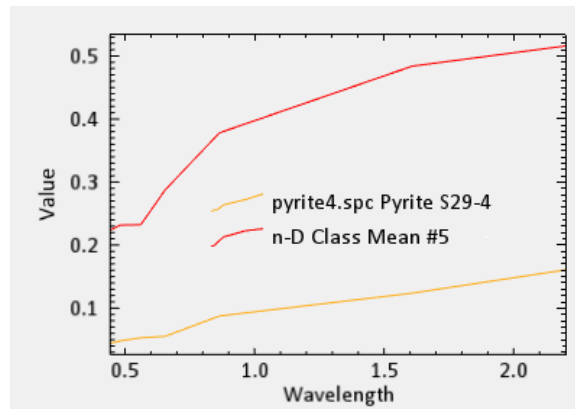


Figura 16: Comparación de firmas espectrales para la pirita

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura N° 16 las zonas de reflectancia y absorción para la pirita, así definir las similitudes con la firma del espectrómetro de la U.S.G.S comparada con la firma del software Envi 5.3.

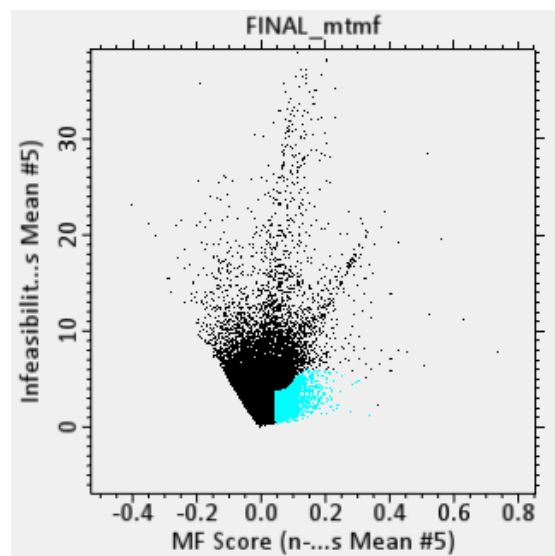


Figura 17: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la pirita

Fuente: Elaboración propia.

En la figura N°17 se observa el variograma de la probabilidad vs la improbabilidad el cual nos indica que cada pixel está representado por cada punto en color negro para la Pirita. Analizamos las zonas más probables teniendo en cuenta la tendencia de los puntos que están más hacia el eje x marcándolos con color celeste.

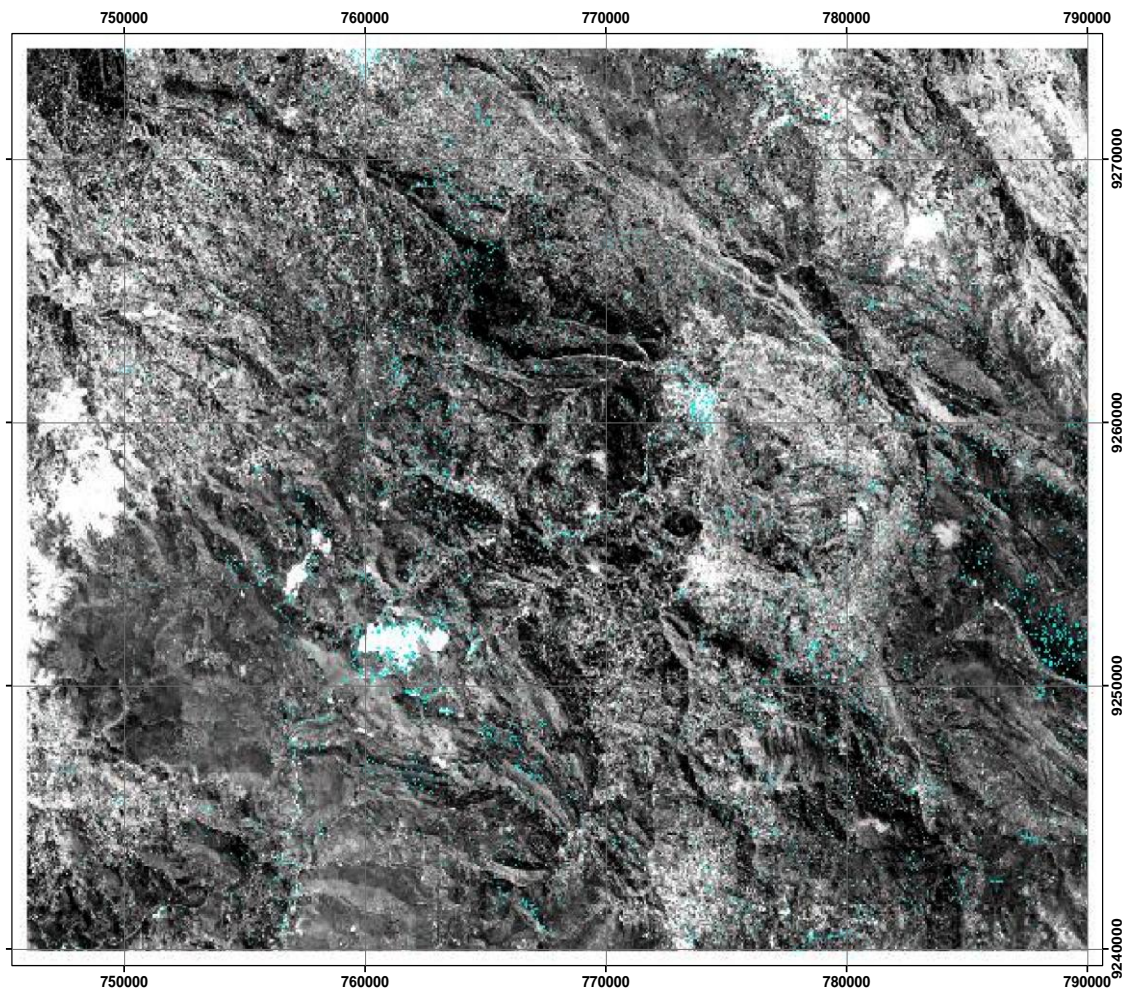


Figura 18: Zonas minerales con presencia espectral de Pirita

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°19 se puede apreciar las zonas más probables de presencia de pirita obtenidos en el análisis del variograma.

4.7.4.4 Análisis espectral y de probabilidad para la Pirita asociada a Limonita.

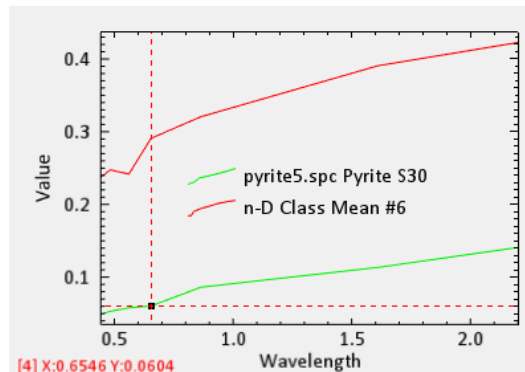


Figura 19: Comparación de firmas espectrales para la pirita asociada a limonita.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura N° 19 las zonas de reflectancia y absorción para la pirita asociada a limonita, así definir las similitudes con la firma del espectrómetro de la U.S.G.S comparada con la firma del software Envi 5.3.

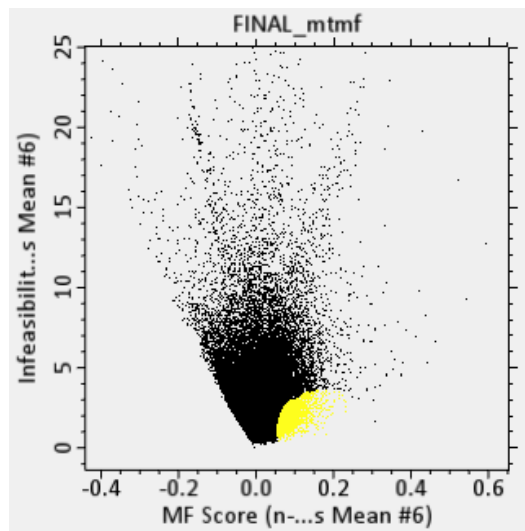


Figura 20: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la pirita-limonita

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°20 se observa el variograma de la probabilidad vs la improbabilidad el cual nos indica que cada pixel está representado por cada punto en color negro para la Pirita asociada a limonita. Analizamos las zonas más probables teniendo en cuenta la tendencia de los puntos que están más hacia el eje x marcándolos con color amarillo.

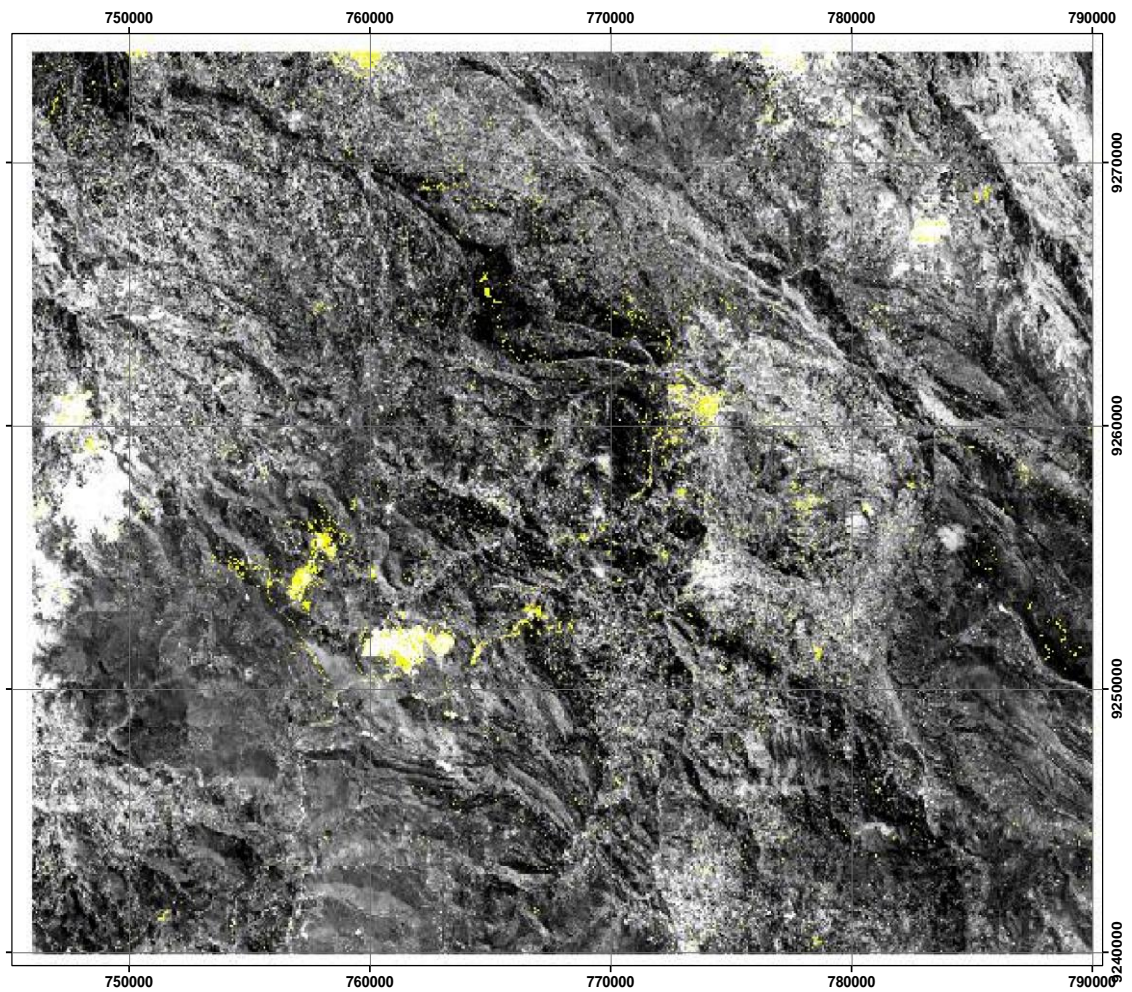


Figura 21: Zonas minerales con presencia espectral de Pirita con alteración de limonita

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°21 se puede apreciar las zonas más probables de presencia de pirita asociada a limonita obtenidos en el análisis del variograma.

4.7.4.5 Análisis espectral y de probabilidad para la Galena.

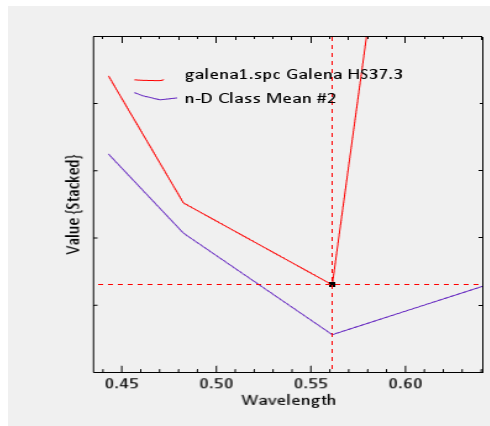


Figura 22: Comparación de firmas espectrales para la galena

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar en la figura N° 22 las zonas de reflectancia y absorción para la galena, así definir las similitudes con la firma del espectrómetro de la U.S.G.S comparada con la firma del software Envi 5.3.

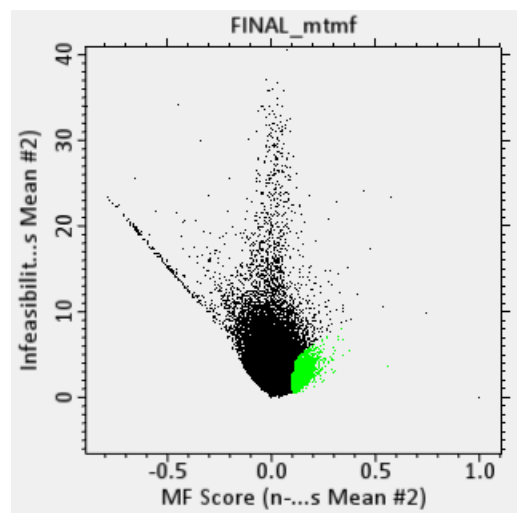


Figura 23: Variograma de probabilidad vs improbabilidad para la galena.

Fuente: Elaboración propia

En la figura N°23 se observa el variograma de la probabilidad vs la improbabilidad el cual nos indica que cada pixel está representado por cada punto en color negro para la galena. Analizamos las zonas más probables teniendo en cuenta la tendencia de los puntos que están más hacia el eje x marcándolos con color verde.

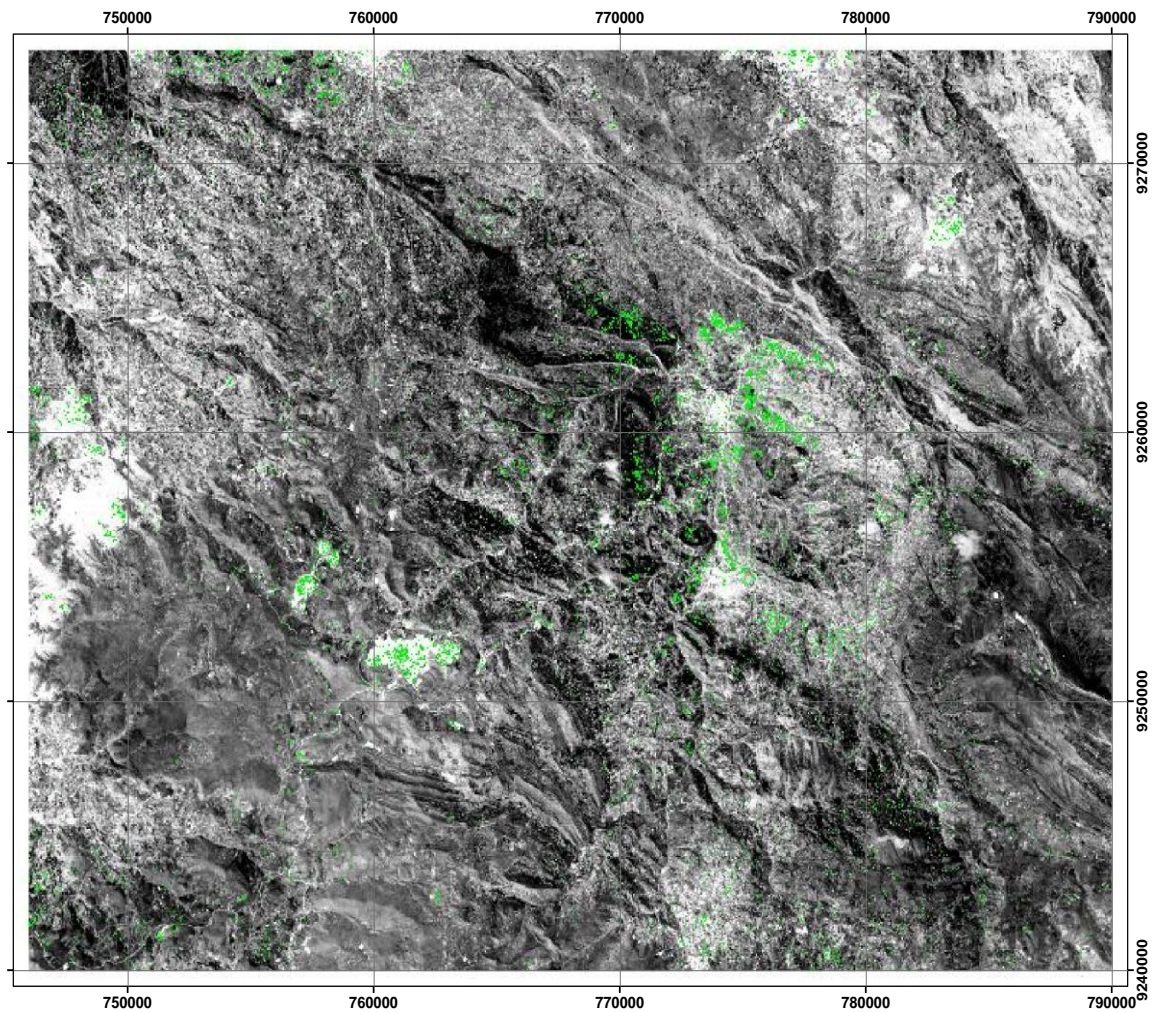


Figura 24: Zonas minerales con presencia espectral de Galena

Fuente: Elaboración propia.

En la figura N°24 se puede apreciar las zonas más probables de presencia de galena obtenidos en el análisis del variograma.

4.7.4 Cálculo del índice de vegetación (NDVI)

Para realizar el cálculo del índice de vegetación será de gran ayuda el software ENVI 5.3 en el cual se tendrá que realizar un cociente o ratio lo cual implica efectuar una división, pixel a pixel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen utilizando la formula antes ya mencionada en el marco teórico. En función de los diferentes tipos de vegetación en la zona en estudio. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada se calcula mediante la siguiente expresión:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

R = reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo de onda corta.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación. Ya que la firma espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas del visible (0.4 a 0.7 μm) y especialmente la banda roja (0.6 a 0.7 μm) y el NIR (infrarrojo cercano). Mientras en el visible los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al NIR. Por esta razón se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda R del espectro y la del NIR lo que permite separar, con relativa claridad, la vegetación vigorosa de otras cubiertas. Cuando la vegetación sufre algún tipo de estrés (como por ejemplo plagas o sequías intensas), su reflectividad será inferior en el NIR, aumentando paralelamente en el rojo (al tener menor absorción de clorofila), por lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor, con lo que podemos concluir que cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectividades de la banda NIR y la banda roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. (Chuvienco,2008)

El NDVI será utilizado en esta investigación para darnos indicios de contaminación en la vegetación, pues la alteración que producen los pasivos ambientales determina el inicio del origen de vegetación pobre a suelo desnudo o infértil

4.7.4.1 Análisis del índice de vegetación (NDVI)

- 0.8 < NDVI < 1 Vegetación. Vigorosa
- 0.6 < NDVI < 0.8 Vegetación. Poco Vigorosa
- 0.25 < NDVI < 0.6 Vegetación. Pobre con suelo desnudo
- 0 < NDVI < 0.25 Cubiertas artificiales o agua superficial

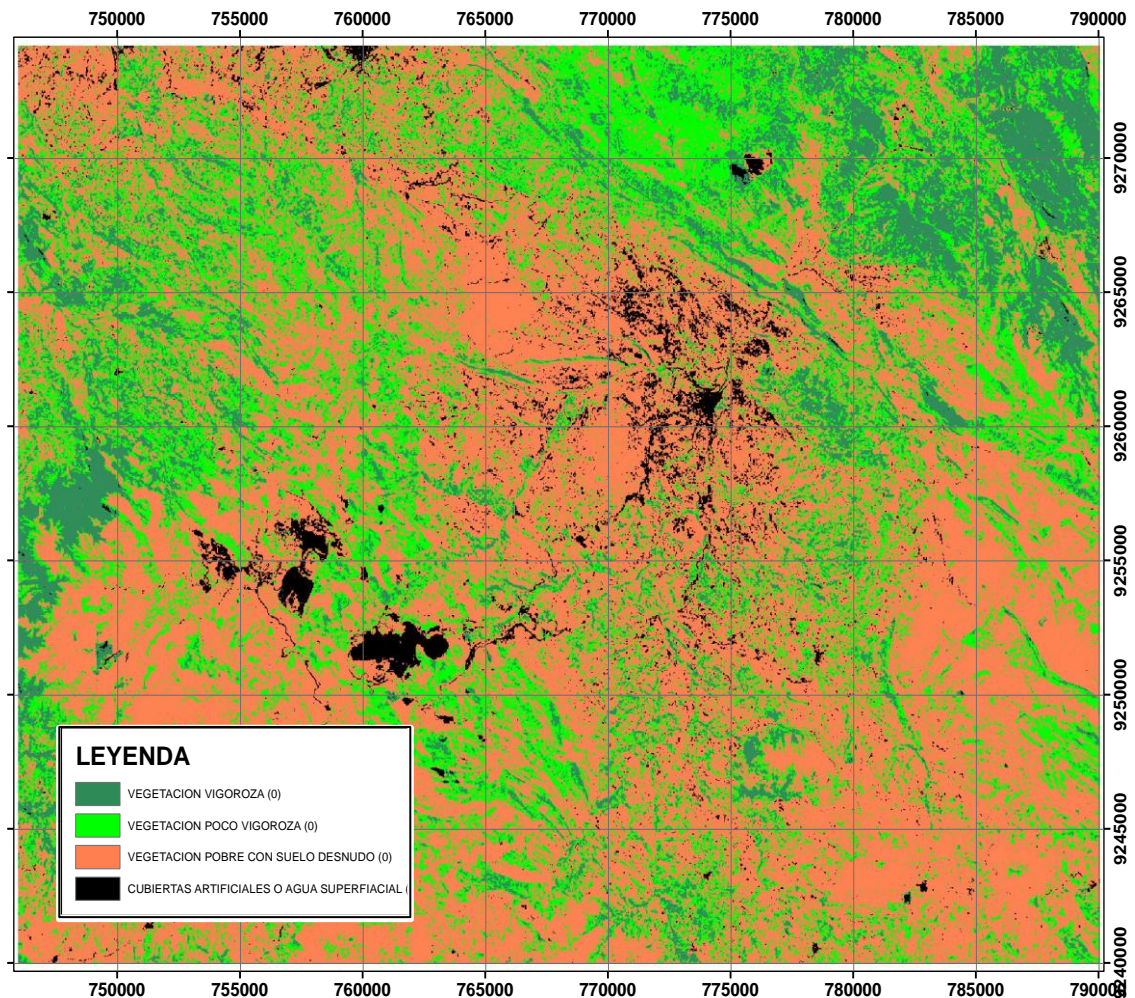


Figura 25: Análisis espectral de NDVI para la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo 3 tipos de vegetación, vigorosa se refiere a la vegetación abundante como arbustos y plantas, poco vigorosa, se refiere a pastizales como grama, ichu, etc. La vegetación pobre con suelo desnudo es la que presente poco o ninguna vegetación, cubiertas artificiales hace referencia a infraestructura.

4.7.5 Cálculo del índice de agua (NDWI)

El NDWI es una variación del NDVI en la cual nos permite identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad por medio del análisis de imágenes satélite contenidas en los diferentes espectros. De esta forma podemos emplear el índice como unidad de medida para determinar el estrés hídrico en vegetación, saturación de humedad en suelo o realizar delimitaciones directas de masas de agua como lagos y embalses,

$$\text{NDWI} = (\text{GREEN}-\text{NIR}) / (\text{GREEN}+\text{NIR}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

NIR= reflectancia corregida atmosféricamente correspondiente al infrarrojo cercano

GREEN= Banda 3

El NDWI será utilizado en esta investigación para dar indicios de contaminación en las masas de agua presentes (ríos y lagunas), pues la alteración que producen los pasivos ambientales de origen químico determina el inicio del origen de aguas acidas, con presencia de metaloides y metales pesados

4.7.5.1 Análisis del índice de agua (NDWI)

- 0.2 < NDWI < 1 Lagunas
- 0.1 < NDWI < 0.2 Cubiertas artificiales
- 0.25 < NDWI < -0.1 Ríos
- 0.75 < NDWI < -0.20 Contenido de agua en afloramiento rocoso
- 1 < NDWI < -0.75 Contenido de agua en la vegetación

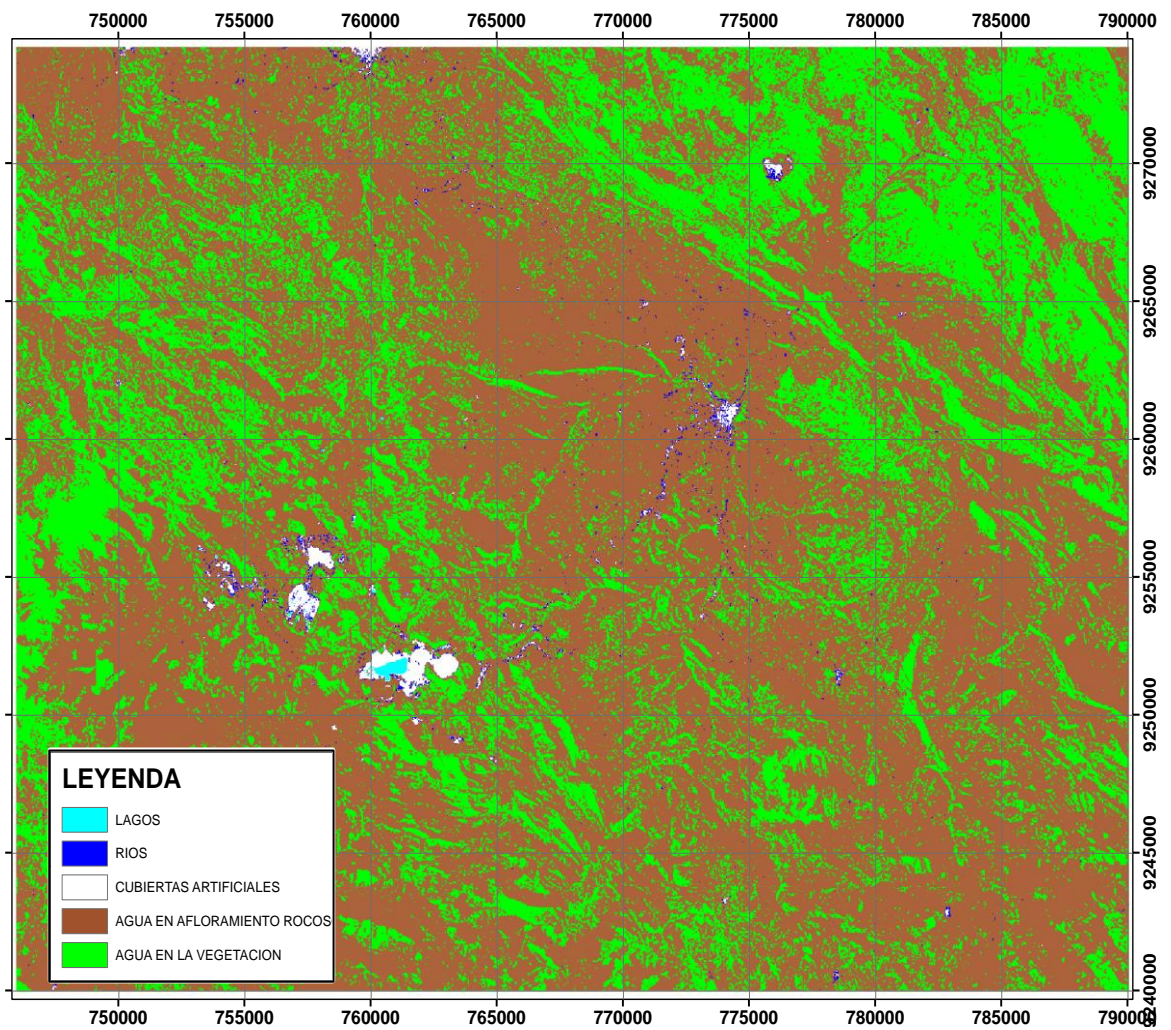


Figura 26: Análisis espectral de NDWI para la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

En el análisis de agua se identificó, masas de agua en ríos y lagos además de estar presente en forma de humedad en la vegetación abundante.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Minerales representativos encontrados en los PAMs de origen Químico.

Los principales minerales asociados a los PAMs de origen químico encontrados en la zona de estudio de la provincia de Hualgayoc fueron; Galena 27.6%, Pirita 26.03%, Covelina 21.6%, Pirita asociada a Limonita 13.41% y Calcopirita 11.36%.

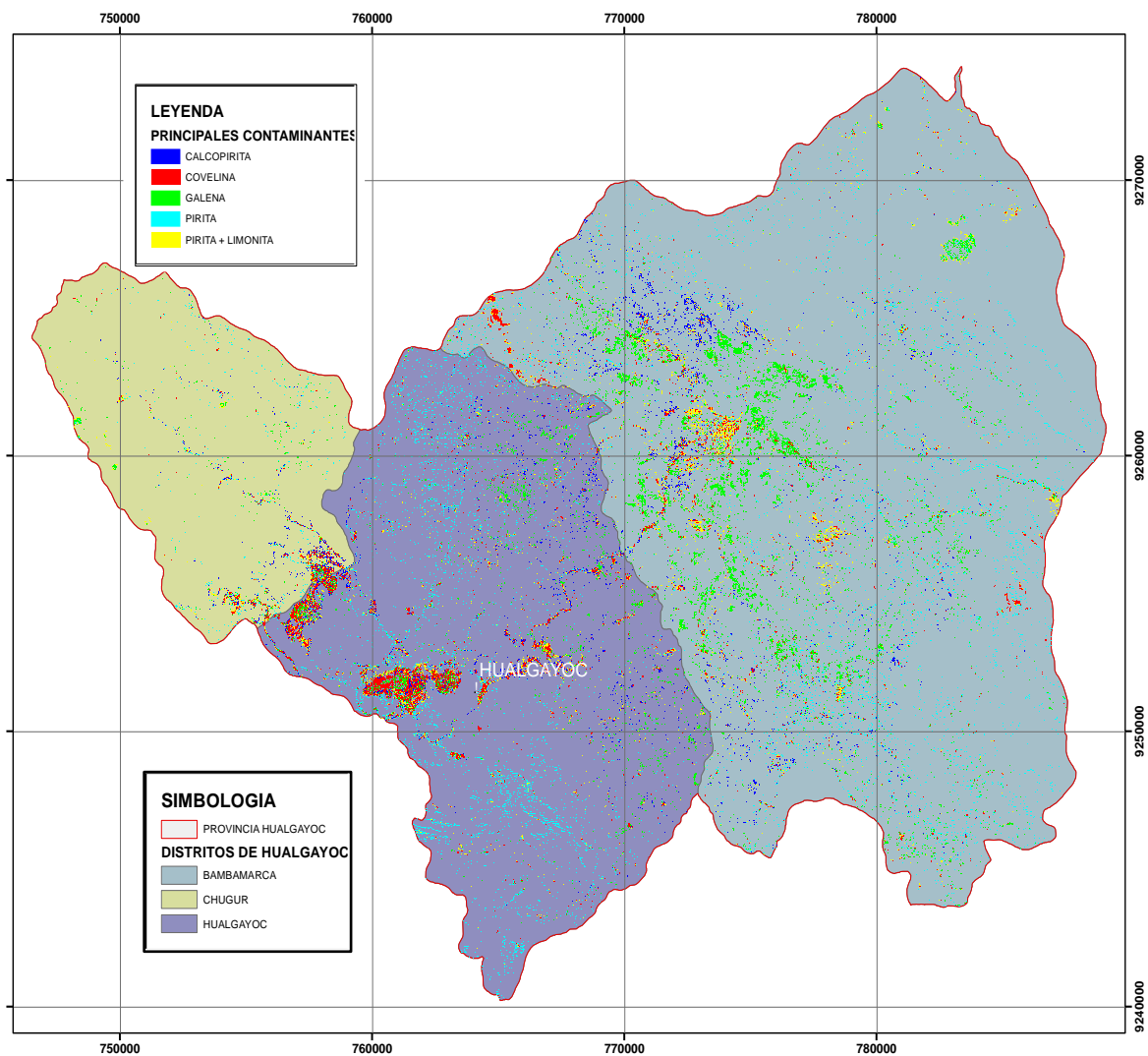


Figura 27: Análisis espectral de minerales en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

5.2 Metales asociados a los principales minerales encontrados en la zona de estudio.

Los principales metales asociados a los minerales son: Hierro 39.44%, Cobre 32.96% y Plomo 27.60%. Producto de la alteración mineral, específicamente de procesos de oxidación, los minerales de enlaces químicos débiles son desagrupados en elementos constituyentes como son metales pesados, metaloides y moléculas de carácter ácido como es el ácido sulfúrico (H_2SO_4).

La descomposición de estos minerales es transportada por agua y aire, generando un ambiente de riesgo medioambiental.

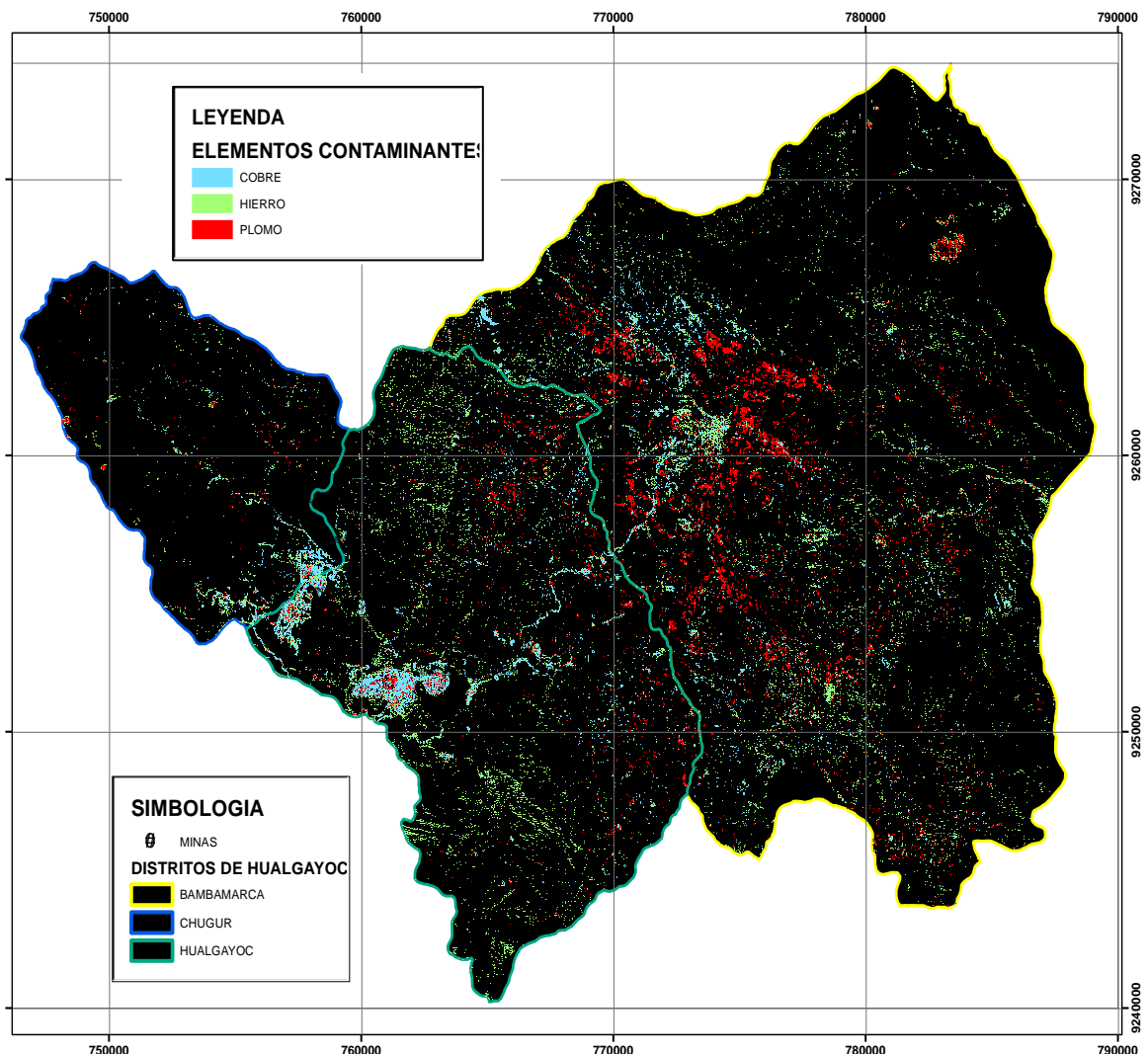


Figura 28: Análisis espectral de elementos contaminantes

Fuente: Elaboración propia

Los metales encontrados fueron cuantificados según el porcentaje, determinando que el Hierro es uno de los minerales más abundantes en la zona de estudio.

5.3 PAMs identificados que más afectan los cuerpos de agua de Hualgayoc.

Los principales cuerpos de agua que estarían siendo afectados por los minerales asociados a los PAMs de origen químico estarían focalizados en las siguientes coordenadas: Río Llaucan en la coordenada (774000, 9265000), Río Arascorque (767000, 9254000), Río de la quebrada (772000, 9265000), y Río el tingo (762000, 9254000).

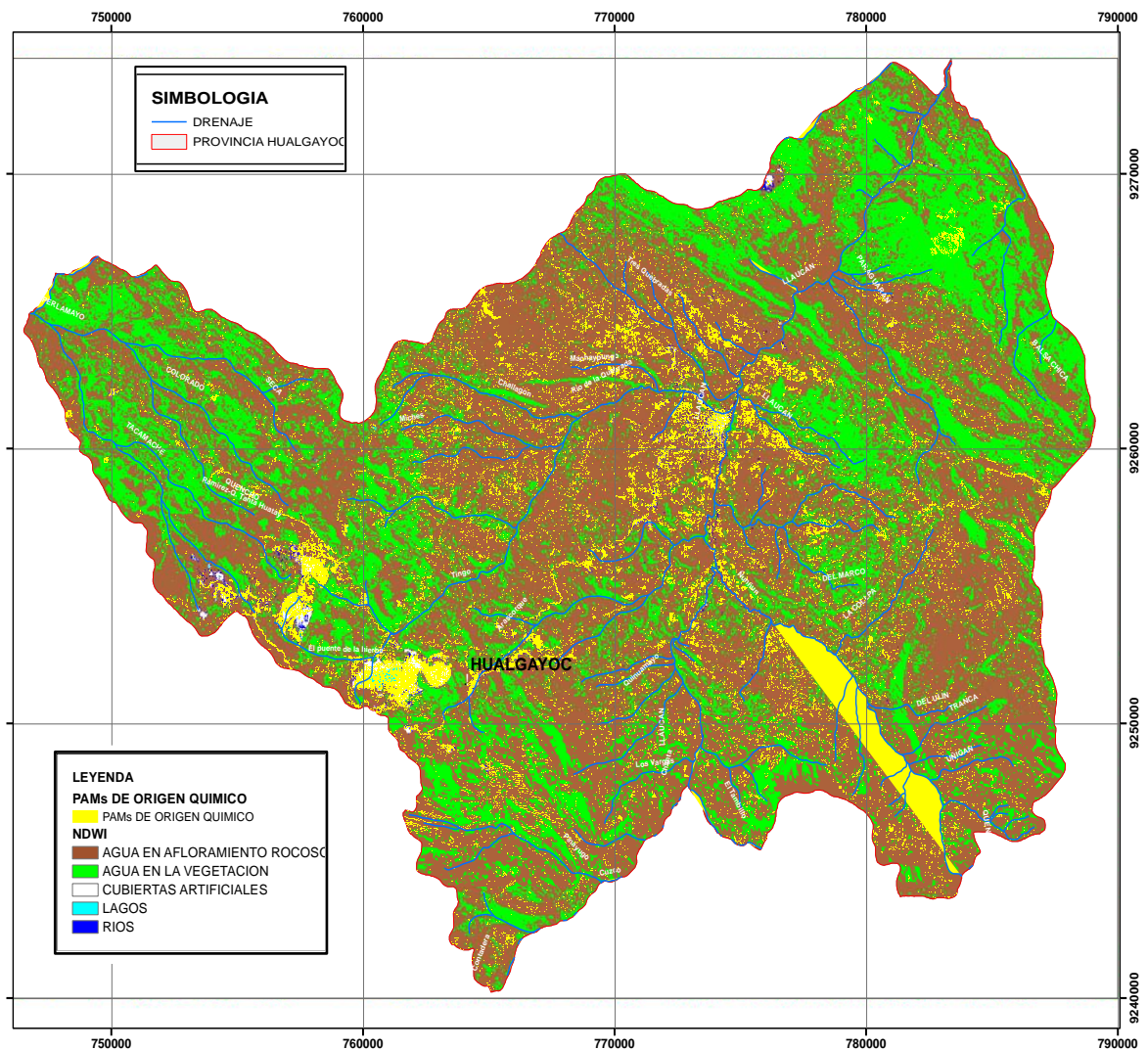


Figura 29: PAMs de origen químico que afectan al agua

Fuente: Elaboración propia

5.4 PAMs identificados que más afecta la vegetación en Hualgayoc

Se identificaron 3 tipos de vegetación. Vigorosa que hace referencia a las plantas con mayor contenido de clorofila entre ellos como árboles y plantas de gran tamaño. Vegetación poco vigorosa se refiere a la existencia de una cantidad media de clorofila. Vegetación pobre con suelo desnudo en el cual se puede encontrar escasa o nula vegetación, al igual que en las cubiertas artificiales. En el cual se puede apreciar que la vegetación pobre con suelo desnudo es donde existe mayor cantidad de minerales asociados a los PAMs de origen químico.

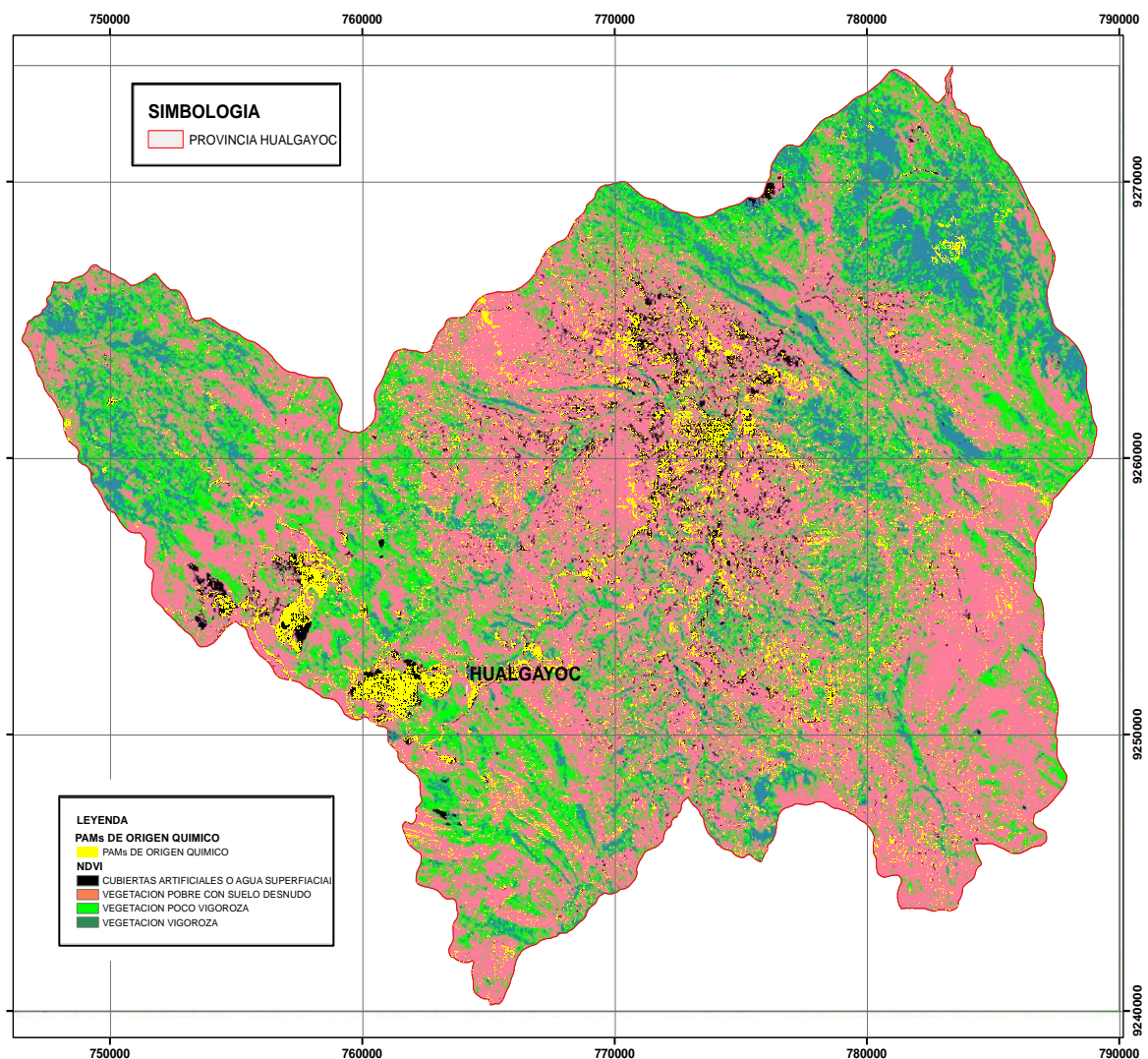


Figura 30: PAMs de origen químico que afectan la vegetación

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1 Minerales representativos encontrados en los PAMs de origen Químico.

Partiendo del análisis espectral nuestra investigación arrojó que los principales minerales asociados a Pasivos Ambientales Mineros existentes en la zona de Hualgayoc fueron: Galena, pirita, covelina, pirita asociada a limonita y calcopirita. Los mismos minerales fueron encontrados en el estudio de Canchaya (1982), quien realizó un estudio geológico basándose en el mapa metalogénico del Perú principalmente en la Franja XX que se ubica en la Cordillera Occidental del Norte y centro del Perú (5°-12°). Esta franja está controlada por el sistema de fallas y cabalgamientos NO-SE de los sistemas Chonta y Punre-Canchis-Magistral: donde existe pórfidos de Cu-Mo-Au, Skarns de Pb-Zn-Cu-Ag y depósitos polimetálicos relacionados con intrusivos del Mioceno. Así mismo, el Gobierno regional de Cajamarca (GORE, 2009). Planeamiento, presupuesto y acondicionamiento territorial Cajamarca. Realiza un estudio geológico de las características geológicas del departamento antes mencionado, de acuerdo a sus formaciones a través del tiempo, encontrándose en la provincia de Hualgayoc las formaciones Inca, Chule y Pariatambo asociada a pirita, enargita, covelita y zona oxidada rica en oro. Otros autores como (Vidal y Cabos, 1982), también realizaron investigaciones geológicas insitu descubriendo parecida mineralogía en la zona. Con estos resultados, podemos decir que las técnicas de teledetección son herramientas bastante útiles para la identificación de minerales y otros elementos; técnicas como estas han sido utilizadas en otros países como Cuba, EE.UU y Canadá. Por ejemplo, Milián, et; al, (2012), realizó una investigación para determinar principales zonas afectadas por pasivos ambientales mineros utilizando el método de fotointerpretación y Bremer, et; al, (2016), realiza una caracterización de niveles de contaminación de una planta extractora de azufre utilizando imágenes de satélite de alta resolución para optimizar el plan de muestreo en México. Con ello corroboramos que técnicas de teledetección son una herramienta útil para caracterización de minerales y zonas impactadas por metales pesados y deben ser tomadas en cuenta al momento de realizar caracterizaciones de sitio.

6.2 PAMs identificados que más afectan los cuerpos de agua de Hualgayoc

Para el caso del índice de agua NDWI, después de un análisis espectral de los componentes superficiales de la zona de estudio se obtuvo 4 tipos de cuerpos de agua: Agua en afloramiento rocoso, agua en vegetación, cubiertas artificiales, lagos y ríos. Aunque a nivel nacional, no hayamos podido encontrar bibliografía relacionada al tema específico, técnicas de teledetección

han servido en varios estudios para determinar no solo cuerpos de agua sino también volúmenes de agua, por ejemplo, el trabajo titulado: Análisis comparativo de las superficies regadas en los acuíferos del Campo de Montiel y La Mancha Occidental en el período 2004-2008 (Bea et al, 2010) es un excelente modelo de cómo se puede utilizar estas herramientas para determinar y comparar año a año volúmenes de agua. Nuestro trabajo, ha sido capaz de identificar tipos de cuerpos de agua para así ser asociados a la mineralogía del lugar y una vez superpuestos a los PAMs inventariados por el MEM, dar como resultado, área de prioridad para la ejecución de trabajos de remediación ambiental. De esta manera encontramos que los ríos con mayor cercanía a PAMs serían: Río Llaucano en la coordenada (774000, 9265000), Río Arascarque (767000, 9254000), Río de la Quebrada (772000, 9265000), y Río el tingo (762000, 9254000). Por otro lado, nuestra investigación identificó metales asociados a los minerales presentes en la zona como: plomo, cobre y hierro que son fuentes de contaminación hacia cuerpos de agua y vegetación.

En comparación con el estudio de la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2015) en el cuál mediante el informe No.005-2015-ANA-AAA.M-SDGCRH, presentó los resultados de los análisis hechos a las muestras de agua tomadas durante el Tercer Monitoreo Participativo de la Calidad del Agua Superficial de la Cuenca del Río Llaucano, en la provincia de Hualgayoc, según el documento, en el agua de la zona existen metales pesados como, aluminio, calcio, sulfato, arsénico, cadmio, cobre, fierro, plomo y zinc, por encima de los límites máximos permisibles, esto sería como consecuencia de aproximadamente 964 pasivos ambientales dejados por la actividad minera. Cabe mencionar que otros estudios como: Estudio de Impacto Ambiental de Tantahuatay y Cerro Corona en su línea base, también presentan niveles altos de metales en ciertas zonas del lugar por ejemplo: Quebrada La Eme, Quebrada tres Amigos y otros. Estos resultados, corroboran una vez más que el trabajo realizado ha sido bastante certero en la localización de PAMs y su cercanía y priorización para la remediación ambiental.

6.3 PAMs identificados que más afecta la vegetación en Hualgayoc.

Nuestro trabajo, identificó 3 tipos de vegetación: Vigorosa, que hace referencia a las plantas con mayor contenido de clorofila entre ellos árboles y plantas de gran tamaño. Vegetación poco vigorosa, se refiere a la existencia de una cantidad media de clorofila y vegetación pobre con suelo desnudo en el cual se puede encontrar escasa o nula vegetación, al igual que en las cubiertas artificiales. De todos estos tipos de vegetación, la vegetación pobre con suelo desnudo fue asociada a PAMs. Al comparar este análisis con los principales minerales encontrados en la zona se hace evidente que en suelo desnudo y cubiertas artificiales hay mayor presencia de PAMs de origen químico. Al parecer existe gran número de estudios de

vegetación a través de fotointerpretación Y/o teledetección. Por ejemplo, Gonzaga (2014). Utilizo la teledetección como una herramienta valiosa para determinar y establecer indicadores de degradación y conservación de recursos naturales, en suelos y coberturas de vegetación, en el estudio que realizo para determinar los índices de vegetación y estrés hídrico en la provincia de Loja al sur de Ecuador, obtuvo que los índices de vegetación evaluados, NDVI, MSI y SAVI derivados de las imágenes Landsat 7 y ASTER, permitieron estimar el estado o vigor vegetal de las coberturas presentes en el área de estudio. Por otro lado, Miyashiro & Ortiz (2016). Utilizaron teledetección para estimar la variación de cobertura vegetal en las lomas del distrito de villa maría del triunfo por la expansión urbana y minera. En el análisis realizado mediante el índice de vegetación de imágenes satelitales ópticas determinaron dos tipos de superficies denominadas “normal” y “extraordinaria”. Haciendo referencia a que las superficies normales son las que presentan poca vegetación y las superficies extraordinarias es donde se encuentra abundante vegetación la cual debe ser protegida o reglamentada al momento de la expansión urbana o minera.

Finalmente, podemos decir que las técnicas de teledetección y fotointerpretación, han sido evaluadas y utilizadas en distintos campos como geología, hidrología, vegetación, etc; nuestro trabajo, recopiló la metodología y la información utilizada en cada uno de estos trabajos, para así elaborar mapas temáticos en los cuales se superpusieron cada una de las características mineralógicas, hidrológicas y geográficas, para así dar como resultado la identificación de zonas donde exista mayor presencia de pasivos ambientales mineros y de esta manera priorizar su remediación ambiental. Nuestro trabajo recomienda el uso de estas técnicas, como herramientas previas de análisis y localización que ayudaran a optimizar tiempos y costos tanto en la identificación como en la priorización de PAMs.

CONCLUSIONES

- Atraves de la teledetección y fotointerpretación, se identificaron los principales minerales presentes en zonas afectadas por Pasivos Ambientales Mineros en el cuadrángulo 14 F y 14 G del distrito de Hualgayoc, los cuales fueron: Covelina, calcopirita, pirita, pirita- limonita y galena, encontrando en mayor abundancia a la Galena. Así mismo, los metales asociados a los minerales encontrados fueron: Cobre, hierro y plomo, siendo el más abundante el hierro. los principales metales asociados a los minerales fueron: (cobre, hierro, plomo). Siendo el más abundante el Hierro
- En la zona de estudio se identificaron 4 tipos de cuerpos de agua: Agua en afloramiento rocoso, agua en vegetación, cubiertas artificiales, lagos y ríos. Los cuerpos de agua que estarían siendo más afectados por la presencia de PAMs fueron: Rio Llaucano en la coordenada (774000, 9265000), Rio Arascorque (767000, 9254000), Rio de la quebrada (772000, 9265000), y Rio el tingo (762000, 9254000).
- Nuestro trabajo, identificó 3 tipos de vegetación: Vigorosa, que hace referencia a las plantas con mayor contenido de clorofila entre ellos árboles y plantas de gran tamaño. Vegetación poco vigorosa, se refiere a la existencia de una cantidad media de clorofila y vegetación pobre con suelo desnudo en el cual se puede encontrar escasa o nula vegetación, al igual que en las cubiertas artificiales. De este análisis, se concluyó que se debe priorizar una remediación de PAMs en las coordenadas: (775000,9262000) y (766000,9261000), ya que son las zonas donde los PAMs han deteriorado el tipo de vegetación presente.

RECOMENDACIONES

- La teledetección es un método que debe ser incorporado en estudios previos a trabajos de campo para identificación de PAM's y así tener una idea clara de la zona de interés que se desea investigar.
- Sería ideal una mayor cantidad de imágenes satelitales con mayor resolución espacial, a fin de obtener una mejor precisión de la zona de estudio.
- Priorizar PAMs de origen químico que están afectando a cuerpos de agua y vegetación para su remediación.

REFERENCIAS

- Aduvire, O. 2006. Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Tesis de grado. Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. Madrid.
- Aranda Valencia, A. R. (2017). Contaminación del agua en la protección del ambiente ya la salud en el distrito de Hualgayoc—departamento de Cajamarca 2015.
- Arcega-Cabrera, F., Castillo-Blum, S. E., & ARMIENTA, M. A. (2010). Tetraethyl lead release from sediments in a mine-impacted tropical river. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 26(2), 119-127.
- APN - Administración de Parques Nacionales - Sistema de Información de Biodiversidad (APN – SIB). 2005. Protocolo para el pre procesamiento de imágenes satelitales Landsat para aplicaciones de la administración de parques nacionales. Buenos Aires – Argentina.
- ANA, 2014, Informe No.005-2015-ANA-AAA.M-SDGCRH.
- Benavides de la Quintana, A. (2013). El Perú tiene las condiciones para ser un país desarrollado.
- Bernex de Falen, N. (1986). La geografía regional del norte, geografía viva y vivida. pp13-41. en CONCYTEC: ly, 11.
- Bremer Bremer, M. H., Lozano García, D. F., Rodríguez García, M., & Hori Ochoa, M. D. C. (2016). Caracterización de niveles de contaminación en una planta extractora de azufre utilizando imágenes de satélite de alta resolución para optimizar el plan de muestreo. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(2), 165-176.
- Canchaya, S. (1982). Mineralogía y génesis de los depósitos de Cu-Ag-Pb y Zn de la Mina Bella Unión, Hualgayoc-Cajamarca. XVI Con Ing Minas, Lima-Perú (Nov 1982), 18.
- Chuvieco, E. 2008. Teledetección Ambiental 3ra edición. Barcelona España: Editorial Ariel S.A.

- Chuvienco Salinero, E. (2008). Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio (No. 528.8 CHU).
- Defensoría del Pueblo, 2016. Perú pasivos ambientales de alto riesgo.
- Dirección General de Minería, 2016. Actualización general de pasivos ambientales mineros, aprobado por resolución ministerial N° 535-2016.
- El Khalil, H., El Hamiani, O., Bitton, G., Ouazzani, N., & Boularbah, A. (2008). Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: monitoring metal content and toxicity of soil runoff and groundwater. *Environmental Monitoring and Assessment*, 136(1-3), 147-160.21 p.
- Esperanza, F y Zerda, H. 2002. Potencialidad de los índices de vegetación Para la discriminación de coberturas forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero, Facultad de Ciencias Forestales, Santiago del Estero, 2002.
- Fernández., I., Herrero., E. 2001. El Satélite Landsat. Análisis visual de imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satélite Landsat. Universidad de Valladolid
- Feeters, S. 1996. El Uso del Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI) en la Delineación de Características de Aguas Abiertas. *Revista Internacional de Teledetección* (17): 1425-1432
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Gao, J., Xu, W., & Geng, J. (2006). Empleo del método de correlación sombreado-moteado para la reconstrucción tridimensional de modelos dentarios. *Revista Internacional de Prótesis Estomatológica. Edición Hispanoamericana*, 8(2), 162-163
- García Pérez, L. G. (2013). Magnetita en el cuerpo humano: consecuencias potenciales y caracterización básica de la Magnetita biogénica nanométrica.
- Gobierno Regional Cajamarca, 2006. Estudio de diagnóstico y zonificación para el tratamiento de demarcación territorial de la Provincia de Hualgayoc.
- Gobierno regional de Cajamarca, 2009. Estudio Geológico del Departamento de Cajamarca.
- Gómez, L. 2003. La Relación entre el Índice Normalizado de Vegetación y la Variabilidad del Clima en Oaxaca: Una Herramienta para el Manejo de Ecosistemas. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM – Mexico.

- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+ para la caracterización de la cobertura vegetal en la zona centro de la provincia de Loja, Ecuador. (Tesis de postgrado). Universidad Nacional de la Plata. La Plata.
- Gómez Álvarez, A., Villalba Atondo, A., Acosta Ruíz, G., Castañeda Olivares, M., & Kamp, D. (2004). Metales pesados en el agua superficial del Río San Pedro durante 1997 y 1999. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 20(1).
- Guzman, M. S., De Jaeger, X., Raulic, S., Souza, I. A., Li, A. X., Schmid, S., ... & Prado, V. F. (2011). Elimination of the vesicular acetylcholine transporter in the striatum reveals regulation of behaviour by cholinergic-glutamatergic co-transmission. *PLoS biology*, 9(11), e1001194.
- Ley que Regula el Cierre de Minas (Ley N° 28090) y sus modificatorias (Ley N° 28234 y Ley N° 28507).
- Lorimer, N. Haight, and R. A. Leary. 1994. The fractal forest: fractal geometry and applications in forest science. United States Department of Agriculture Forest Service, North Central Forest Experiment Station, General Technical Report; NC170. St. Paul, Minnesota, USA.
- Medina, C. (2009). Modelos Numéricos y Teledetección en el Lago de Izabal, Guatemala. (Tesis Doctoral). Universidad de Cádiz. Guatemala.
- MEM. 2015. Inventario de Pasivos Ambientales Mineros. Resolución Ministerial N° 102-2015-MEM/DM.
- MEM. 2016. Inventario de Pasivos Ambientales Mineros. Actualización general de pasivos ambientales mineros, aprobado por resolución ministerial N° 535-2016-MEM/DM.
- Mena Alberca, M. P., Campos, R., & Alvarino, H. (2017). Biorremediación de Metales Pesados con Aislados Microbianos Procedentes de Pasivos Ambientales Mineros y Aguas del Río Hualgayoc-Cajamarca.
- Mendoza Zafra, M. 2017. Presidente de la comisión de Gestión Ambiental del Consejo Regional Cajamarca.
- MINAN. 2016. Resolución Ministerial N° 272-2016. Declaran en Emergencia Ambiental la parte alta de las microcuencas de los ríos Tingo, Maygasbamba, Hualgayoc – Arascorgue y Perlamayo, ubicadas en la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca.
- Milián-Milián, E., Ulloa-Carcassés, M., & Jornada-Krebs, A. S. (2012). Evaluación minero-ambiental del yacimiento polimetálico Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba. *Minería y Geología*, 28(3).

- Miyasiro, M. & Ortiz, M. (2016). Estimación mediante la teledetección de la variación de la cobertura vegetal en las lomas del distrito de Villa María del Triunfo por la expansión urbana y minera. (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima.
- Montoya, S. Modelamiento de transporte de contaminantes de botaderos mineros y depósitos de relaves. *Civilizate*, (3), 53-56.
- Moran, R. (2001). Aproximaciones al costo económico de impactos ambientales en la minería. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 17(1).
- Oyarzun, R., Higuera, P., & Lillo, J. (2011). Minería ambiental: Una introducción a los impactos y su remediación. Ediciones GEMM-Aula2punto.net.
- Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).
- Pérez, C y Muñoz, A. 2006. Teledetección Nociones y Aplicaciones. Universidad de Salamanca. 356 p. ISBN-10: 84-611- 1613-5.
- Quispe Jara, J. L. (2015). Determinación de los controles de mineralización del depósito de alta sulfuración ciénaga norte, Hualgayoc-Cajamarca.
- Ráez, E., & Dourojeanni, M. (2016). Los principales problemas ambientales políticamente relevantes en el Perú. 6LVWHPD 1DFLRQDO GH, QIRUPDFLYQ \$ PELHQWDO, 1-15.
- Reglamento de PAMs ley N° 28271. Decreto supremo N° 290-2006-MEN/DM.
- Reglamento de Pasivos Ambientales de la Actividad Minera (D.S. N° 059-2005-EM, de diciembre del 2005) y su modificatoria (D.S. N° 003-2009-EM, de enero del 2009).
- Reglamento de Cierre de Minas (D.S. N° 033-2005-EM) y sus modificatorias (D.S. N° 035-2006-EM y D.S. N° 045-2006-EM)
- Romero, A., Medina, R., & Flores, S. Estudio de los metales pesados en el relave abandonado de Ticapampa. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 11(22), 13-16.
- Sánchez, J. (2015). Estimación mediante teledetección de la evapotranspiración real a partir de un modelo desacoplado de dos fuentes. (Tesis Doctoral). Universidad de Valencia. Valencia.

- Sigmur. 2006. Universidad de Murcia. SIG y Teledetección. Murcia – España [publicación en línea]. Disponible en Internet en: <http://www.um.es/geograf/Sigmur/index.html> [Consulta: 20 de agosto 2011].
- Tejada Marroquin, D. (2011). Calidad de agua (vigilancia y control), identificación de proyectos de inversión pública o privada. Cuenca del río Chillón, río Madre de Dios y río Hualgayoc.
- Towers, P. 2002. Conceptos Iniciales sobre Teledetección y su Aplicación al Agro. Buenos Aires, 138 p.
- Vidal, C., & Cabos, R. (1983). Zonamiento regional de las alteraciones y menas hidrotermales en Hualgayoc, Cajamarca. Sociedad Geológica del Perú. Boletín, (71), 117-120.

ANEXOS



Foto 1: bocamina - labor minera con presencia de zonas oxidadas

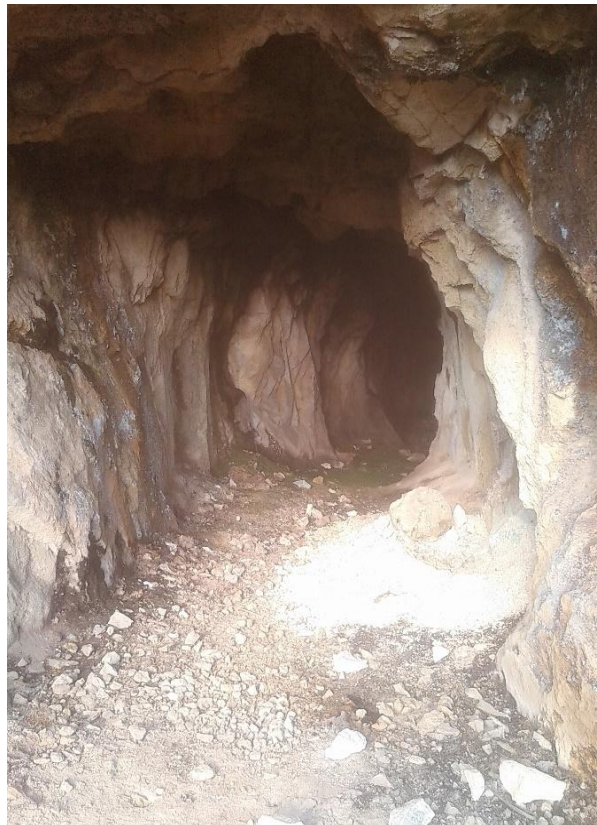


Foto 2: Labor minera sin control de cierre de operaciones



Foto 3: Cerro Carolina, alteración de la vegetación por relaves.



Foto 4: Bocamina sin control de cierre de operación con presencia de aguas acidas.



Foto 5: Alteración de la vegetación por relaves.



Foto 6: Toma de puntos Hualgayoc.