



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA DE MINAS

“TELEDETECCIÓN DE MINERALES GENERADORES DE ACIDEZ Y METALES PESADOS, USANDO IMÁGENES SATELITALES ÁSTER EN EL DISTRITO DE BAMBAMARCA, CAJAMARCA - 2018”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Bach. Castrejon de la Cruz, Alberto
Bach. Diaz Cubas, Juan Willo

Asesor:

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán

Cajamarca – Perú
2018

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por ellos Bachilleres: **Castrejon de la Cruz, Alberto y Diaz Cubas, Juan Willo**, denominada:

“TELEDETECCIÓN DE MINERALES GENERADORES DE ACIDEZ Y METALES PESADOS, USANDO IMÁGENES SATELITALES ÁSTER EN EL DISTRITO DE BAMBAMARCA, CAJAMARCA - 2018”

Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán
ASESOR

Ing. Rafael Napoleón Ocas Boñon
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Víctor Eduardo Álvarez León
JURADO

Ing. Alex Patricio Marinovic Pulido
JURADO

DEDICATORIA

A Dios por haber estado en todo momento fortaleciéndome para seguir con la carrera; A mis padres y hermanos quienes me apoyaron en los momentos más difíciles.

Castrejon de la Cruz, Alberto

Esta tesis se la dedico Dios que me ha dado la vida y las fuerzas para seguir adelante;

A mis padres, hermanos y amigos quienes son los merecedores de todo mi esfuerzo, sacrificio y dedicación.

Diaz Cubas, Juan Willo

AGRADECIMIENTO

A nuestro asesor Ing. Daniel Alejandro Alva Huamán por su compromiso en la orientación para la elaboración de este proyecto.

A todos los docentes de la Universidad Privada del Norte por impartirnos sus conocimientos para una buena toma de decisiones.

A nuestros amigos y compañeros de estudio que han contribuido en enriquecer nuestra experiencia profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DE LA TESIS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE FOTOS	x
ÍNDICE DE PLANOS	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT	xiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. Realidad problemática.....	14
1.2. Formulación del problema.....	15
1.3. Justificación	15
1.4. Limitaciones.....	15
1.5. Objetivos.....	15
1.5.1. Objetivo general	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. Antecedentes	16
2.2. Bases teóricas.....	17
2.2.1. Residuos ácidos	17
2.2.2. Formación de residuos ácidos	17
2.2.3. Residuos con metales pesados	18
2.2.4. Formación de residuos con metales pesados.....	18
2.2.5. Fundamentos de la teledetección.....	20

2.2.6. Fuentes de energía y principios de radiación	24
2.2.7. Caracterización de las imágenes de satélite	25
2.2.8. Visualización de imágenes	27
2.2.9. Procesamiento De Imágenes Satelitales	27
2.2.10. Sensores remotos	28
2.3. Definición de términos básicos	29
2.4. Hipótesis.....	30
CAPÍTULO 3. GENERALIDADES.....	31
3.1. Ubicación.....	31
3.2. Extensión territorial.....	32
3.3. Población.....	32
3.4. Minerales generadores de acidez y metales pesados.....	32
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....	34
4.1. Operacionalización de variables	34
4.2. Diseño de investigación	35
4.3. Unidad de estudio	35
4.4. Población.....	35
4.5. Muestra.....	35
4.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos.....	35
4.7. Procedimientos de análisis de datos.....	35
4.7.1. Adquisición de imágenes satelitales	35
4.7.2. Unión y recorte de la zona de estudio.....	35
4.7.3. Corrección de imágenes Áster	38
4.7.4. Creación de máscaras de filtrado de datos.....	40
4.7.5. Análisis Espectral	44
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	62
5.1. Presentación De Resultados obtenidos del análisis espectral	62
5.2. Presentación de resultados obtenidos en campo	63
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONTRASTACIÓN.....	72
6.1 Discusión	72
6.2 Contrastación	75

CONCLUSIONES.....	76
RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
ANEXOS	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Principales minerales que generan residuos ácidos y metales pesados.	19
Tabla 2: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.	32
Tabla 3: Marco operacional de variables e indicadores.....	34
Tabla 4: Firma espectral de minerales que generan acidez y metales pesados en condiciones de oxidación.	44
Tabla 5: Codificación de muestras de finos tomadas en la zona de estudio.....	58
Tabla 6: Análisis de pH de muestra de sedimentos.....	59
Tabla 7: codificación de muestras de agua tomadas en la zona de estudio.	60
Tabla 8: Análisis de pH de muestra de agua.	61
Tabla 9: Clasificación de muestras de sedimentos finos en torno a grado de acidez.	63
Tabla 10: Clasificación de muestras de agua en torno a grado de acidez.	64
Tabla 11: Estaciones de monitoreo del rio Llaucano Maigabamba y Hualgayoc (DIGESA, 2011).	69
Tabla 12: Resultados del análisis de metal pesado Hierro en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13 (DIGESA, 2011).....	69
Tabla 13: Resultados del análisis de metal pesado Zinc en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13. (DIGESA, 2011).....	70
Tabla 14: Resultados del análisis de metal pesado Hierro en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13 (DIGESA, 2011).....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: (i) reflexión, (ii) Emisión y (iii) emisión-reflexión. (Drozd; Ferrero, 2011).	20
Figura 2: Esquema de una onda electromagnética. (Chuvienco, 2015)	21
Figura 3: Ubicación del distrito de Bambamarca.	31
Figura 4: Imágenes Multiespectrales de los barridos correspondientes a la zona de estudio.	36
Figura 5: Unión de imágenes multiespectrales	37
Figura 6: Recorte de la zona de estudio.	38
Figura 7: Imagen sin corrección	39
Figura 8: Corrección Atmosférica	40
Figura 9: Mascara de nubes.....	41
Figura 10: Mascara de vegetación.	42
Figura 11: Aplicación de las máscaras.	43
Figura 12: Análisis de firmas espectral de esfalerita.....	47
Figura 13: Ubicación de zonas con aporte de esfalerita.	48
Figura 14: Análisis de firmas espectral de Ferrihidrita	49
Figura 15: Ubicación de zonas con aporte de Ferrihidrita.	50
Figura 16: Análisis de firmas espectral de Gypsum.....	51
Figura 17: Ubicación de zonas con aporte de Gypsum.	52
Figura 18: Análisis de firmas espectral de pirita - calcopirita	53
Figura 19: Ubicación de zonas con aporte de pirita - calcopirita.	54
Figura 20: Análisis de firmas espectral de Thenardita.	55
Figura 21: Ubicación de zonas con aporte de Thenardita.	56
Figura 22: Ubicación de zonas con aporte DE MINERALES SULFURADOS y metales pesados. 62	
Figura 23: Ubicación de muestras de sedimentos activos por clasificación de acidez.	65
Figura 24: Ubicación de sedimentos activos MS6.	66
Figura 25: Ubicación de muestras de sedimentos activos MS1, MS2, MS3, MS4, MS5, MS7, MS8, MS9, MS10, MS11, MS12, MS13, MS13, MS14, MS15, MS16.	66
Figura 26: Ubicación de muestras de agua por clasificación de acidez.	67
Figura 27: Ubicación de muestra de agua MS6.	68
Figura 28: Ubicación de muestras de agua MS1, MS2, MS3, MS3, MS4, MS5, MS5, MS7, MS8, MS9, MS10, MS11, MS12, MS13, MS14, MS15, MS16.	68
Figura 29: Ubicación de muestras de DIGESA por muestreo de metales pesados.	71
Figura 30: Principales zonas con presencia de minerales generadores de acidez, y corroboración en campo de acidez en agua y suelos.	73
Figura 31: Principales zonas con presencia de minerales generadores de metales pesados, y corroboración con los puntos de monitoreo de DIGESA.	74

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1: Toma de Muestra 01.....	85
Foto 2: Toma de Muestra 02.....	85
Foto 3: Toma de Muestra 03.....	86
Foto 4: Toma de Muestra 05.....	86
Foto 5: Toma de Muestra 05.....	87
Foto 6: Toma de Muestra 07.....	87
Foto 7: Toma de Muestra 08.....	88
Foto 8: Toma de Muestra 11.....	88
Foto 9: Toma de Muestra 11.....	89
Foto 10: Toma de Muestra 12.....	89
Foto 11: Toma de Muestra 13.....	90
Foto 12: Toma de Muestra 14.....	90
Foto 13: Toma de Muestra 15.....	91
Foto 14: Toma de Muestra 16.....	91

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1: Plano topográfico - hidrológico.	81
Plano 2: Plano de minerales que generan acides y metales pesados.	82
Plano 3: Plano de contrastación de zonas ácidas vs muestras en campo.	83
Plano 4: Plano de contrastación de metales pesados vs DIGESA, 2011	84

RESUMEN

La presente investigación titulada “Teledetección de minerales generadores de acidez y metales pesados, usando imágenes satelitales Áster en el distrito de Bambamarca, Cajamarca - 2018” busca dar un enfoque a la problemática del distrito de Bambamarca en el cual los pobladores, están siendo expuestos a elementos tóxicos, de riesgo a la salud, presentes en el suelo, agua y aire de la región, a causa de la erosión e intemperismo de minerales locales y antiguas labores mineras. Estos desechos quedaron a la intemperie sin ninguna protección y dispersos en el distrito, los cuales son fuentes potenciales de contaminación al ambiente. es por ello que la presente investigación tuvo como objetivo principal detectar la ubicación de minerales generadores de acidez y metales pesados mediante el análisis multiespectral de imágenes satelitales lo cual permitirá conocer la ubicación de los principales focos de contaminación del ambiente y zonas afectadas por la contaminación de minerales generadores de acidez y metales pesados. Con un diseño de investigación del tipo aplicada no experimental – transversal - causal, usando un método descriptivo analítico. En el cual se desarrolló en cada uno de sus capítulos una nueva metodología enfocada a un análisis multiespectral, llegando a obtener resultados que verifican un mayor aporte de acidez en minerales como: Pirita, Calcopirita y Esfalerita, ya que son minerales más inestables, y en minerales como Ferrihidrita y thenardita, un mayor aporte de metales pesados en condiciones de acidez. Concluyéndose así que es posible la ubicación de zonas con presencia de residuos ácidos y residuos con metales pesados mediante el uso de técnicas de análisis multiespectral, identificando la mayor cantidad de zonas con residuos contaminantes al Nor – Oeste del distrito de Bambamarca.

ABSTRACT

The present investigation entitled " Remote sensing of acid and heavy metal generators, using Áster satellite images in the district of Bambamarca, Cajamarca - 2018" seeks to give an approach to the problem of the district of Bambamarca in which the residents are being exposed to toxic elements, of risk to health, present in the soil, water and air of the region, due to the erosion and weathering of local minerals and old mining works. These wastes were left unprotected without any protection and dispersed in the district, which are potential sources of contamination to the environment. Therefore, the main objective of this research was to detect the location of minerals that generate acidity and heavy metals through the analysis multispectral satellite imagery which will allow us to know the location of the main sources of contamination of the environment and areas affected by the contamination of minerals generating acidity and heavy metals. With a research design of the applied non experimental - transversal - causal type, using an analytical descriptive method. In which a new methodology focused on a multispectral analysis was developed in each of its chapters, reaching results that verify a greater contribution of acidity in minerals such as: Pyrite, Chalcopyrite and Sphalerite, since they are more unstable minerals, and in minerals such as Ferrihydrite and thenardite, a greater contribution of heavy metals in acidic conditions. It is concluded that it is possible to locate areas with presence of acid residues and residues with heavy metals through the use of multispectral analysis techniques, identifying the greatest number of areas with polluting waste in the Nor – Oeste of the district of Bambamarca.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

Los minerales que generan acidez y metales pesados, son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación, contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles, que generalmente proceden de labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y escombreras de mina. (ADUVIRE, 2006)

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).

Investigaciones en la región (Gerencia Regional de Recursos Naturales y Medio Ambiente), han reportado altas concentraciones de Hierro, Cobre, Plomo, Aluminio y Sílice, que rebasan los límites permisibles de acuerdo a la Dirección General de Salud Ambiental. Los minerales presentes en rocas locales y residuos expuestos al contacto del agua de lluvia y el oxígeno atmosférico, en formas químicas solubles, están migrando durante lluvias locales, a lo largo de los arroyos y provocando un área de mayor influencia de contaminación.

Es por ello que existe la necesidad de identificar la ubicación y composición de los principales focos de contaminación, para que las autoridades correspondientes puedan planear y llevar a cabo trabajos de remediación en la zona minera, y con esto reducir el riesgo a la salud de los pobladores. (MEM, 2017)

La actividad minera en el Distrito de Bambamarca, desde sus inicios, se caracterizó por la falta de control en el manejo de desechos mineros, de manera que, en la actualidad, existen altas concentraciones de elementos potencialmente ácidos y metales pesados expuestos en superficie, sujetos a procesos de erosión e intemperismo, poniendo en riesgo la calidad de vida de los pobladores.

Los pobladores del Distrito de Bambamarca, están siendo expuestos a elementos tóxicos, de riesgo a la salud, presentes en el suelo, agua y aire de la región, a causa de la erosión e intemperismo de minerales locales y antiguas labores mineras. Estos desechos quedaron a la intemperie sin ninguna protección y dispersos en el distrito, los cuales son fuentes potenciales de contaminación al ambiente. Es por ello que la presente investigación busca detectar los minerales generadores de acidez y metales pesados mediante el uso de imágenes de satélite y validar la técnica mediante corroboración en campo de los materiales identificados, lo cual permitirá conocer la ubicación de los principales focos de contaminación del ambiente y zonas afectadas por la contaminación de acidez y metales pesados. (ONG ODS, 2008)

1.2. Formulación del problema

¿Dónde se ubica la mayor concentración de minerales generadores de acidez y metales pesados, haciendo uso de imágenes Áster en el distrito de Bambamarca?

1.3. Justificación

En el distrito de Bambamarca existen labores mineras abandonadas, a causa de la erosión de minerales locales y antiguas labores mineras, estos quedaron a la intemperie sin ninguna protección y dispersos en el distrito, los cuales son fuentes potenciales de contaminación al ambiente.

El estudio se realizará por medio del análisis espectral de imágenes Áster, con la finalidad de identificar las zonas de mayor concentración de minerales generadores de acidez, y validar la técnica mediante corroboración en campo de los materiales identificados, lo cual permitirá conocer la ubicación de los principales focos de contaminación del ambiente y zonas afectadas por la contaminación de acidez y metales pesados.

1.4. Limitaciones

Baja resolución espacial de las imágenes satelitales, no obstante, esto se subsanara por un remuestreo de pixeles para obtener una mejor resolución.

Condiciones meteorológicas en las imágenes que muchas veces generan la perdida de información, sin embargo, esto será corregido con filtros atmosféricos y radiométricos, además se descargan imágenes satelitales en época de estiaje.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Teledetectar la ubicación de minerales generadores de acidez y metales pesados usando imágenes satelitales Áster en el distrito de Bambamarca.

1.5.2. Objetivos específicos

- Identificar los principales minerales que generan el incremento de acidez y liberación de metales pesados en el distrito de Bambamarca.
- Realizar la comparación de firmas espectrales de los minerales determinados.
- Comparar los resultados obtenidos con información recolectada en campo.
- Delimitar las zonas con mayor aporte de acidez y aporte de metales pesados, para identificar zonas de afectación

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

ADUVIRE O. (2006). Drenaje Acido De Mina Generación y Tratamiento.

La presente investigación se desarrolló en Madrid y trata sobre las principales fuentes de drenaje ácido, en la cual se hace una revisión del estado del arte sobre generación ácida, su prevención y tecnologías de tratamiento. Se continúa con una descripción detallada de los sistemas pasivos para el tratamiento de aguas ácidas y ver la posibilidad de aplicación en la Cuenca del Bierzo. Llegando a la conclusión de remediación usando técnicas convencionales para estabilización física y química de los drenajes ácidos

VEGA J. (2012). Nivel De Contaminación Por Metales Pesados En El Rio Toro, Distrito De Huamachuco De La Provincia Sánchez Carrión. Durante El Año 2009 - 2010

La presente investigación estudió los niveles de contaminación por metales pesados en el Río el Toro de la Provincia de Sánchez Carrión del departamento de la Libertad, Perú, dicha área de estudio está ubicada en la zona de influencia donde se viene extrayendo minerales de oro en forma artesanal usando agentes lixiviantes lo cual produce la disolución de metales pesados.

Concluyendo que, durante el periodo de estudio de setiembre de 2009 a setiembre de 2010, los metales pesados de plomo, cobre, mercurio y arsénico no sobrepasan los LMP, a diferencia del hierro que si sobrepasa los LMP en la estación de muestreo 03 y 04 poniendo en riesgo las aguas que son obtenidas para riego y bebida de animales en las partes bajas del río.

DIGESA. (2007). Monitoreo de los ríos Llaucano, Maigasbamba y Hualgayoc.

En la provincia de Hualgayoc y distritos de Bambamarca y Chugur se ubican pasivos ambientales generadores de aguas ácidas (Sinchao) y metales pesados. La Ley General de Aguas faculta a la Autoridad Sanitaria, DIGESA, la vigilancia de los recursos hídricos. En este sentido, se han establecido 09 estaciones a lo largo del río Llaucano y afluentes desde la naciente del río Tingo hasta La Paccha. La Dirección Ejecutiva de Salud Ambiental Cajamarca es la entidad encargada de las tomas de muestras y los análisis se efectúan en los laboratorios de la DIGESA. Mostrándose resultados de los principales contaminantes que afectan estas agua.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Residuos ácidos

Los residuos ácidos son una de las principales fuentes de contaminación de los suelos, aguas superficiales y subterráneas en el mundo. Estos drenajes son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación que generalmente proceden de labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y escombreras de mina.

2.2.2. Generación de acidez

La acidez se genera por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y al agua. Las actividades que involucran la excavación de rocas con minerales sulfurosos, tales como la minería de metal y carbón, aceleran el proceso.

Estos minerales generadores de acidez, según su origen se dividen en cuatro grupos: (1) minerales primarios sulfurados, (2) minerales primarios no sulfurados, (3) compuestos producidos por procesamiento de mineral, y (4) minerales secundarios formados por intemperismo.

A. Originados de minerales primarios sulfurados

Son minerales de sulfuro que acompañan a minerales de mena por lo general son afectados durante la extracción, estos minerales se desestabilizan producto de una tasa de oxidación alta, la naturaleza de los elementos es potencialmente tóxicos al ser liberados. (Jambor y Blowes. 2009).

B Originados de minerales sulfurados secundarios

Son minerales formados por intemperismo de los minerales primarios sulfurados y comprenden un gran grupo de desechos mineros.

Dentro de los cuales tenemos dos grupos característicos como son los oxihidróxidos y sulfatos, pero carbonatos secundarios, sulfuros, silicatos y óxidos también pueden precipitar (Alpers et al., 1994; Lottermoser 2010).

Muchos de estos minerales son de grano fino y tiene una alta capacidad de adsorción de sustancias potencialmente tóxicas.

C. Originado de minerales primarios no sulfurados

Son minerales de carbonatos en depósitos de mineral o en rocas huésped tienen un papel importante en la neutralización de la acidez.

Se ha observado que la calcita es el carbonato más soluble y se disuelve rápidamente a diferencia de la dolomita y ankerita se disuelven más lentamente (Jambor y Blowes 1998)

Sin embargo, si los minerales de carbonato de Fe y Mn se disuelven bajo condiciones de oxidación, Fe^{2+} y Mn^{2+} pueden hidrolizarse y producir ácidos.

D. Orinado de compuestos producidos por procesamiento de mineral

Son compuestos producto de un procesamiento in situ (como tostado de mineral, lixiviación en pilas y oxidación a presión) lo cual puede producir nuevos compuestos sólidos que son parte de los desechos de mina. En algunos casos involucra la conversión de minerales de sulfuro en óxidos.

2.2.3. Residuos con metales pesados

Son residuos que evidencian la presencia de concentraciones nocivas de algunos elementos químicos y compuestos (contaminantes) es un tipo especial de degradación que se denomina contaminación. El contaminante está siempre en concentraciones mayores de las habituales (anomalías) y en general tiene un efecto adverso sobre algunos organismos.

Los porcentajes más altos de residuos con presencia de metales pesados corresponden al Cr, Mn y Ni por su disociación favorable, mientras que Co, Cu, Zn y Pb se presentan en menores cantidades y son mínimos los contenidos en As, Cd y Hg.

Las principales concentraciones anómalas de metales pesados en suelos y agua provienen fundamentalmente de las menas metálicas (sulfuros, óxidos).

2.2.4. Formación de residuos con metales pesados

Los residuos con presencia de metales pesados pueden ser de orígenes geogénicos o antropogénicos. (Jambor y Blowes 1998).

Los primeros dependen en gran medida de lo que se denomina geo disponibilidad. La geo disponibilidad de un elemento o compuesto químico de un material terrestre es aquella porción de su contenido total que puede liberarse a la superficie o cerca de la superficie (o biosfera) por procesos mecánicos, químicos, o biológicos.

Por tanto, los metales pesados geo disponibles son los que pasan de la roca madre a los suelos o agua tras ser liberados por meteorización, y constituyen, junto a otros procedentes de

emisiones volcánicas y lixiviados de mineralizaciones, los denominados como geogénicos. La liberación de los elementos depende de la estructura y estabilidad termodinámica de los minerales de la roca.

Tabla 1: Principales minerales que generan residuos ácidos y metales pesados.

Mineral	Minerales ISIRIS	Fórmula
Sulfuros		
Pirita	Pyrite	FeS ₂
Marcasita	Marcasite	FeS ₂
Pirrotita	Pyrrhotite	Fe _(1-x) S
Calcopirita	Chalcopyrite	CuFeS ₂
Bornita	Bornite	Cu ₅ FeS ₄
Esfalerita	Sphalerite	(Zn,Fe)S
Pentlandita	Pentlandite	(Fe,Ni) ₉ S ₈
Enargita	Enargite	Cu ₃ AsS ₄
Galena	Galena	PbS
Molibdenita	Molybdenite	MoS ₂
Thenardita	Thenardite	Na ₂ SO ₄
Tetrahedrita	Tetrahedrite	(Cu,Fe) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃
Cinabrio	Cinnabar	HgS
Cobaltita	Cobaltite	CoAsS
Oxihidróxidos de hierro		
Goethita	Goethite	α-FeO(OH)
Lepidocrocita	Lepidocrocite	γ-FeO(OH)
ferrihidrita	Ferrihydrite	Fe(OH) ₃
gibbsita	Gibbsite	Al(OH) ₃
boehmita	Böhmite	AlO(OH)
Oxihidróxidos de aluminio		
Gypsum	Gypsum	CaSO ₄ ·2H ₂ O
Jarosite	Jarosite	(K,Na,H ₃ O)Fe ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆
schwertmannita	Schwertmannite	Fe ₁₆ O ₁₆ (SO ₄) ₂ ·nH ₂ O
Melanterita	Melanterite	FeSO ₄ ·7H ₂ O
Copiapita	Copiapite	Fe ^{II} Fe ^{III} (SO ₄) ₆ (OH) ₂ ·20H ₂ O
Epsomita	Epsomite	MgSO ₄ ·7H ₂ O
Anglesita	Anglesite	PbSO ₄

Fuente: Heather E. (2011)

2.2.5. Fundamentos de la teledetección

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre.

Para que esta información remota sea posible es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto solo cuando pueden descifrar la información que este les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que lo ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este pequeño ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que los pone en relación y permite, en última instancia, detectar el objeto.

En nuestro ejemplo, ese flujo procede del árbol por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto (en caso de que fueran capaces de detectar el calor que emiten), o incluso por el sensor (por ejemplo, si tuviéramos una cámara equipada con flash). Estas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión, y por emisión - reflexión. (Ver Figura 1)

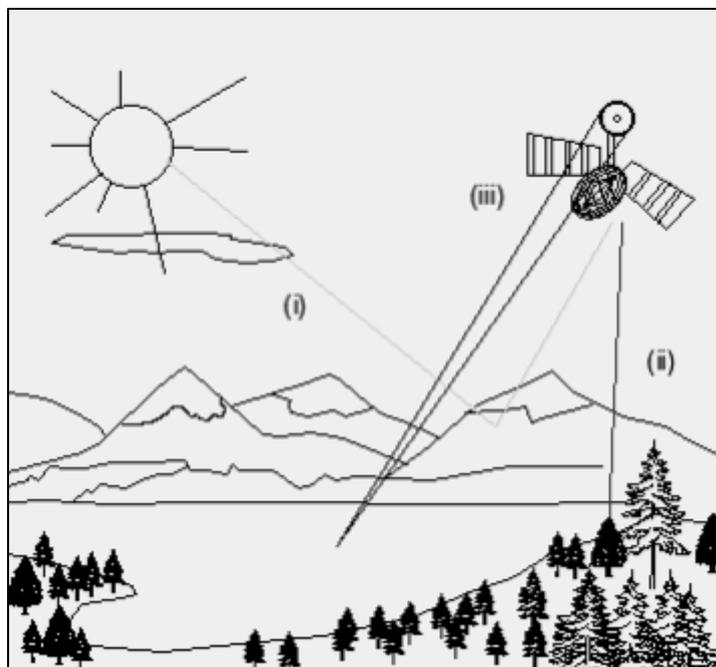


Figura 1: (i) reflexión, (ii) Emisión y (iii) emisión-reflexión. (Drozd; Ferrero, 2011).

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro planeta. 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 atmosfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. (Chuvienco, 2015)

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electromagnética. Como es sabido, la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción y radiación. De ellos, nos centraremos en el último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección. (Chuvienco, 2015)

Históricamente, las propiedades de la radiación electromagnética se han explicado por dos teorías aparentes compuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (HUYENS, 2000), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a 0.

Actualmente parece que las dos teorías se pueden compaginar pues se ha demostrado que la luz presenta comportamientos que pueden explicarse de acuerdo con ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electromagnéticamente se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (ver Figura 2)

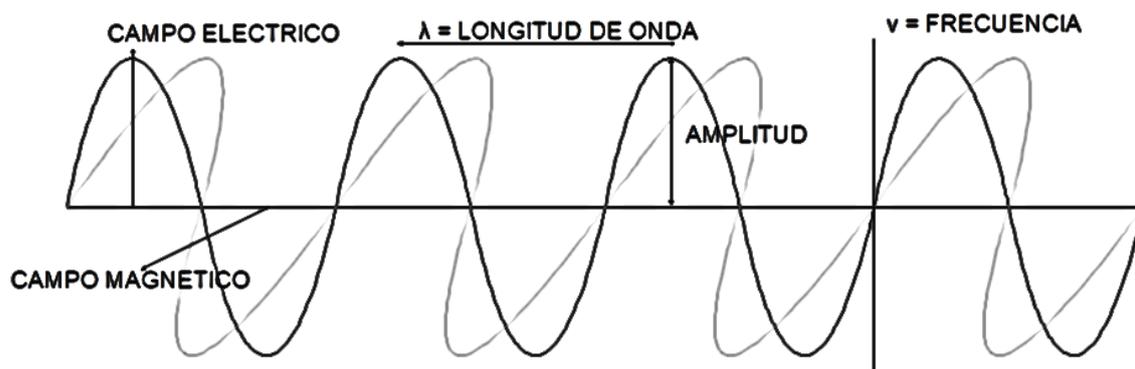


Figura 2: Esquema de una onda electromagnética. (Chuvienco, 2015)

Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados.

$$c = \lambda \nu$$

Donde c indica la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), la λ expresa la longitud de onda (habitualmente en micrómetros, $1 \mu\text{m}$ es igual a 10^{-6} m o nanómetros, $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ m). Y ν la frecuencia (en Hertz, $1 \text{ Hz} = 1$ ciclo por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado. (Chuvieco, 2015).

Gracias a la teoría cuantitativa podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h \nu$$

Donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), ν la frecuencia y h la constante de Planck ($6,6 \times 10^{-34}$ Js). Sustituyendo en la ecuación 2.1, se puede expresar:

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

Lo que significa, en definitiva, que, a mayor longitud de onda o menor frecuencia, el contenido energético será menor o viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquellas provenientes de longitudes cortas, de ahí que las primeras requieran medios de detección más refinados. (Chuvieco, 2015)

2.2.5.1. Naturaleza de la radiación

La naturaleza de la radiación electromagnética puede ser explicada a partir de dos modelos aparentemente contradictorios y en el fondo complementario. El modelo de onda asume que la radiación se produce en forma de ondas que resultan de oscilaciones en los campos eléctrico y magnético en las inmediaciones de los objetos y se desplazan por el espacio a la velocidad de la luz. Las ondas se definen fundamentalmente por su longitud (λ) o distancia entre dos picos de onda (se mide en μm , es decir 10^{-6} metros). El modelo de partícula asume que la energía viaja como un flujo de elementos discretos: los fotones. La energía transportada por cada fotón (Q) depende de la longitud de onda, de este modo ambos modelos se relacionan mediante la ecuación:

$$Q = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js) y c la velocidad de la luz (300000m/s). La ecuación implica que a menor longitud de onda mayor es la energía transportada por la radiación.

El conjunto de todas las longitudes de onda se denomina espectro electromagnético. Dentro del espectro electromagnético se distinguen una serie de regiones, las más utilizadas por las diferentes técnicas de teledetección son la luz visible, el infrarrojo reflejado, el infrarrojo térmico y las microondas.

Cualquier cuerpo en la naturaleza emite radiación y lo hace con diferentes longitudes de onda. La cantidad de energía que emite un cuerpo por radiación como la distribución de esta energía en diferentes longitudes de onda depende fundamentalmente de la temperatura de dicho cuerpo (ley de Stefan-Boltzman):

$$M = \sigma T^4$$

2.2.5.2. Interacciones entre la radiación y los objetos

Todos los objetos (independientemente de la radiación que emitan) van a recibir radiación, fundamentalmente del sol, que, en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos:

- reflejarse (la radiación es reenviada de vuelta al espacio)
- absorberse (la radiación pasa a incrementar la energía del objeto)
- transmitirse (la radiación se transmite hacia los objetos situados detrás).

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad o albedo (ρ); la fracción de energía que se absorbe se denomina absortividad (α); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad (τ) cumpliéndose que $\rho + \tau + \alpha = 1$. Las tres variables tienen lógicamente valores entre 0 y 1.

La interacción de la radiación con la atmósfera y con los objetos terrestres, es decir los valores de ρ , τ y α de un cuerpo concreto, va a depender de la longitud de onda de que se trate y de las características de ese cuerpo. Unas primeras líneas generales acercan del comportamiento de diferentes objetos respecto a su interacción con la radiación serían:

- Atmósfera despejada:
 - ρ muy baja para todas las longitudes de onda
 - α depende de la longitud de onda
 - τ depende de la longitud de onda

➤ Nubes:

- ρ muy alta en el visible
- α depende de la longitud de onda
- τ depende de la longitud de onda

➤ Agua:

- ρ muy baja en todas las longitudes de onda
- α depende de la longitud de onda
- τ depende de la longitud de onda

➤ Superficie terrestre:

- ρ y α muy variable, dependiendo de la longitud de onda y del tipo de cobertura
- τ nulo

2.2.5.3. Interacción atmósfera-radiación electromagnética

Algunos de los gases que componen la atmósfera absorben radiación en determinadas longitudes de onda. La radiación no absorbida se transmite a la superficie terrestre, aunque se ve afectada por procesos de dispersión (responsables del color azul del cielo y de que podamos ver en zonas de sombra). Los gases responsables de la absorción son fundamentalmente:

- Ozono: Absorbe radiación ultravioleta.
- Dióxido de carbono: Absorbe radiación en 13 – 17,5 μ ;
- Vapor de agua: Absorbe radiación en 5,5 – 7 μ y por encima de 27 μ ;

De este modo aparecen una serie de regiones en el espectro en las que la radiación es absorbida por uno o varios de los gases. Esto deja, por otro lado, regiones del espectro en las que no se produce absorción, son las denominadas ventanas atmosféricas.

- Visible e infrarrojo cercano (0,3 – 1,35 μ)
- Varias en el infrarrojo medio (1,5 – 1,8 μ ; 2 – 2,4 μ ; 2,9 – 4,2 μ ; 4,5 – 5,5 μ)
- Infrarrojo térmico (8 – 14 μ)
- Microondas, por encima de 1cm la atmósfera es prácticamente transparente

2.2.6. Fuentes de energía y principios de radiación

La propagación de la energía electromagnética sigue ciertas leyes físicas (Khorram, et al; 2012). Planck descubrió que la cantidad de energía electromagnética (fotón) es directamente proporcional a la frecuencia de la radiación de la energía, además definió una constante (h), la cual permite relacionar la frecuencia (f) con la energía radiante (Q).

$$Q = h f$$

2.2.6.1. Fuente de radiación

La energía electromagnética es generada por varios mecanismos, incluyendo cambios en los niveles energéticos de los átomos, aceleración de cargas eléctricas, decaimiento de materiales radiactivos, y el movimiento de los átomos y partículas que generan calor. Las reacciones nucleares dentro del Sol producen radiación electromagnética, la cual se transmite hacia el exterior, esta radiación atraviesa la atmósfera antes de llegar a la superficie de la Tierra, y llegando a ésta una parte de la energía es reflejada y la otra es transmitida.

La radiación electromagnética se compone de un campo eléctrico (E) que varía de magnitud en dirección perpendicular a su dirección de propagación, y un campo magnético (H) el cual es perpendicular al campo eléctrico y se propaga en fase respecto a éste (Campbell, 2002).

La energía electromagnética se puede caracterizar a partir de su longitud de onda, frecuencia, amplitud y fase. Se tiene la siguiente relación entre la frecuencia y la longitud de onda.

$$C = \lambda * f$$

Donde C es la velocidad de propagación, λ es la longitud de onda y f la frecuencia. Por lo que se puede caracterizar a la energía electromagnética utilizando su frecuencia o su longitud de onda. La radiación electromagnética es descrita en función de uno u otro parámetro y las divisiones del espectro electromagnético son esencialmente arbitrarias (Campbell, 2002).

2.2.7. Caracterización de las imágenes de satélite

2.2.6.1. Plataformas, sensores y canales

Se entiende por plataforma los satélites (LANDSAT, ÁSTER, NOAA, SPOT) o aviones que transportan los aparatos necesarios para captar, almacenar y transmitir imágenes a distancia (sensores).

Un sensor es el aparato que reúne la tecnología necesaria para captar imágenes a distancia y que es transportado en una plataforma. Puede captar información para diferentes regiones del espectro y cada una de estas regiones se denomina canal o banda.

Por ejemplo, Landsat es una plataforma que contiene dos sensores Landsat-TM y Landsat-MSS, el primero de los cuales tiene 7 bandas (azul, verde, rojo, 3 en el infrarrojo cercano y 1 en el infrarrojo térmico y el segundo 4 bandas (verde, rojo y 2 en el infrarrojo cercano).

La salida de radiación (emitida o reflejada) de la superficie terrestre es un fenómeno continuo en 4 dimensiones (espacio, tiempo, longitud de onda y radiancia). Un sensor debe muestrear en este continuo discretizándolo en cada una de esas dimensiones. El modo en que esta discretización se lleva a cabo define los cuatro tipos de resolución con los que se trabaja en teledetección:

- Resolución espacial (tamaño de pixel)
- Resolución temporal (tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio)
- Resolución espectral (capacidad de discriminar entre longitudes de onda vecinas en el espectro, así como el número de bandas disponible).
- Resolución radiométrica (número de intervalos de intensidad que puede captar el sensor)

2.2.6.2. Análisis de imágenes de satélite en un SIG

Una imagen de satélite en bruto, tal como normalmente llega al usuario final, consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación. Estos valores se denominan Niveles Digitales y será necesario transformarlos en algún tipo de variable física.

El tratamiento de una imagen de satélite previo a su análisis incluye:

A. Correcciones Radiométricas

La radiancia del objetivo es alterada por la atmósfera a través de la cual pasa la radiancia en su ruta hacia el sensor. El sensor en sí mismo, distorsiona también esta radiancia que ha llegado a él. Existe una variedad de técnicas utilizadas para la corrección atmosférica: la técnica más simple incluye la sustracción de pixeles oscuros y el apareamiento de histogramas los cuales son más propensos al error. (Chuvieco, 2002)

Las técnicas más complejas involucran la modelación matemática de las condiciones atmosféricas en el tiempo y el lugar de la imagen, las cuales frecuentemente requieren información tomada en el sitio de la imagen y en el momento en que esta imagen fue tomada. (Chuvieco, 2002)

B. Correcciones Geométricas

La distorsión geométrica es producida por la curvatura de la tierra, el movimiento no uniforme del barredor, la no linealidad del espejo del barredor y el movimiento rotacional de satélite. La corrección de estas distorsiones geométricas puede ser lograda en dos formas: Las posiciones reales de los elementos de la fotografía son cambiadas pero los elementos mantienen sus valores de intensidad. (Chuvieco, 2002)

Dada su limitada precisión, este método es utilizado únicamente para correcciones geométricas simples tales como distorsiones. La imagen es remuestreada, esto es, una imagen digital, geoméricamente distorsionada, es transformada a una fotografía sobre una cuadrícula no 96 distorsionada igualmente espaciada. Los valores de intensidad de los píxeles de la cuadrícula derivada, deben de ser determinados por interpolación utilizando píxeles vecinos de la imagen distorsionada. (Chuvieco, 2002)

2.2.8. Visualización de imágenes

Tradicionalmente se ha dividido el análisis de imágenes de satélite en 2 fases, un análisis visual y un análisis digital. El primero es similar en muchos aspectos a la fotointerpretación clásica con las ventajas que aporta la fotografía digital en cuanto a las posibilidades de retocar y realzar las imágenes. Sin embargo, una imagen de satélite en bruto presenta un aspecto bastante apagado, por lo que el análisis visual no resulta sencillo. En teledetección se han desarrollado diferentes técnicas que permiten resaltar determinados aspectos para facilitar este análisis.

Aunque el espectro electromagnético abarca un amplio número de regiones y el ojo humano tiene una gran capacidad de discriminación de estos colores, podemos descomponer cualquier color en tres componentes (azul, verde y rojo) que corresponden a tres regiones del espectro visible. Los dispositivos de visualización de imágenes (monitores, televisiones, etc.) forman sus imágenes mediante la combinación de diferentes niveles de intensidad en estos tres colores. Cada pixel en pantalla es representado mediante 3 puntos de luz, rojo, verde y azul (composición RGB) al dispositivo encargado de pintar todos los puntos de un color se le denomina cañón. De este modo existen el cañón del rojo, el del verde y el del azul.

2.2.9. Procesamiento De Imágenes Satelitales

Es el término usado para denominar las operaciones desarrolladas sobre un set de datos de imagen para mejorarlas de alguna forma, para ayudar a su interpretación o para extraer algún tipo de información útil de ella. Es obvio que el procesamiento de imágenes no puede producir información a partir de nada. Si en el set de datos no existe información concerniente a una

aplicación o interpretación en particular, entonces no importa que cantidad de complicadas rutinas de procesamiento apliquemos, no se podrá obtener información.

La digitalización deja los datos con un formato adecuado para su manipulación por parte del computador. Éstos pueden ser ahora transformados en cualquier función matemática elegida. Cada sistema de procesamiento de imágenes tiene su propio software asociado, cada uno desarrollando una tarea diferente. La secuencia de tareas aplicadas a una imagen se denomina como procesamiento de imágenes, la cual puede variar dependiendo de las metas que se tengan en vista. (Chuvieco, 2002)

2.2.10. Sensores remotos

El sensoramiento remoto es una técnica que ha ido evolucionando aceleradamente durante las últimas décadas con la llegada de la tecnología satelital.

Sus orígenes se ubican con el inicio de las actividades aeronáuticas a principio de siglo XX para ir evolucionando con el desarrollo de las actividades espaciales.

Y se puede definir como la colección de información de un objeto sin estar en contacto físico con el objeto. Aeroplanos, aviones y satélites son las plataformas más comunes desde donde las observaciones remotas son realizadas. El término percepción remota es restrictivo a métodos que emplean energía electromagnética como medio de detección y medición de las características de un objeto (Sabins, 1978)

2.2.10.1. Elementos De Un Proceso De Sensoramiento Remoto

En el proceso del sensoramiento remoto se involucra la interacción entre ondas incidentes y los objetos de interés. Sin embargo, el sensoramiento remoto también involucra la percepción de energía emitida y el uso de sensores que no producen imágenes.

A. Fuentes de energía o iluminación. Es el primer requerimiento en el sensoramiento remoto es disponer de una fuente de energía que ilumine o provea energía electromagnética al objeto de interés.

B. Radiación y la atmosfera. Ya que la energía viaja desde la fuente al objeto, entrara en contacto e interaccionara con la atmosfera. Esta interacción tiene lugar una segunda vez cuando la energía “viaja” desde el objeto al sensor.

C. Interacción con el objeto. La energía interactúa con el objeto dependiendo de las propiedades de este y de la radiación incidente.

D. Detección de la energía por el sensor. Necesitamos un sensor remoto que recoja y grabe la radiación electromagnética reflejada o emitida por el objeto o la atmosfera.

E. Transmisión, recepción y procesamiento. La energía grabada por el sensor debe ser transmitida, en forma electrónica, a una estación de recepción y procesamiento donde los datos donde serán convertidos a imágenes digitales.

F. Interpretación y análisis. La imagen procesada es interpretada, visualmente, digitalmente o electrónicamente, con el fin de extraer información acerca del objeto que fue iluminado.

G. Aplicación. El paso final en el proceso del sensoramiento remoto se alcanza en el momento en que aplicamos la información extraída de las imágenes del objeto para un mejor conocimiento del mismo, revelando nuevas informaciones y ayudándonos a resolver un problema en particular. Estos siete elementos presentados anteriormente abarcan el proceso de sensoramiento remoto de principio a fin. Iremos abarcándolos de manera secuencial en los próximos cinco capítulos. (Sabins, 1978).

2.3. Definición de términos básicos

Absorción atmosférica: Indica la eliminación que realiza la atmósfera de distintos tipos de energía, en razón de sus propios componentes, y principalmente del ozono, oxígeno atómico y vapor de agua. (Chuvienco, 2002).

Banda espectral: se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamiento electromagnéticos similares. (Chuvienco, 2002).

Calibración: Proceso de comparar ciertas medidas específicas con otro instrumento estándar. (Chuvienco, 2002).

Correcciones atmosféricas: Indican las operaciones digitales tendentes a eliminar errores en la adquisición de las imágenes, ya sean radiométricos o geométricos. (Chuvienco, 2002).

Emisividad: proporción entre la energía emitida por un determinado objeto y la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. (Chuvienco, 2002).

Espectro electromagnético: Se trata de la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar. (Chuvienco, 2002).

Firma espectral: Forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Está afectadas por las características físicas o químicas del objeto que interaccionan con la energía electromagnética, y varía según las longitudes de onda. (Chuvienco, 2002).

Infrarrojo: Porción del espectro comprendida entre 0.7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse en infrarrojo cercano, medio y lejano. Este último también se conoce como infrarrojo térmico. (Chuvieco, 2002).

Longitud de onda: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas. (Chuvieco, 2002).

Metal pesado: El término metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico que tiene una densidad relativamente alta y es tóxico o venenoso en concentraciones bajas. (DIGESA, 2007)

Mineral generador: Es la caracterización o potencial de generación a causa de un componente esencial o característica mineralógica que determina su potencial generador de reacciones físicas químicas. (SGS, 2018)

Numero digital: Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico. (Chuvieco, 2002).

Píxel: Derivado del inglés "picture element". Es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado. (Chuvieco, 2002).

Reflectividad: Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional. (Chuvieco, 2002).

Resolución: La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal). (Chuvieco, 2002).

Sensor: Cualquier instrumento que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para su estudio. (Chuvieco, 2002).

Teledetección: Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. (Chuvieco, 2002).

2.4.Hipótesis

Mediante el uso de imágenes satelitales Áster se detectarán las zonas con presencia de minerales generadores de acidez y metales pesados en el distrito de Bambamarca

CAPÍTULO 3. GENERALIDADES

3.1. Ubicación

El distrito de Bambamarca le encuentra en la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca.

Limita al sur con el distrito de Encañada, al norte con el distrito de Chalamarca, al noreste con el distrito de Paccha, al noroeste con el distrito de Chota, al este con los distritos de Huasmin y Miguel Iglesias, y al oeste con el distrito de Hualgayoc.

Altitud: 2526

Latitud: 06°40'33"

Longitud: 78°30'54"

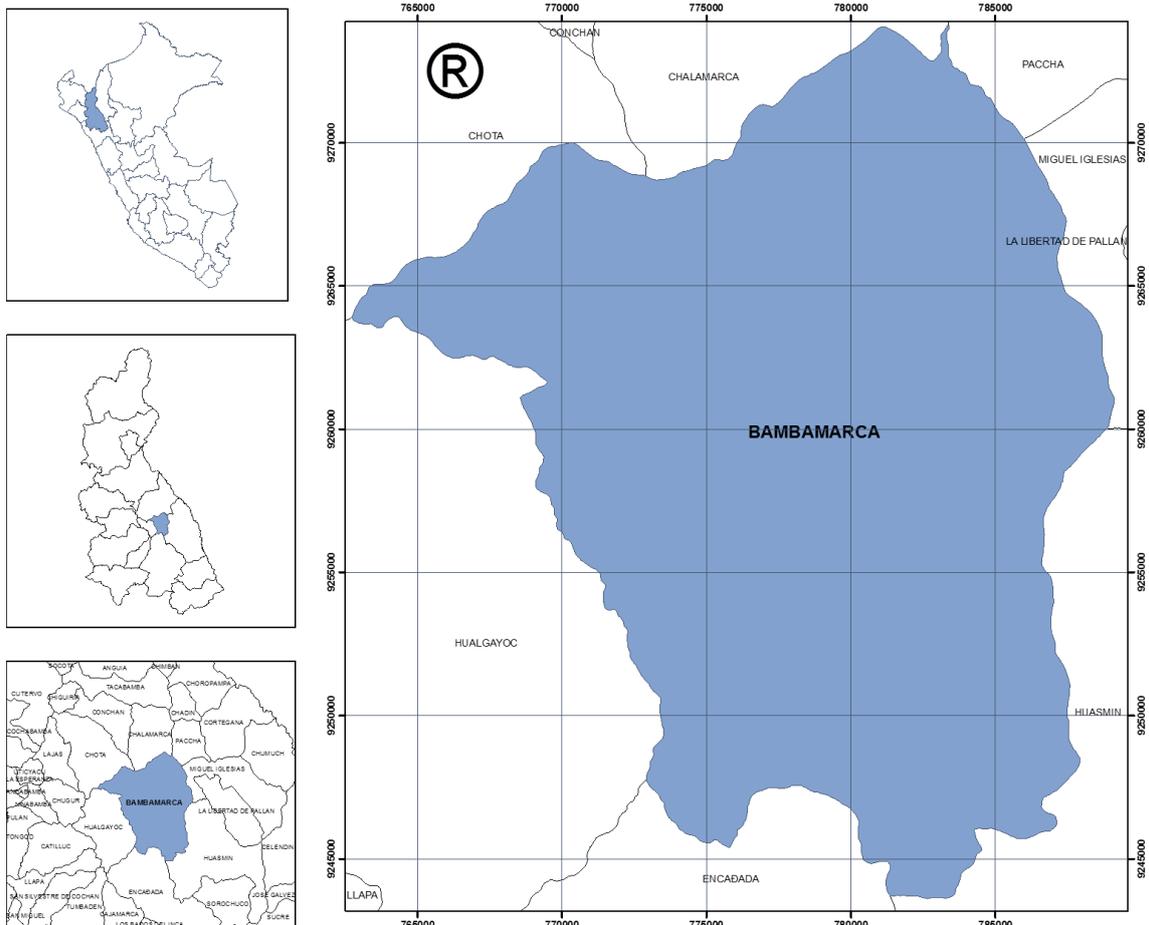


Figura 3: Ubicación del distrito de Bambamarca.

El área de estudio queda limitada en las siguientes coordenadas referenciales que enmarca el distrito de Bambamarca.

Tabla 2: Coordenadas de referencia de la zona de estudio.

Punto	Este	Norte
01	762500	9274300
02	762500	9243100
03	789600	9274300
04	789600	9243100

Fuente: Elaboración de los investigadores

3.2. Extensión territorial

El distrito de Bambamarca abarca un área de 4513800 has, ocupando el 58.03 % de la provincia de Hualgayoc.

3.3. Población

El distrito de Bambamarca tiene una población de 74513 (INEI) y una densidad demográfica de 165 hab/km²

3.4. Minerales generadores de acidez y metales pesados.

Los residuos ácidos y residuos con presencia de metales pesados son un tema de importancia para la salud en Bambamarca, ya que al ser un distrito netamente minero los pobladores están expuestos no solo a la presencia de residuos ácidos en zonas de trabajo sino también a la presencia de metales pesados que pueden llegar a ser transportados por el agua.

Es por ello que se ha realizado análisis de laboratorio en Bambamarca tras molestias presentadas en la salud de muchos pobladores, evidentemente los estudios preliminares revelaron que el agua contiene metales pesados: Hierro, plomo, aluminio y sílice en cantidades superiores a los porcentajes permisibles para consumo humano; sin embargo, aún faltan conocer los resultados de los análisis de agua que se llevaron a la Dirección General de Salud Ambiental, DIGESA, del Ministerio de Salud.

Es por ello que mediante el análisis multiespectral se pretende ubicar las zonas con presencia de residuos ácidos y residuos con metales pesados que están generando este desbalance en el distrito de Bambamarca.

Dicho esto, podemos analizar que para que se realice la generación de acidez en un residuo, este debe tener potencialmente una estructura química que eleve el pH tras su disociación, al igual que en residuos con presencia de metales pesados.

Lo cual podemos simplificarlo en la siguiente ecuación:

- Sulfuro mineral + Oxígeno + Agua = Sulfato + Acidez + Metal
- Oxihidróxido mineral + Agua = Alcalinidad + Metal

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Operacionalización de variables

Tabla 3: Marco operacional de variables e indicadores.

VARIABLES				
Tipo	Variable	Definición conceptual	Dimensión	Indicadores
Independiente	Teledetección	Es la técnica que permite obtener información del área de estudio	Imágenes satelitales Áster	RBG
	Concentración de Minerales generadores de acidez	Residuos generados por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros.	PH	Unidad de PH
	Concentración de Minerales generadores de Metales pesados	Residuos generados por disociación de minerales de condición química inestable y que poseen en su fórmula química metales pesados	leyes	PPM
Dependiente	Firmas espectrales minerales	Medida cuantitativa de las propiedades espectrales de minerales en función de la radiación electromagnética	Grafica espectral	% reflectancia.

Fuente: Elaboración de los investigadores

4.2. Diseño de investigación

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

4.3. Unidad de estudio

Con una unidad de análisis de 15 x 15 m pixel.

4.4. Población

La población de estudio será en un área de 4513800 has, correspondiente a todo el distrito de Bambamarca, departamento de Cajamarca.

4.5. Muestra

Firmas espectrales de minerales contaminantes.

4.6. Técnicas, instrumentos y procedimientos de recolección de datos

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 usando instrumentos como el software ArcGIS 10.4 y Envi 5.3, permitiendo así recolectar datos de campo a partir de características espectrales codificadas en emisión y absorción de energía electromagnética característica de cualquier cuerpo a identificar lográndose así localización las zonas con presencia de metales generadores de acidez y metales pesados.

4.7. Procedimientos de análisis de datos

4.7.1. Adquisición de imágenes satelitales

Las imágenes fueron adquiridas del servidor (<https://www.usgs.gov/>) imágenes del sensor ÁSTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer).

4.7.2. Unión y recorte de la zona de estudio.

Para realizar la unión de las imágenes descargadas se utiliza la técnica denominada mosaico que consiste en la unión espectral y espacial de información de dos imágenes satelitales.

Las imágenes unidas corresponden al barrido de PATH / ROW 9/64 y 9/65 respectivamente y con fecha de adquisición del 17 de agosto del 2017.

Para el posterior recorte de la zona de estudio se utilizó un archivo vectorial del distrito de Bambamarca.

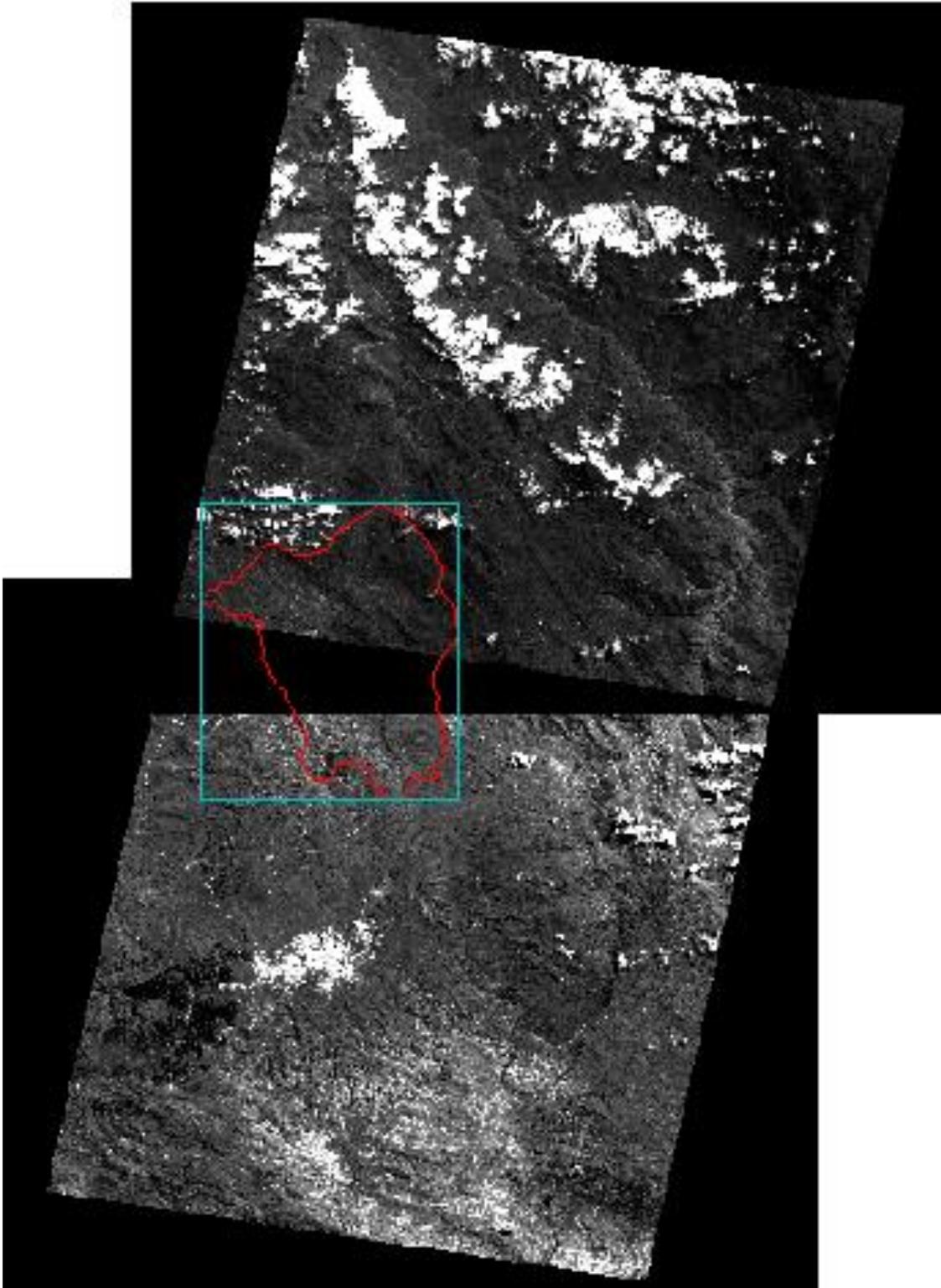


Figura 4: Imágenes Multiespectrales de los barridos correspondientes a la zona de estudio.

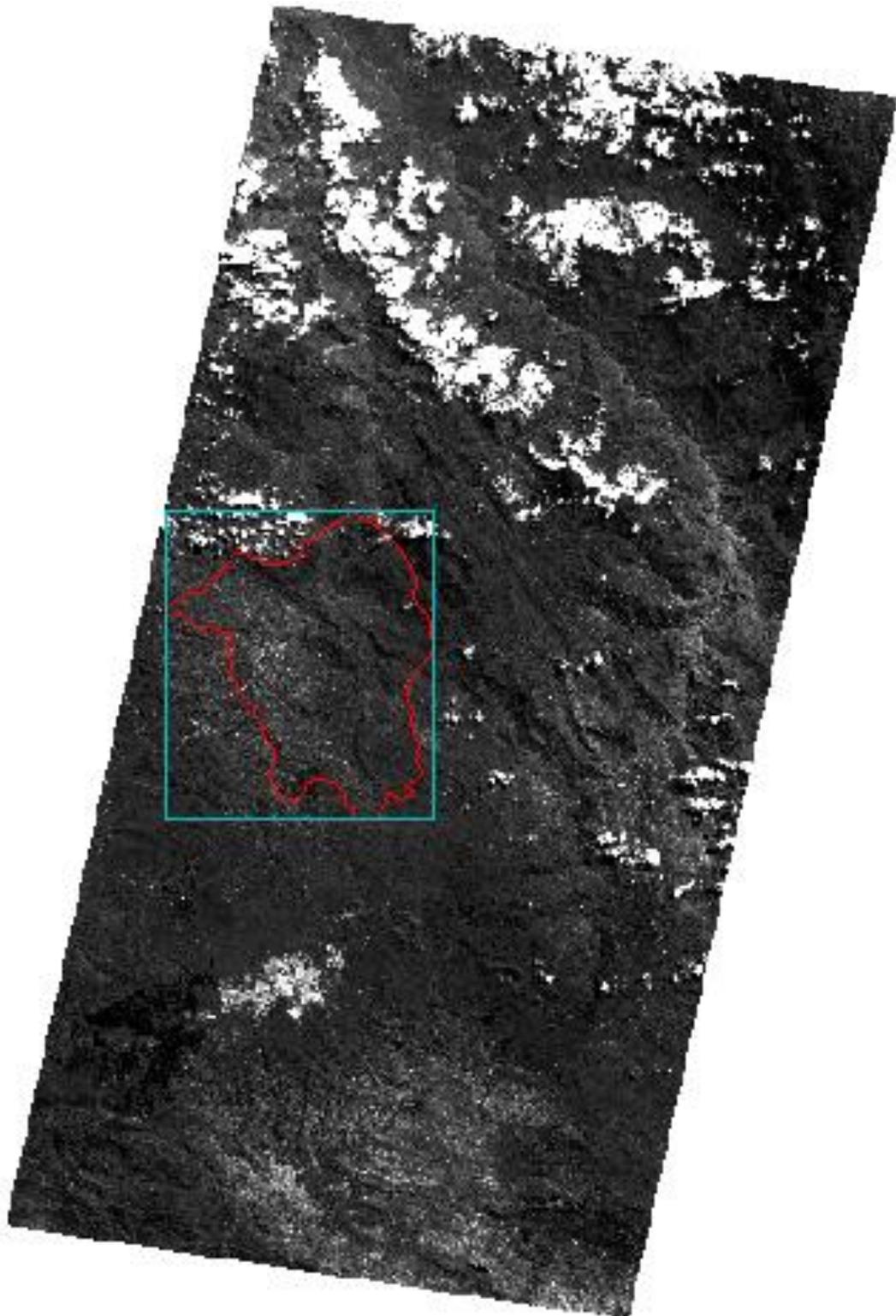


Figura 5: Unión de imágenes multispectrales

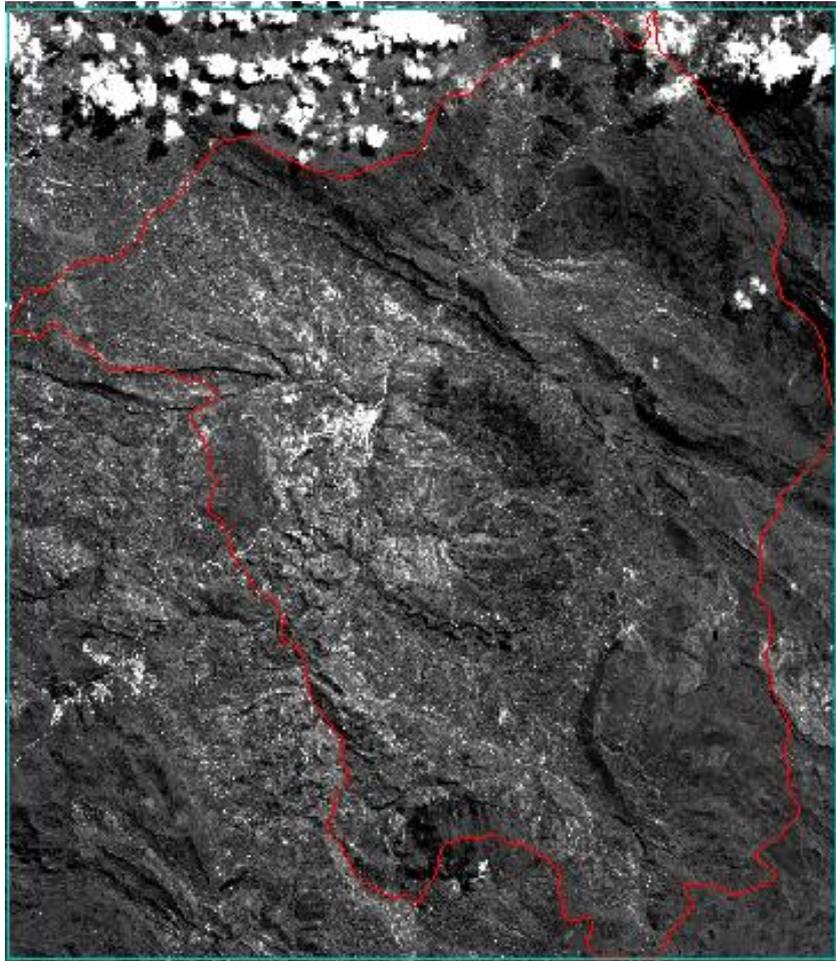


Figura 6: Recorte de la zona de estudio.

4.7.3. Corrección de imágenes Áster

Los sensores satelitales capturan la información de la cobertura de la tierra obtenida a partir de la intensidad de radiación electromagnética, misma que proviene de la luz del sol reflejada sobre la superficie terrestre, sumada a la energía dispersada y reflejada por la atmósfera, conocida como radiancia. Esta información de intensidad es transformada a través de una ecuación lineal (Kruse, 2004) y almacenada en una representación discreta de números digitales (ND) que tienen una escala artificial definida según las características de almacenamiento de cada sensor específico, por ejemplo: 8bits, 12bits y 16 bits.

Los valores en ND son proporcionales a la radiancia capturada originalmente por el sensor, por lo que es posible recuperar la escala original de radiancia aplicando la fórmula de conversión respectiva de cada banda de la imagen, la cual es calculada durante la calibración inicial del sensor y, por lo general, está disponible junto con la información técnica del sensor. Los efectos de dispersión y distorsión atmosféricos se compensan por medio de fórmulas matemáticas, en este caso planteadas por el modelo MODTRAN4.

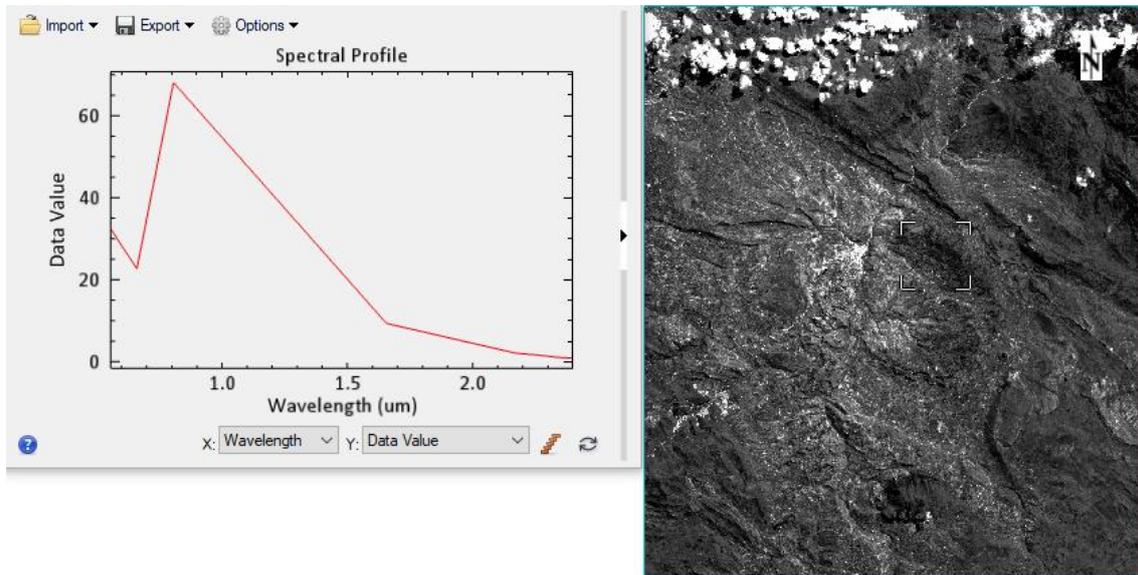


Figura 7: Imagen sin corrección

4.7.2.1 Corrección radiométrica

El modelo de corrección radiométrica tiene en cuenta, entre otros factores, el relieve (ángulos de incidencia y sombras proyectadas), la posición solar, la distancia Tierra-Sol en el momento de captación de la imagen, el amortiguamiento atmosférico en los caminos de ida y de retorno de la radiación y parámetros, para cada canal, de densidad óptica atmosférica, irradiancia exoatmosférica solar y calibración del sensor.

4.7.2.2 Corrección atmosférica

La corrección atmosférica busca recuperar la radiancia propia del objeto de estudio, obtenida de la señal recibida por el sensor. Para ello se requiere: 1) convertir los números digitales (ND) de cada banda a valores de radiancia, y 2) la radiancia se transforma a valores de reflectividad en el techo de la atmósfera "Top of Atmosphere", esto se obtiene mediante FLAASH la conversión a valores de reflectancia (Kruse, 2004).

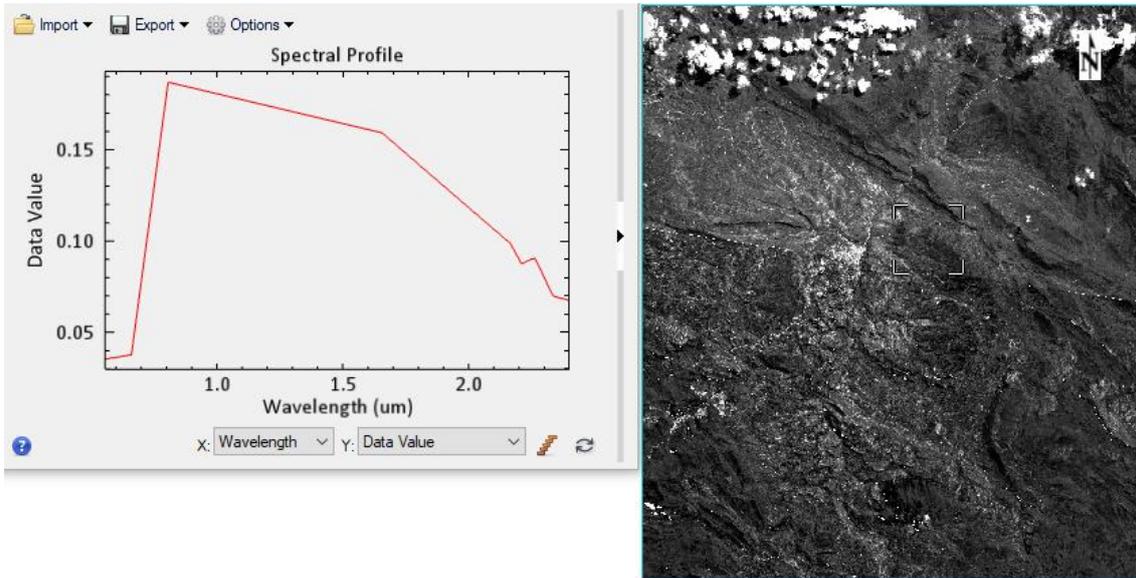


Figura 8: Corrección Atmosférica.

4.7.4. Creación de máscaras de filtrado de datos

Para tener un mejor realce de las anomalías espectrales es necesario realizar un enmascaramiento correspondiente a las zonas de cubierta vegetal, así como zonas de nube.

El enmascaramiento sirve para realizar el filtrado digital de objetos o cubiertas de los cuales no se necesite tomar datos de electromagnetismo

4.7.3.1. Mascara de nubes

Este tipo de máscara permite determinar las áreas de nubes y las zonas saturadas haciendo el uso de la banda 1, mediante una selección a partir de componentes principales de este modo se escoge un umbral de selección para suprimir la información espectral concerniente a las áreas de nubosidad y zonas de saturación.

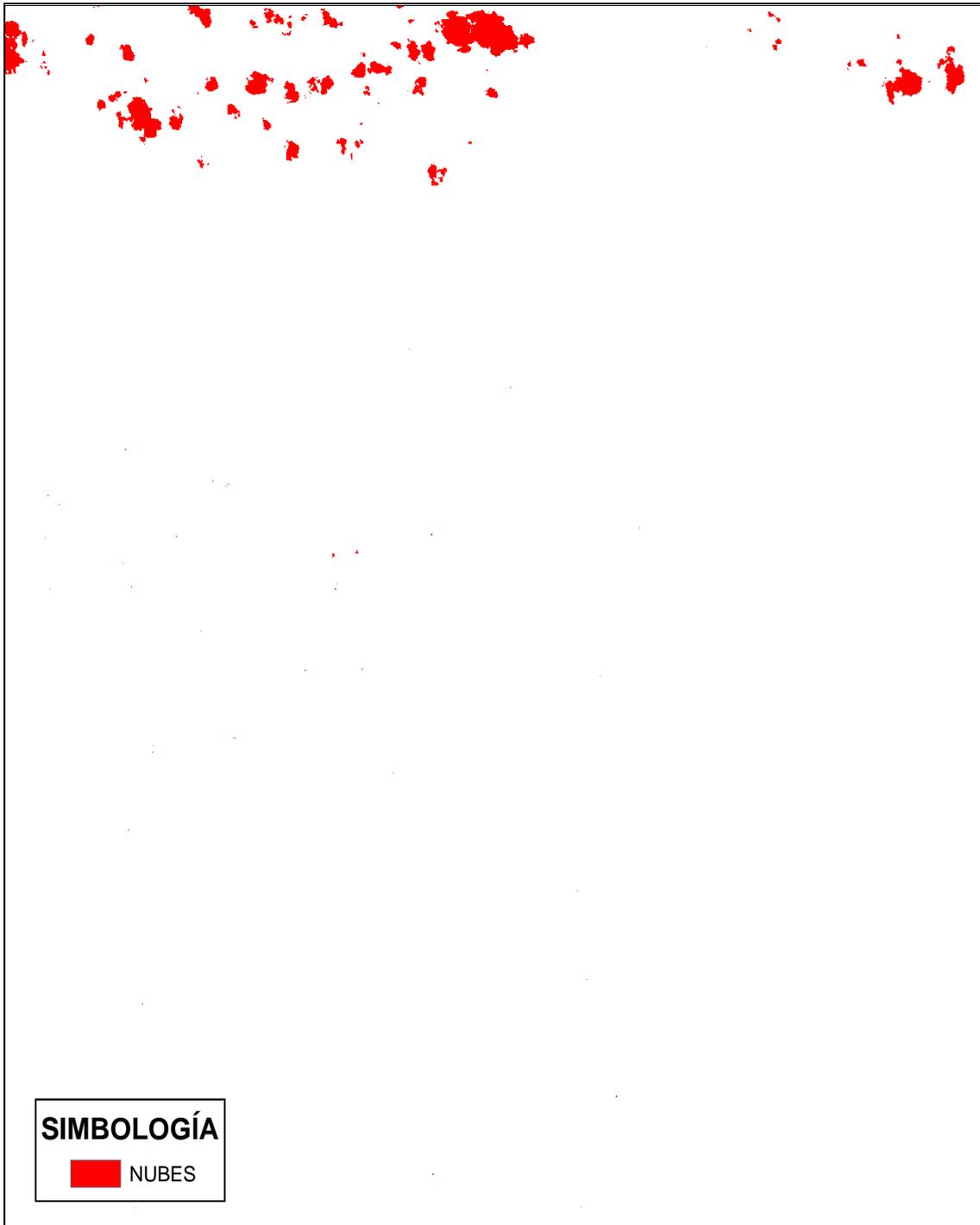


Figura 9: Mascara de nubes.

4.7.3.2. Mascara de vegetación

Permite determinar zonas con presencia de vegetación poco vigorosa, vigorosa y precisar mediante un umbral el rango en el cual esta codificada la información espectral de la clorofila de las plantas para así determinar el filtrado de esta información, en el caso de la investigación se utilizó el componente principal 3 que contenía la información espectral de la vegetación.



Figura 10: Mascara de vegetación.

4.7.3.3. Aplicación de máscaras

Para la aplicación de la máscara se combina la información de todas las máscaras elaboradas con la finalidad de realizar un filtrado de información general sobre la imagen corregida, una vez realizada la máscara la imagen quedará lista para el análisis espectral del estudio

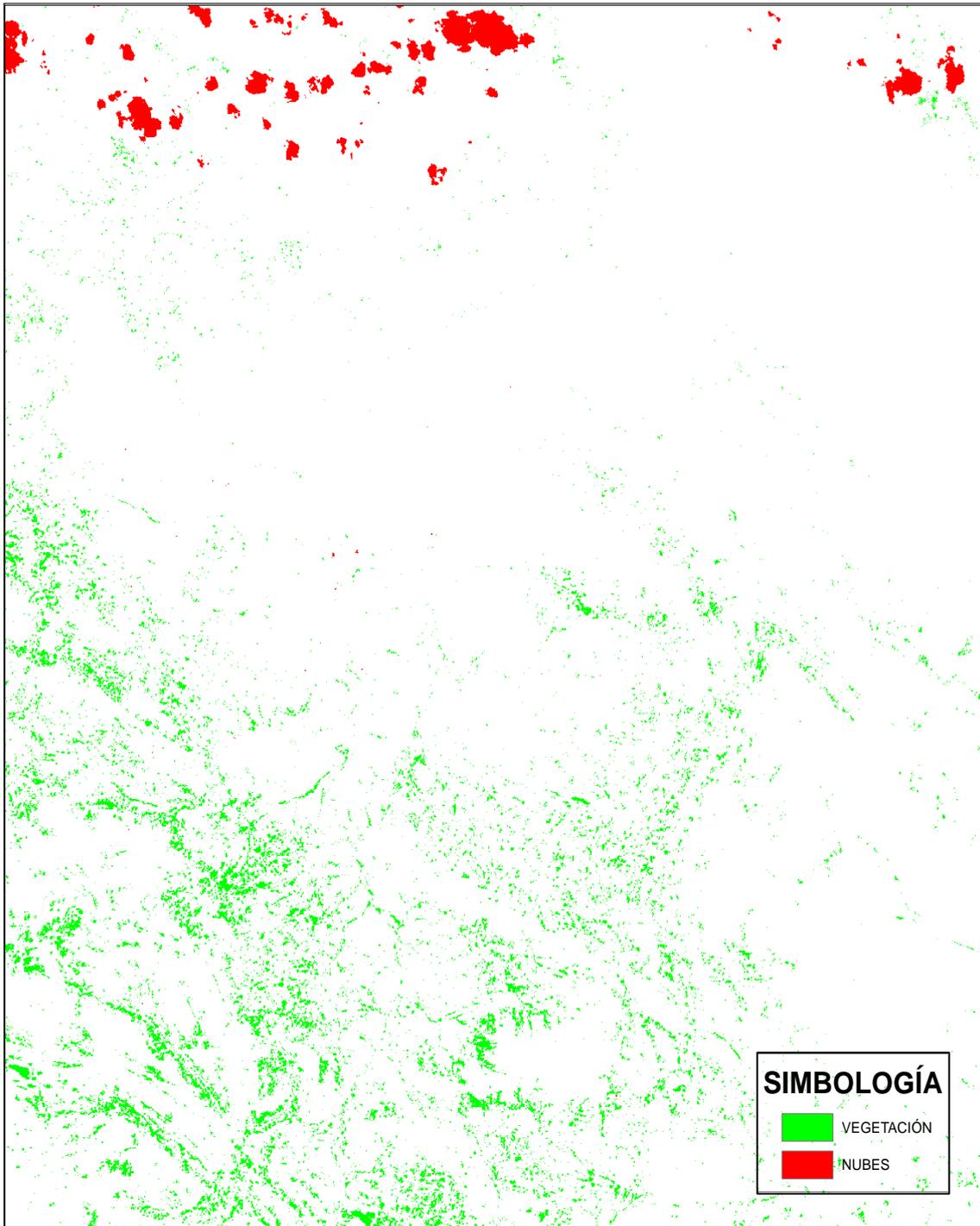


Figura 11: Aplicación de las máscaras.

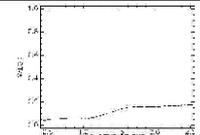
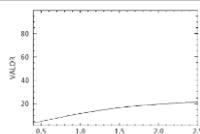
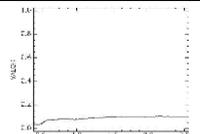
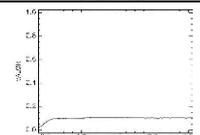
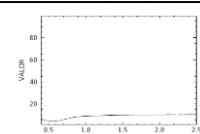
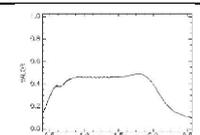
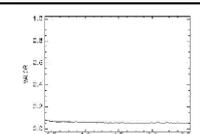
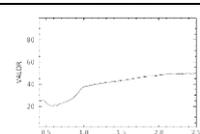
4.7.5. Análisis Espectral

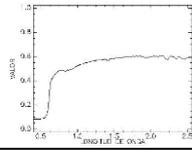
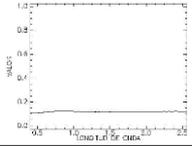
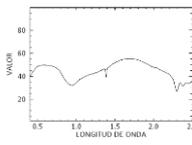
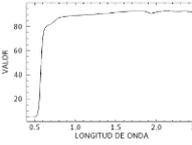
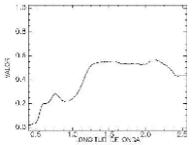
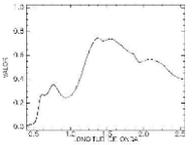
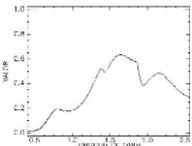
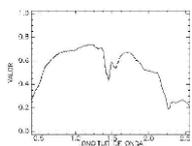
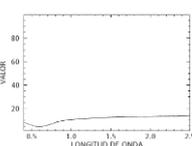
4.7.4.1. Creación de librería espectral

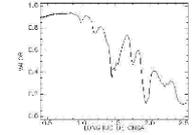
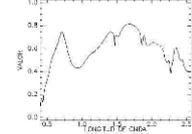
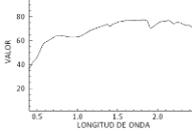
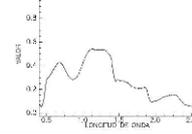
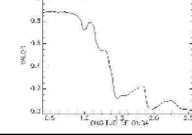
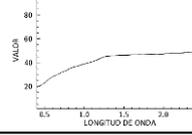
La creación de una librería espectral permitirá la identificación selectiva de minerales, es decir buscare realizar una comparación detallada entre las firmas espectrales de la USGS y las firmas espectrales obtenidas de los pixeles puros de la zona de estudio permitiendo de esta forma identificar la existencia de minerales que alteran la acidez y permiten la liberación de metales pesados.

En la presente investigación se tomará como modelo de generación de acidez y metales pesados a minerales Sulfurados, Oxihidróxidos de hierro y Oxihidróxidos de aluminio

Tabla 4: Firma espectral de minerales que generan acidez y metales pesados en condiciones de oxidación.

SULFUROS		
MINERAL	FÓRMULA	FIRMA USGS
Pirita	FeS_2	
Marcasita	FeS_2	
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$	
Calcopirita	CuFeS_2	
Bornita	Cu_5FeS_4	
Esfalerita	$(\text{Zn,Fe})\text{S}$	
Galena	PbS	
Molibdenita	MoS_2	

Cinabrio	HgS	
Cobaltita	CoAsS	
Antimonita	Sb ₂ S ₃	
Rejalgar	AsS	
OXI HIDROXIDO DE HIERRO		
MINERAL	FÓRMULA	FIRMA USGS
Goetita	α -FeO(OH)	
Lepidocrocita	γ -FeO(OH)	
Ferrihidrita	Fe(OH) ₃	
Gibbsita	Al(OH) ₃	
boehmita	AlO(OH)	

OXI HIDROXIDO DE ALUMINIO		
MINERAL	FÓRMULA	FIRMA USGS
Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Jarosite	$(\text{K,Na,H}_3\text{O})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	
Schwertmannita	$\text{Fe}_{16}\text{O}_{16}(\text{SO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	
Copiapita	$\text{Fe}^{\text{II}}\text{Fe}_4^{\text{III}}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	
Epsomita	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
Anglesita	PbSO_4	

Fuente: USGS 2016

4.7.4.2. Análisis De Firmas Espectrales

A. Esfalerita

a. Análisis de firmas por el método de envolvente

Para realizar el análisis espectral de este mineral se realiza la comparación con la firmas espectrales de esfalerita proporcionada por la NASA que incluye datos de otras tres librerías espectrales: de la Universidad Johns Hopkins (JHU), de los Laboratorios de Propulsión a Reacción (JPL) y del centro de Estudios de Geológicos de los Estados Unidos (USGS - Reston), esta firmas son proporcionadas por espectrómetros convencionales y métodos de difracción de rayos X, por lo que la gráfica espectral es completa y compuesta.

Para realizar la comparación con firmas espectrales se debe tener en cuenta que la gráfica obtenida de las imágenes ÁSTER corresponde a longitudes constituidas por 14 bandas

espectrales de resolución, es por ello que se tendrá que generar una envolvente en torno a la firma espectral proporcionada por la NASA

Análisis de firmas por el método de envolvente

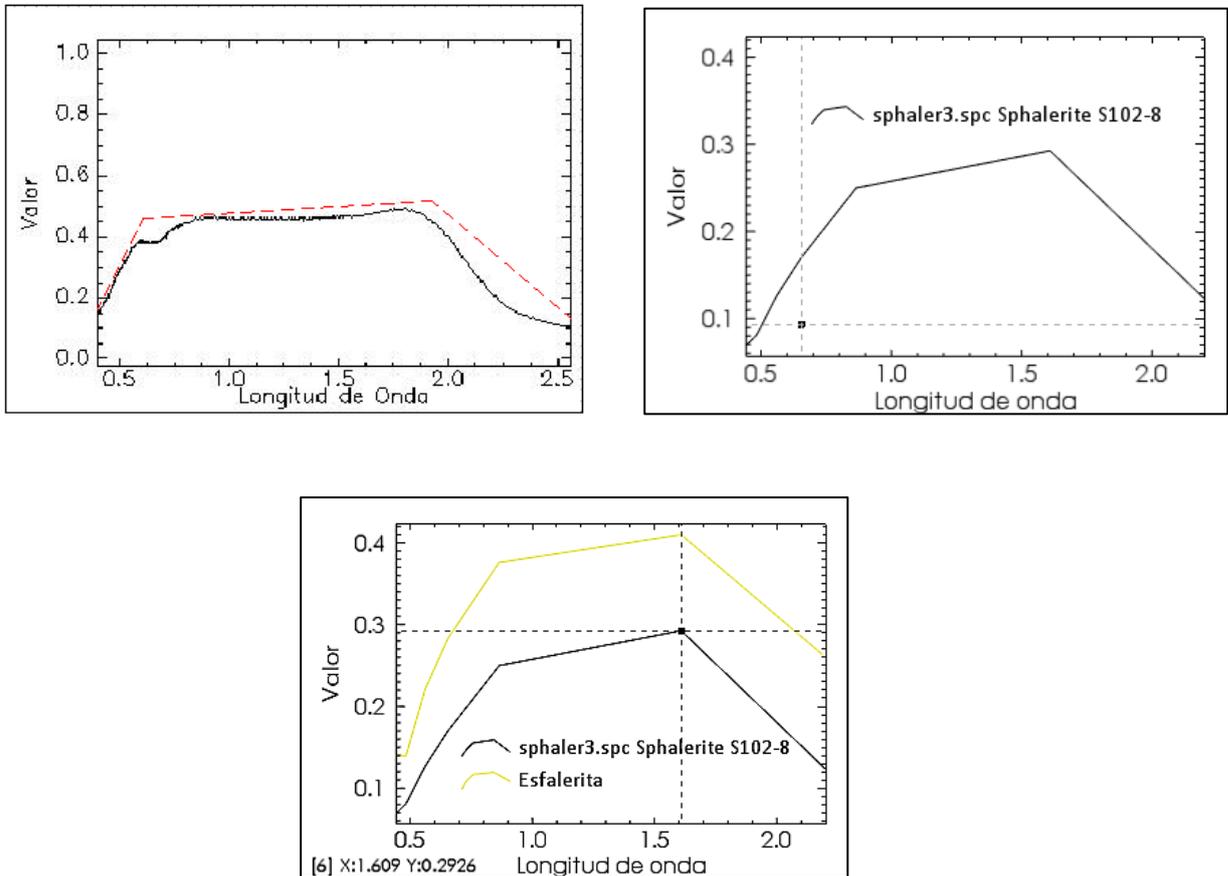


Figura 12: Análisis de firmas espectral de esfalerita

b. Aporte mineral

Se puede apreciar que realizando la reacción redox en condiciones de oxidación podemos obtener que por cada molécula de esfalerita en campo genera la liberación de una molécula de Zn y una molécula de ácido sulfúrico, es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de metales pesados como el Zn y aporte de acidez generada por las moléculas liberadas de ácido sulfúrico.



Esfalerita liberación de metal pesado Zn liberación de ácido sulfúrico (+pH)

Posterior a la identificación de la firma espectral obtenida se calcula el porcentaje de aparición en la zona de estudio

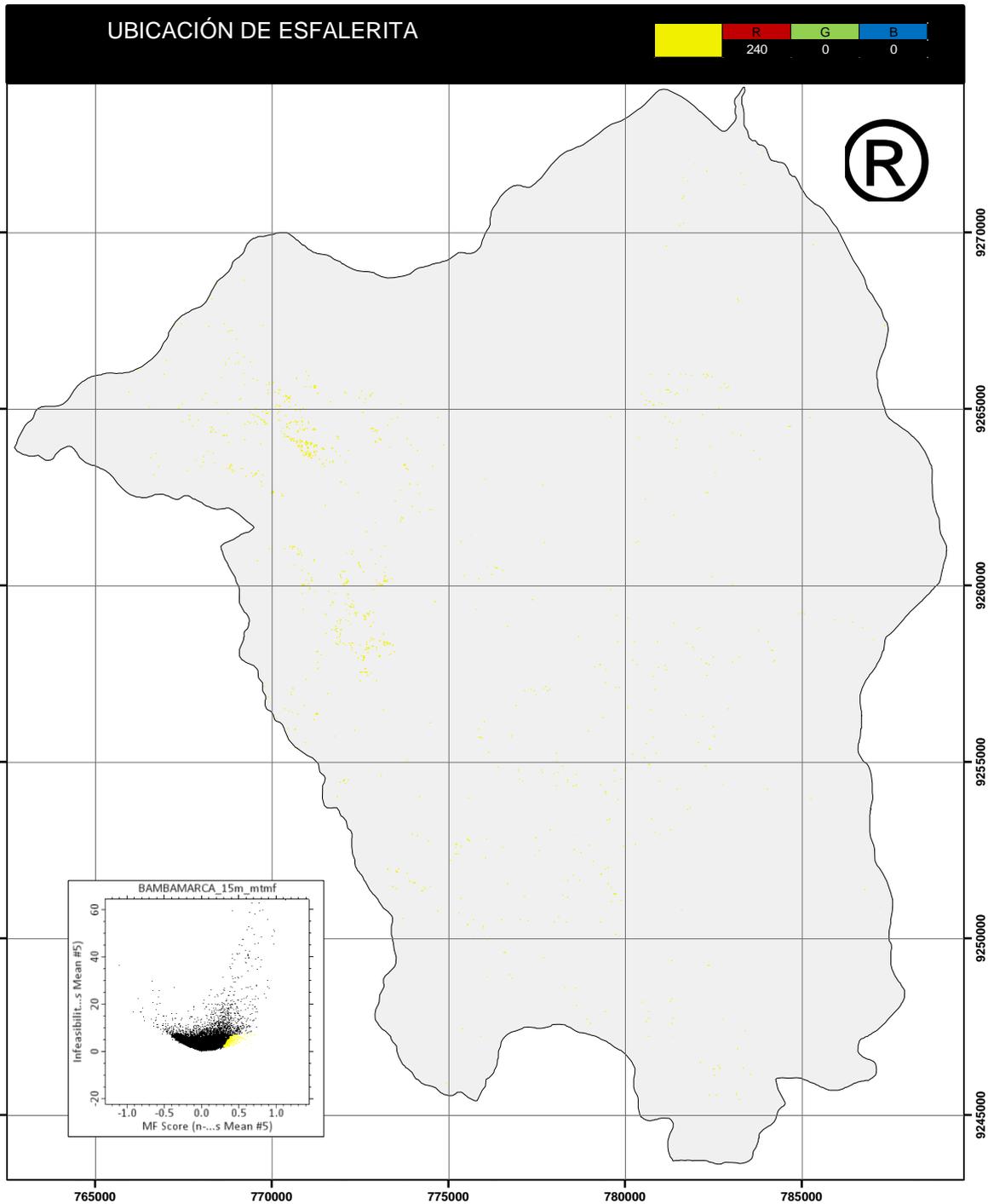


Figura 13: Ubicación de zonas con aporte de esfalerita.

B. Ferrihidrita

a. Análisis de firmas por el método de envolvente

Para realizar el análisis espectral de este mineral se realiza la comparación con la firma espectral de Ferrihidrita proporcionada por el centro de Estudios de Geológicos de los Estados Unidos (USGS), y se utilizó el método de envolvente en la gráfica original para poder realizar la comparación de la firma espectral obtenida en la zona de estudio, analizando los picos de absorción y reflectancia plasmados en la gráfica.

b. Aporte mineral.

Se puede apreciar que realizando la reacción redox en condiciones de alteración de pH podemos obtener que por cada molécula de Ferrihidrita en campo se genera la liberación de una molécula de trióxido férrico y tres moléculas de agua, es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de metales pesados como el Fe:

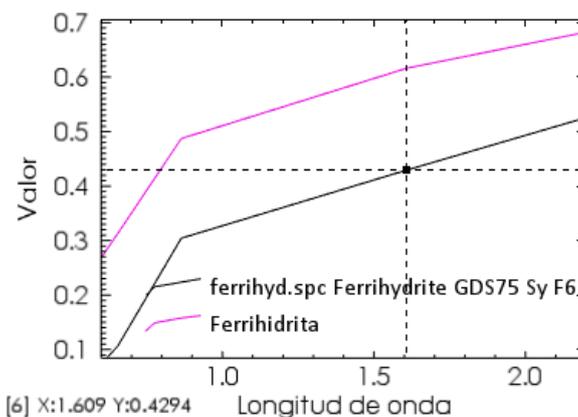
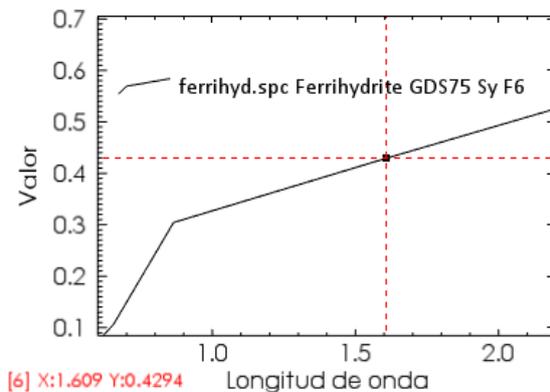
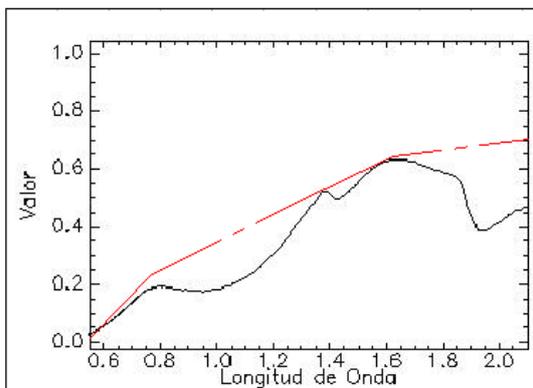


Figura 14: Análisis de firmas espectral de Ferrihidrita

Posterior a la identificación de la firma espectral obtenida se calcula el porcentaje de aparición en la zona de estudio para la Ferrihidrita.

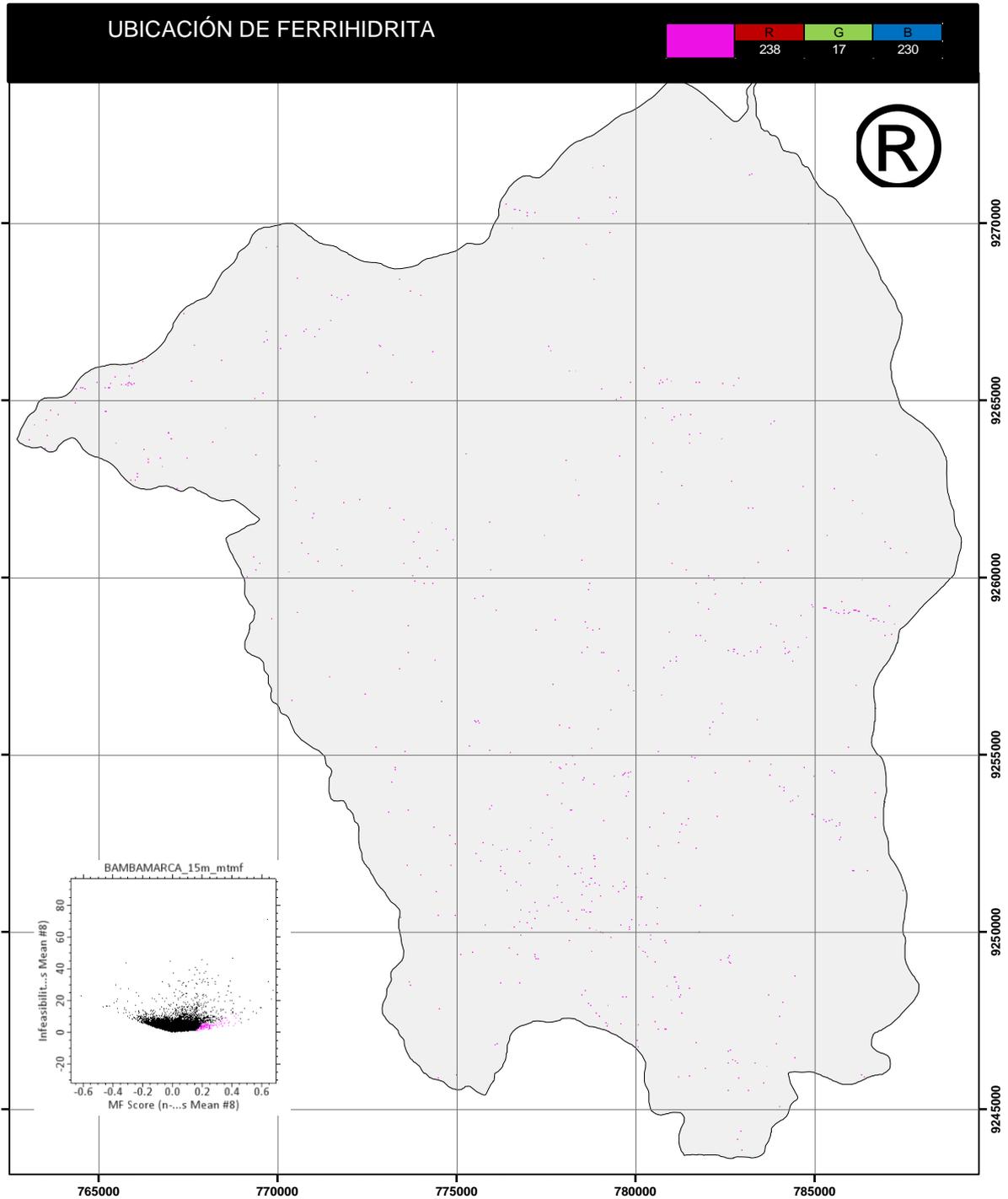


Figura 15: Ubicación de zonas con aporte de Ferrihidrita.

C. Gypsum

a. Análisis de firmas por el método de envolvente

Para realizar el análisis espectral de Gypsum, conocido también como yeso, se realiza la comparación con las firmas espectrales de Gypsum proporcionada por el centro de Estudios de Geológicos de los Estados Unidos (USGS), y se utilizó el método de envolvente en la gráfica original para poder realizar la comparación de la firma espectral obtenida en la zona de estudio

b. Aporte mineral

Se puede apreciar que realizando la reacción redox en condiciones de alteración de pH podemos obtener que por cada dos moléculas de Gypsum en campo se genera la liberación de dos moléculas de ácido sulfúrico y la precipitación de dos moléculas de calcio, es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de acidez

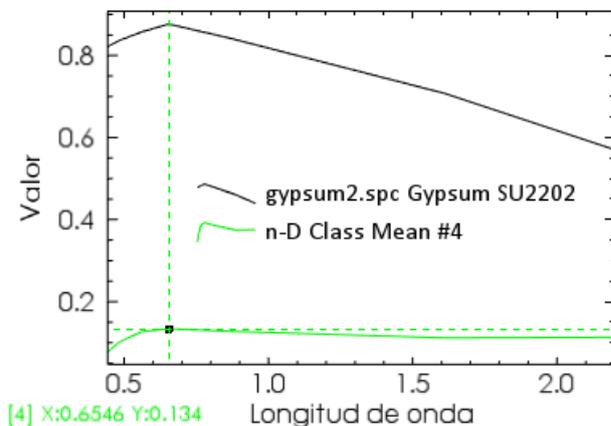
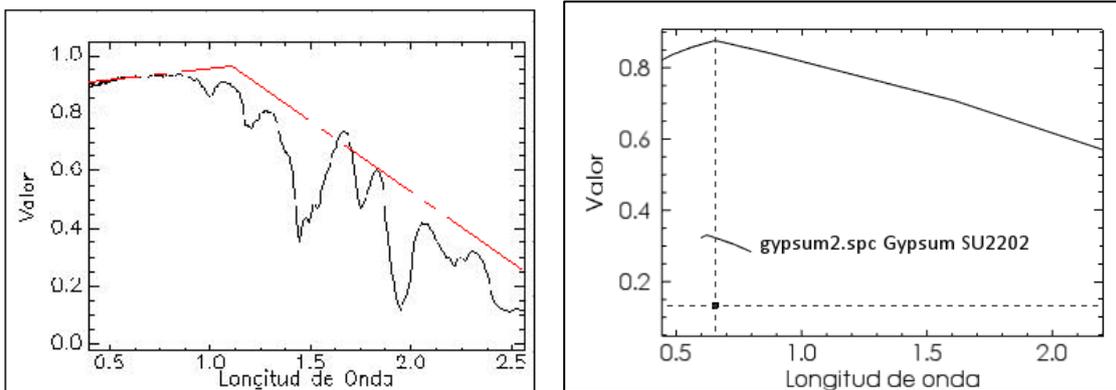


Figura 16: Análisis de firmas espectral de Gypsum

Posterior a la identificación de la firma espectral obtenida se calcula el porcentaje de aparición de Gypsum en la zona de estudio

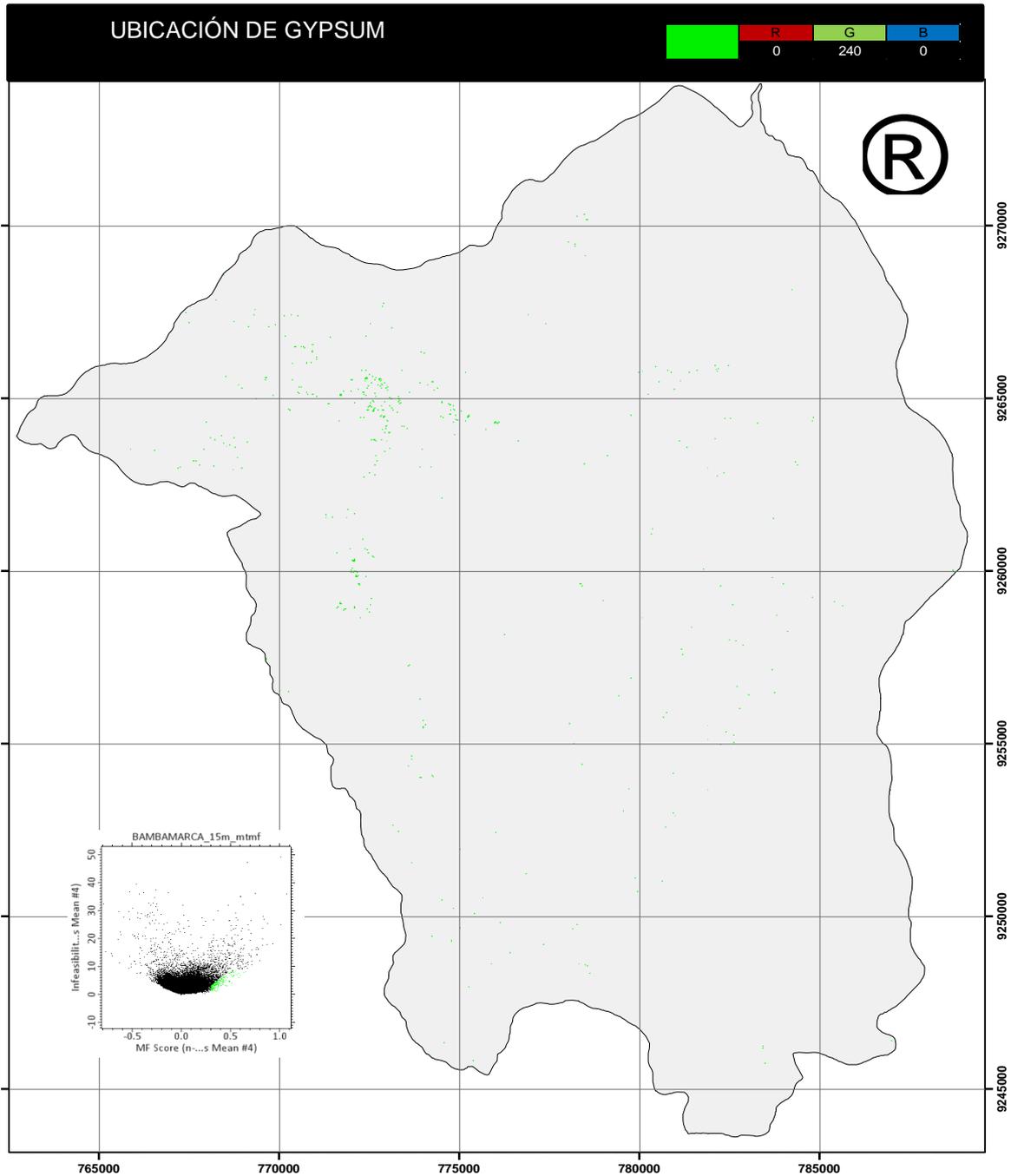


Figura 17: Ubicación de zonas con aporte de Gypsum.

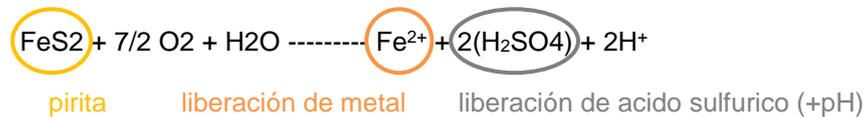
D. Pirita – calcopirita

a. Análisis de firmas por el método de envolvente

Para realizar el análisis espectral de pirita y calcopirita, se realiza la comparación con las firmas espectrales combinada de pirita calcopirita y marcasita proporcionada por el centro de Estudios de Geológicos de los Estados Unidos (USGS), y se utilizó el método de envolvente en la gráfica original para poder realizar la comparación de la firma espectral obtenida en la zona de estudio

b. Aporte mineral

Se puede apreciar que realizando la reacción redox en condiciones de oxidación se obtendrá que por cada molécula de pirita en campo se genera la liberación de dos moléculas de ácido sulfúrico y la precipitación de una molécula de Fe^{2+} , es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de acidez y metales pesados como el Fe^{2+}



Además, se obtendrá que por cada molécula de calcopirita en campo se genera la liberación de dos moléculas de ácido sulfúrico, la precipitación de una molécula de Cu^{1+} y la liberación de una molécula de Fe^{2+} es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de acidez y metales pesados como el Fe^{2+} y Cu^{1+}

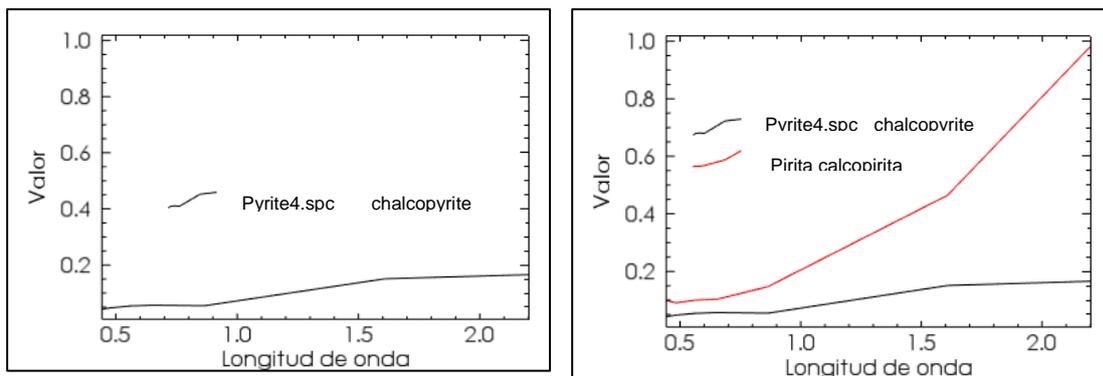
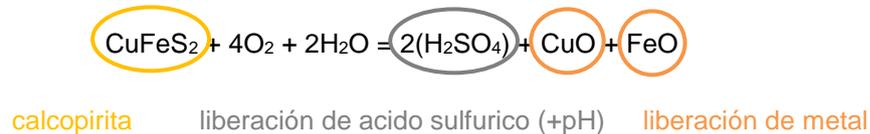


Figura 18: Análisis de firmas espectral de pirita - calcopirita

Posterior a la identificación de la firma espectral obtenida se calcula el porcentaje de aparición de pirita calcopirita en la zona de estudio

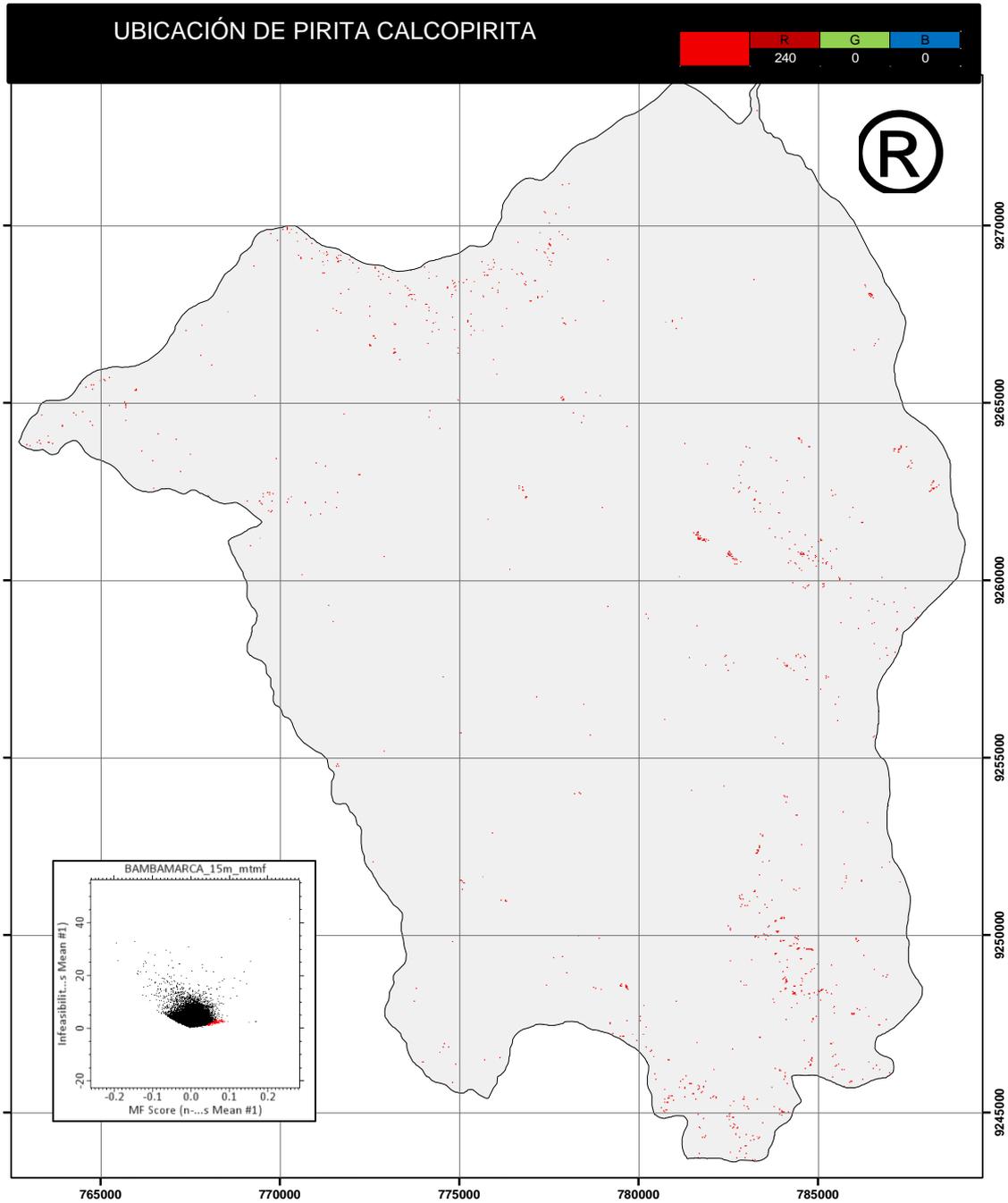


Figura 19: Ubicación de zonas con aporte de pirita - calcopirita.

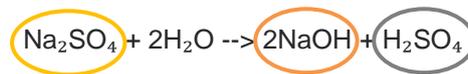
E. Thenardita

a. Análisis de firmas por el método de envolvente

Para realizar el análisis espectral de Thenardita, se realiza la comparación con la firma espectral de Thenardita proporcionada por el centro de Estudios de Geológicos de los Estados Unidos (USGS), y se utilizó el método de envolvente en la gráfica original para poder realizar la comparación de la firma espectral obtenida en la zona de estudio

b. Aporte mineral

Se puede apreciar que realizando la reacción redox en condiciones de oxidación se obtendrá que por cada molécula de Thenardita en campo se genera la liberación de dos moléculas de ácido sulfúrico y la precipitación de una molécula de Fe^{2+} , es por ello que a partir de la localización de este mineral podremos definir cuáles son las zonas con aporte de acidez y metales pesados como el Fe^{2+}



Thenardita
 liberación de hidroxido
 liberación de acido sulfurico (+pH)

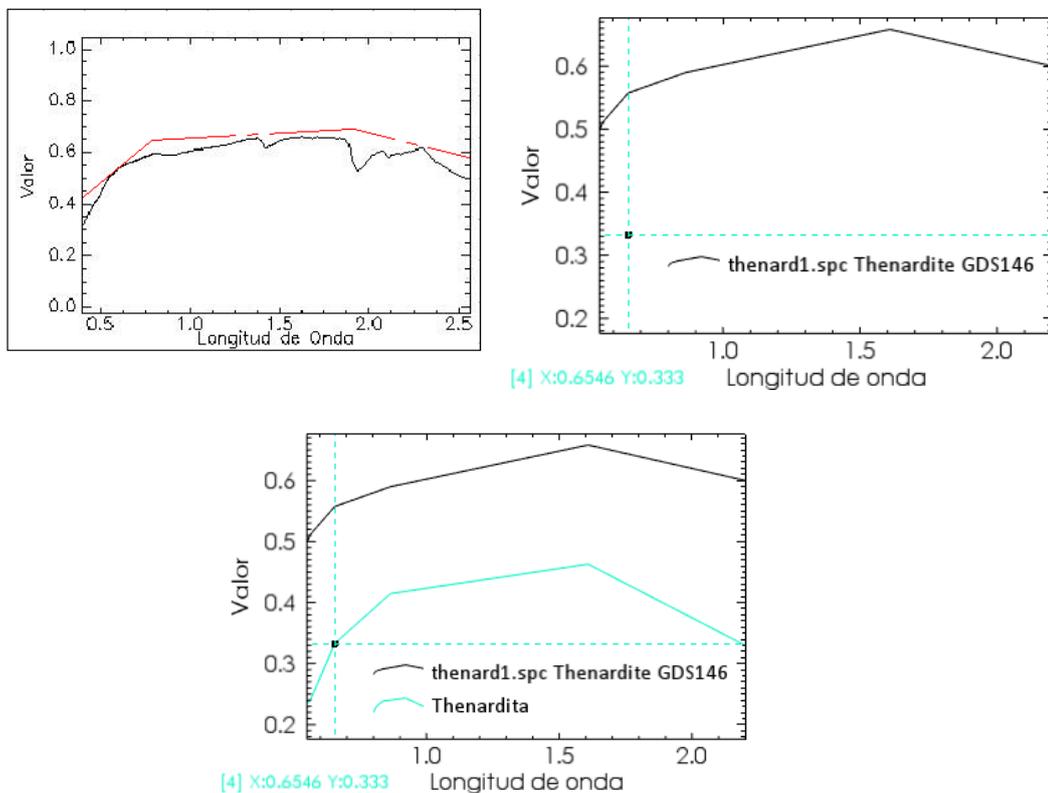


Figura 20: Análisis de firmas espectral de Thenardita.

Posterior a la identificación de la firma espectral obtenida se calcula el porcentaje de aparición de Thenardita en la zona de estudio

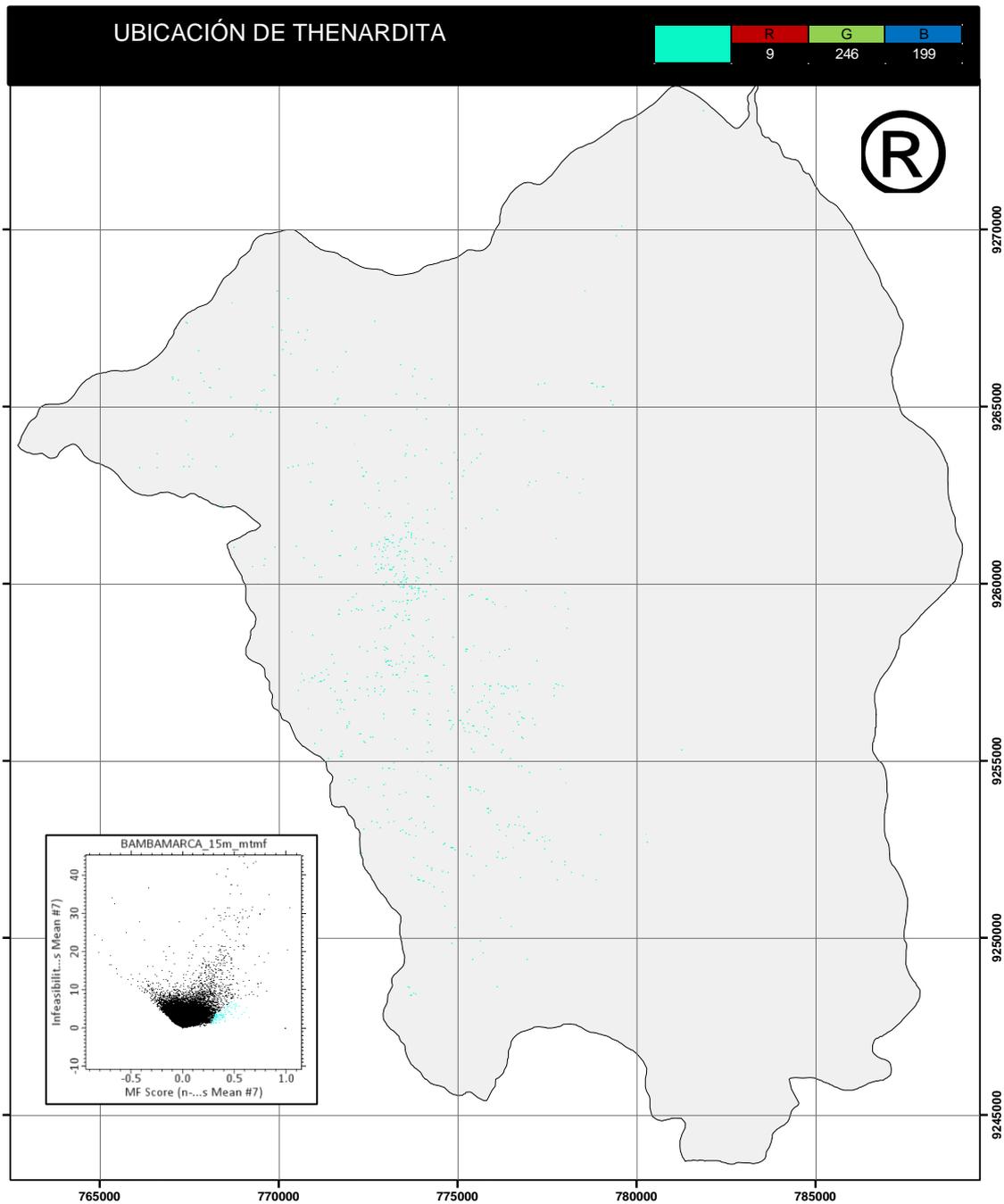


Figura 21: Ubicación de zonas con aporte de Thenardita.

4.7.4.3. Muestreo de agua y sedimentos activos

Se realizaron trabajos de campo en el área de estudio, en donde se llevó a cabo un muestreo de agua y sedimentos finos activos, los cuales corresponden a la fracción fina y liviana presente en el lecho activo de las corrientes que conforman los drenajes, sedimentos finos cercanos a zonas de contaminación y tomas de agua en confluencia de ríos.

Para la toma de las muestras de finos se usó un tamiz plástico No. 60 (250 μm), un recipiente y una pala plástica sin pintar y libres de metales para evitar la contaminación de las muestras, y bolsas plásticas de polietileno.

Para la toma de las muestras de agua se colectó en frascos esterilizados y sellados de plástico para evitar la contaminación de las muestras.

Al llegar al punto de muestreo siempre se registraron las coordenadas y se diligenció el formato de captura de información en campo en el que se describía el sitio, el drenaje y la muestra.

Se colectaron entre 500 a 1000 gr por muestra de sedimento activo y 200 a 500 ml en muestras de agua.

4.7.4.4. Definición de la malla de muestreo

La distribución de las muestras se definió teniendo en cuenta su representatividad en la caracterización del problema, de tal forma que fuera posible establecer, aproximadamente, las fuentes de contaminación y la extensión de los agentes contaminantes a lo largo de la red drenaje y zonas con interacción minera

Se señalaron como puntos de muestreo zonas con presencia de minería artesanal, las intersecciones y desembocaduras de las quebradas de mayor orden. Y se hizo una selección de 32 puntos de muestreo para garantizar una densidad de una muestra por km^2 .

Las muestras se tomaron a aproximadamente 10 m antes de la desembocadura de los drenajes, para garantizar la captación de un material homogéneo y representativo del drenaje.

A. Muestras de sedimentos finos

a. Toma de muestras de sedimentos finos

Las muestras de sedimentos finos fueron codificadas de la siguiente manera:

Tabla 5: Codificación de muestras de finos tomadas en la zona de estudio

Muestras de sedimentos finos					
Muestra	Código	Coordenadas			observación
		Este	Norte	Cota	
1	MS01	773506	9261726	2535	cercano a río Maygasbamba
2	MS02	773634	9261594	2529	cercano a río Maygasbamba
3	MS03	773849	9261454	2518	cercano a río Maygasbamba
4	MS04	774333	9261264	2517	cercano a río Maygasbamba
5	MS05	774339	9261256	2517	cercano a río Maygasbamba
6	MS06	774347	9255965	2490	cercano a río Llaucán
7	MS07	774249	9259656	2487	cercano a río Llaucán
8	MS08	774367	9259668	2476	cercano a río Llaucán
9	MS09	774437	9259735	2470	Quebrada afluente Llaucan
10	MS10	774447	9259732	2491	cercano a río Llaucán
11	MS11	774704	9261454	2487	cercano a río Maygasbamba
12	MS12	774711	9261466	2478	cercano a río Maygasbamba
13	MS13	774731	9261480	2479	confluencia Llaucano - Maygas
14	MS14	774744	9261398	2482	cercano a río Llaucán
15	MS15	774797	9269050	2476	cercano a río Añomayo
16	MS16	774788	9262050	2473	cercano a río Añomayo

Los sedimentos finos fueron recolectados siguiendo el procedimiento de recolección estándar especificado en el marco teórico en el cual se recolecto muestras de 500 a 1000 gr usando pala de plástico y bolsas de muestra de polietileno codificadas.

b. Análisis de PH de sedimentos finos

Para el análisis de sedimentos finos se procedió a tamizar las muestras utilizando una malla No. 60 (250 μm), luego se procedió a extraer aproximadamente 100 g de sedimento y se disolvió en 100 ml de agua destilada, finalmente se introducía el pH-metro en la solución y después de 30 segundos se registraba la lectura digital.

Tabla 6: Análisis de pH de muestra de sedimentos.

PH de sedimentos finos				
Código	Coordenadas			pH
	Este	Norte	Cota	
MS01	773506	9261726	2535	6.54
MS02	773634	9261594	2529	6.07
MS03	773849	9261454	2518	6.98
MS04	774333	9261264	2517	6.79
MS05	774339	9261256	2517	7.55
MS06	774347	9255965	2490	6.1
MS07	774249	9259656	2487	6.4
MS08	774367	9259668	2476	6.97
MS09	774437	9259735	2470	7.51
MS10	774447	9259732	2491	6.18
MS11	774704	9261454	2487	6.88
MS12	774711	9261466	2478	7.4
MS13	774731	9261480	2479	6.68
MS14	774744	9261398	2482	7.34
MS15	774797	9269050	2476	6.32
MS16	774788	9262050	2473	6.35

B. Muestras de agua

a. Toma de muestras de agua

Las muestras de agua fueron codificadas de la siguiente manera:

Tabla 7: codificación de muestras de agua tomadas en la zona de estudio.

Muestras de agua					
Muestra	Código	Coordenadas			observación
		Este	Norte	Cota	
28	MA01	773506	9261726	2535	cercano a río Maygasbamba
29	MA02	773634	9261594	2529	cercano a río Maygasbamba
30	MA03	773849	9261454	2518	cercano a río Maygasbamba
31	MA04	774333	9261264	2517	cercano a río Maygasbamba
32	MA05	774339	9261256	2517	cercano a río Maygasbamba
33	MA06	774347	9255965	2490	cercano a río Llaucán
34	MA07	774249	9259656	2487	cercano a río Llaucán
35	MA08	774367	9259668	2476	cercano a río Llaucán
36	MA09	774437	9259735	2470	Quebrada afluente Llaucan
37	MA10	774447	9259732	2491	cercano a río Llaucán
38	MA11	774704	9261454	2487	cercano a río Maygasbamba
39	MA12	774711	9261466	2478	cercano a río Maygasbamba
40	MA13	774731	9261480	2479	confluencia Llaucano - Maygas
41	MA14	774744	9261398	2482	cercano a río Llaucán
42	MA15	774797	9269050	2476	cercano a río Añomayo
43	MA16	774788	9262050	2473	cercano a río Añomayo
44	MA17	774755	9262022	2475	muestra en casa de pobladores
45	MA17	774769	9262035	2476	muestra en casa de pobladores

b. Análisis de pH de las muestras de agua

Para la toma de muestras de acidez en agua se separó 100 ml de la muestra total en recipientes esterilizados, una vez codificados los envases se procedió a la toma de datos insertando en cada uno de los recipientes el PH metro, dejándolo en reposo por espacio de 30 segundos para garantizar la lectura correcta de PH.

Tabla 8: Análisis de pH de muestra de agua.

PH de muestras de agua				
Código	coordenadas			pH
	Este	Norte	Cota	
MA01	773506	9261726	2535	6.65
MA02	773634	9261594	2529	6.4
MA03	773849	9261454	2518	7.15
MA04	774333	9261264	2517	6.57
MA05	774339	9261256	2517	4.39
MA06	774347	9255965	2490	6.93
MA07	774249	9259656	2487	7.36
MA08	774367	9259668	2476	4.25
MA09	774437	9259735	2470	7.4
MA10	774447	9259732	2491	7.3
MA11	774704	9261454	2487	6.9
MA12	774711	9261466	2478	6.71
MA13	774731	9261480	2479	7.23
MA14	774744	9261398	2482	7.01
MA15	774797	9269050	2476	6.5
MA16	774788	9262050	2473	6.93
MA17	774755	9262022	2475	7.27
MA18	774769	9262035	2476	6.39

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Presentación De Resultados obtenidos del análisis espectral

Una vez detectados los minerales a partir de las firmas espectrales se presenta el siguiente resultado especificando las áreas de mayor aporte ácido y con presencia de mayor cantidad de metales pesados.

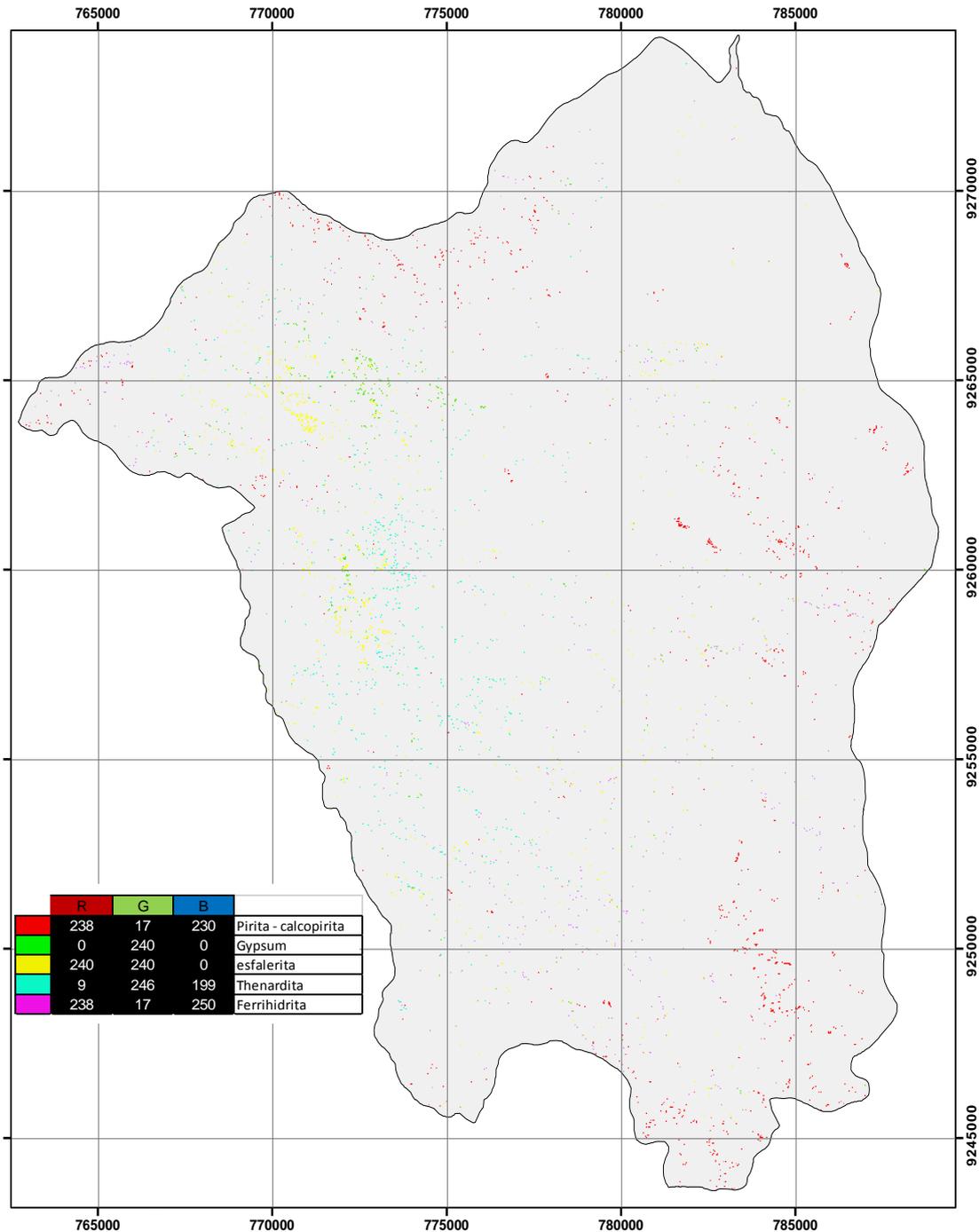


Figura 22: Ubicación de zonas con aporte DE MINERALES SULFURADOS y metales pesados.

5.2. Presentación de resultados obtenidos en campo

Se presenta también los resultados del análisis de pH en sedimentos y agua de la zona de estudio, apreciándose en la tabla 9 y 10 la clasificación de acidez en función de su valor de pH

Procedimiento en anexo 01

Tabla 9: Clasificación de muestras de sedimentos finos en torno a grado de acidez.

Código	Coordenadas			pH	Clasificación de pH
	Este	Norte	Cota		
MS01	773506	9261726	2535	4.54	Muy Fuertemente ácido
MS02	773634	9261594	2529	4.07	Extremadamente ácido
MS03	773849	9261454	2518	4.98	Muy Fuertemente ácido
MS04	774333	9261264	2517	4.79	Muy Fuertemente ácido
MS05	774339	9261256	2517	4.55	Muy Fuertemente ácido
MS06	774347	9255965	2490	6.1	Ligeramente ácido
MS07	774249	9259656	2487	7.4	Ligeramente alcalino
MS08	774367	9259668	2476	4.97	Muy Fuertemente ácido
MS09	774437	9259735	2470	4.51	Muy Fuertemente ácido
MS10	774447	9259732	2491	4.18	Extremadamente ácido
MS11	774704	9261454	2487	6.88	Neutro
MS12	774711	9261466	2478	7.4	Ligeramente alcalino
MS13	774731	9261480	2479	6.62	Neutro
MS14	774744	9261398	2482	7.34	Neutro
MS15	774797	9269050	2476	7.32	Neutro
MS16	774788	9262050	2473	7.35	Ligeramente alcalino

Tabla 10: Clasificación de muestras de agua en torno a grado de acidez.

PH de muestras de agua					
Código	coordenadas			pH	Clasificación de pH
	Este	Norte	Cota		
MA01	773506	9261726	2535	4.65	Ácido
MA02	773634	9261594	2529	4.4	Ácido
MA03	773849	9261454	2518	4.15	Ácido
MA04	774333	9261264	2517	4.57	Ácido
MA05	774339	9261256	2517	4.39	Ácido
MA06	774347	9255965	2490	6.93	Casi neutro
MA07	774249	9259656	2487	7.36	Casi neutro
MA08	774367	9259668	2476	4.25	Ácido
MA09	774437	9259735	2470	4.4	Ácido
MA10	774447	9259732	2491	4.3	Ácido
MA11	774704	9261454	2487	6.69	Casi neutro
MA12	774711	9261466	2478	6.71	Casi neutro
MA13	774731	9261480	2479	7.23	Casi neutro
MA14	774744	9261398	2482	7.01	Casi neutro
MA15	774797	9269050	2476	6.5	Casi neutro
MA16	774788	9262050	2473	6.93	Casi neutro
MA17	774755	9262022	2475	7.32	Casi neutro
MA18	774769	9262035	2476	7.35	Casi neutro

Una vez identificadas las muestras y su grado de acidez se proceden a su grafica espacial para la zonificación de áreas con presencia de mayor acidez.

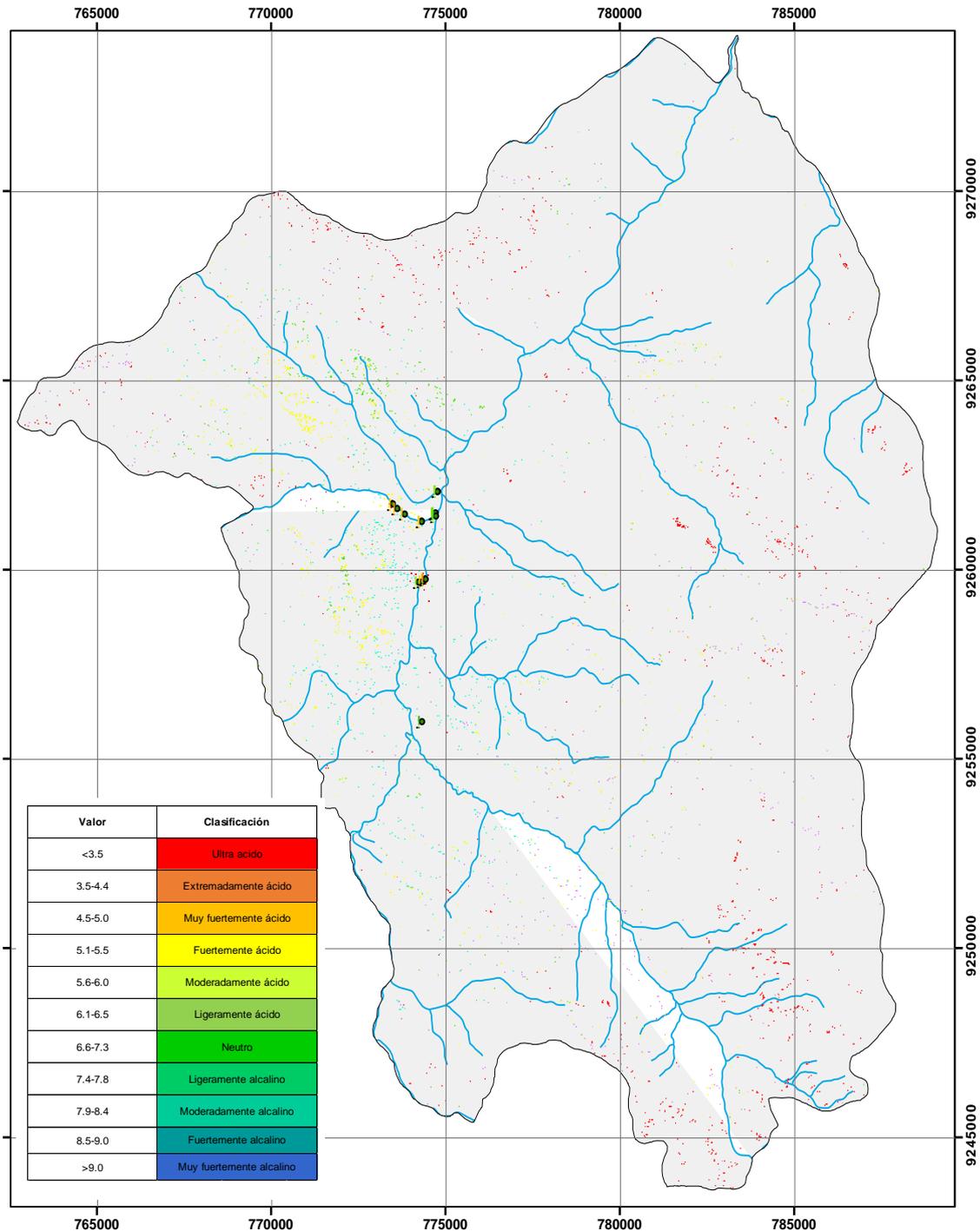


Figura 23: Ubicación de muestras de sedimentos activos por clasificación de acidez.

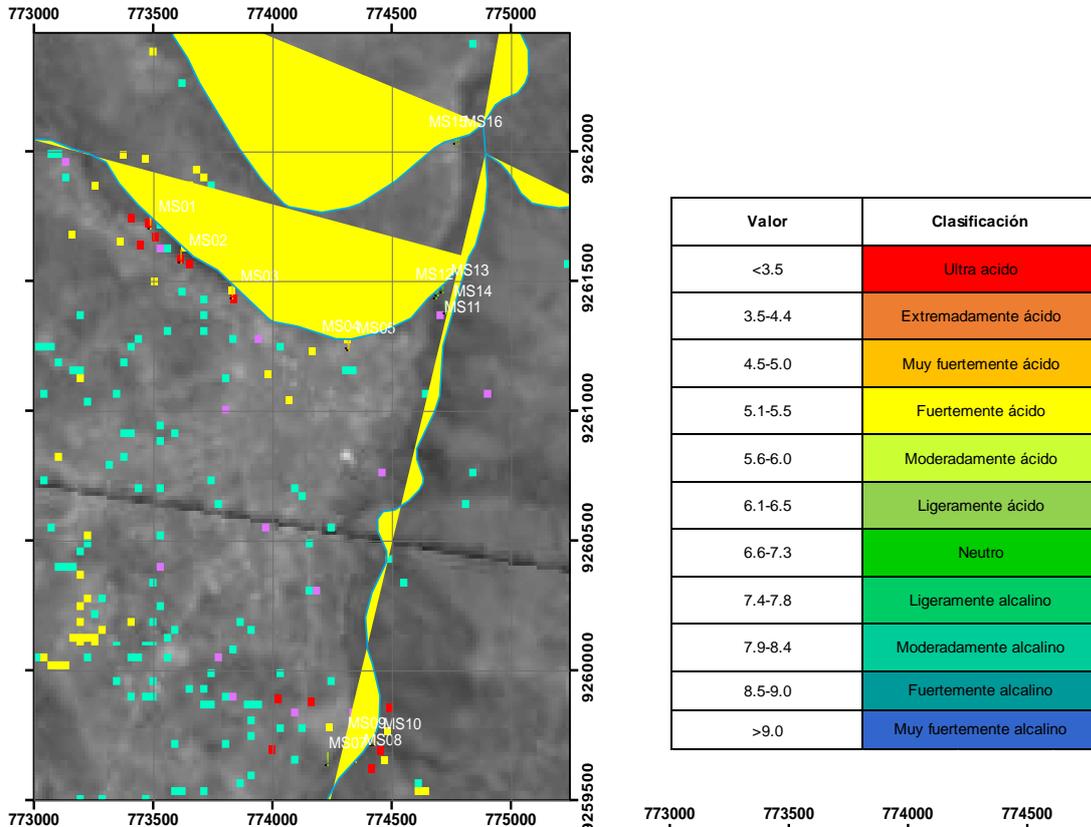


Figura 25: Ubicación de muestras de sedimentos activos MS1, MS2, MS3, MS4, MS5, MS7, MS8, MS9, MS10, MS11, MS12, MS13, MS14, MS15, MS16.

En la ubicación espacial de muestras de sedimentos activos podemos observar que las muestras MS1, MS2, MS3, MS4, MS5, MS8, MS9, MS10 corresponden a muestras de carácter ácido y se encuentran ubicadas en zonas con gran aporte mineral de sulfuros, a diferencia de las muestras MS6, MS11, MS12, MS13, MS14, MS15, MS16 que poseen pH casi neutro y se encuentran ubicadas en zonas de bajo aporte mineral

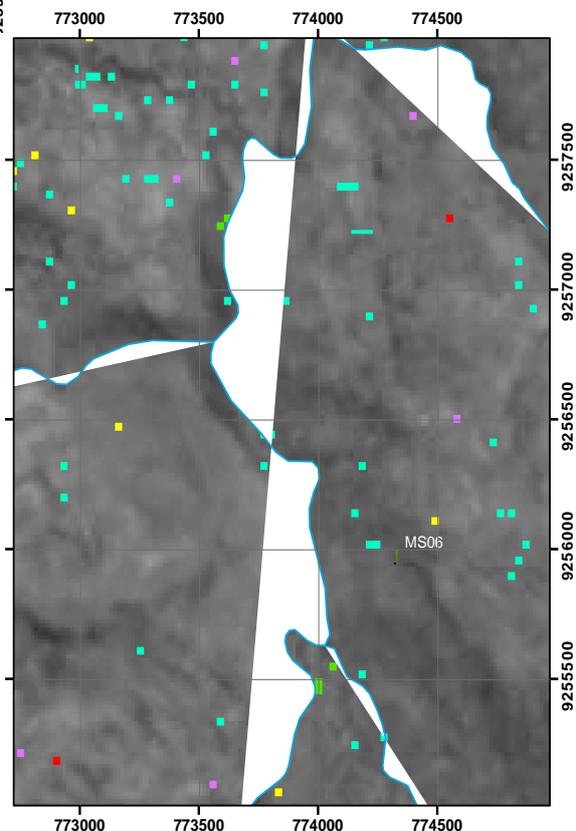


Figura 24: Ubicación de sedimentos activos MS6.

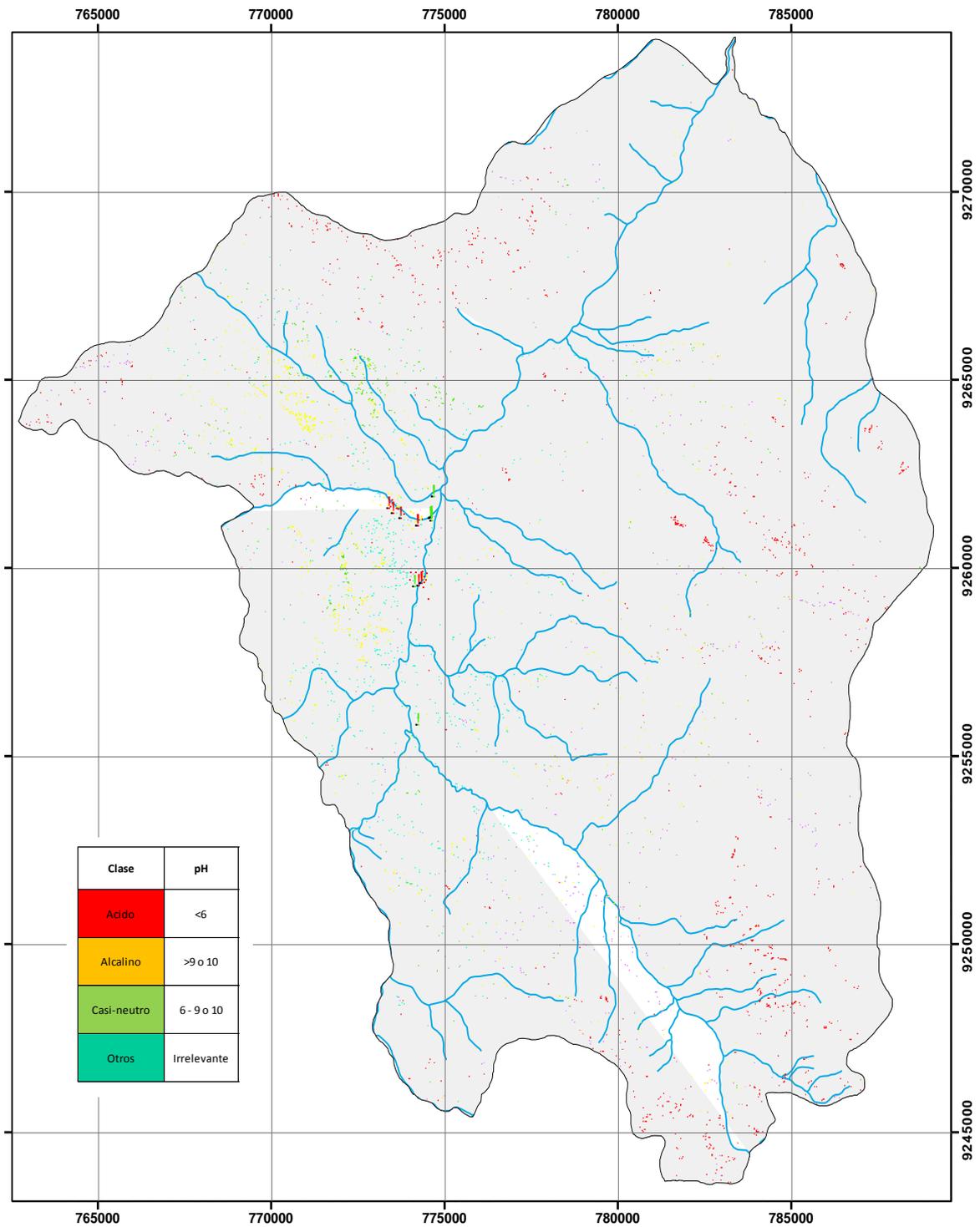
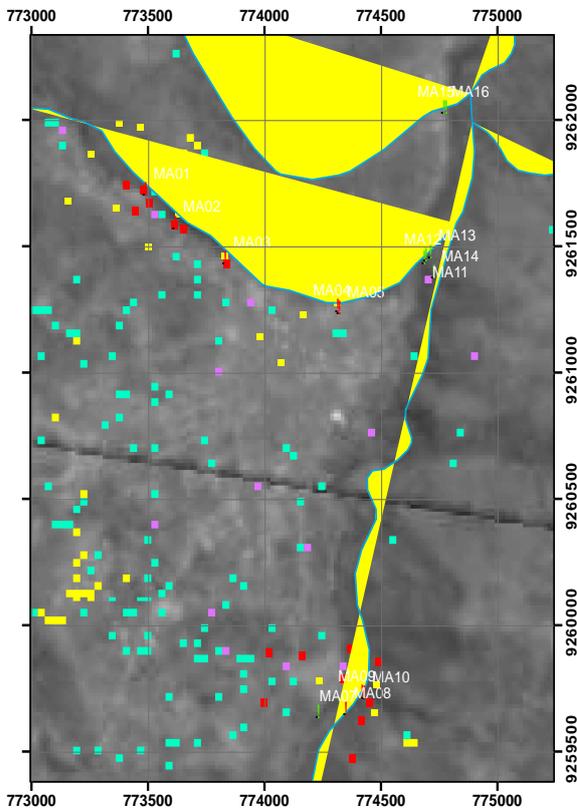


Figura 26: Ubicación de muestras de agua por clasificación de acidez.



Clase	pH
Acido	<6
Alcalino	>9 o 10
Casi-neutro	6 - 9 o 10
Otros	Irrelevante

Figura 28: Ubicación de muestras de agua MA1, MA2, MA3, MA4, MA5, MA7, MA8, MA9, MA10, MA11, MA12, MA13, MA14, MA15, MA16.

En la ubicación espacial de muestras de agua podemos observar que las muestras MA1, MA2, MA3, MA4, MA5, MA8, MA9, MA10, corresponden a muestras de carácter ácido y se encuentran ubicadas en zonas con gran aporte mineral, a diferencia de las muestras MA6, MA7 MA11, MA12, MA13, MA14, MA15, MA16 que poseen pH casi neutro y se encuentran ubicadas en zonas de bajo aporte mineral

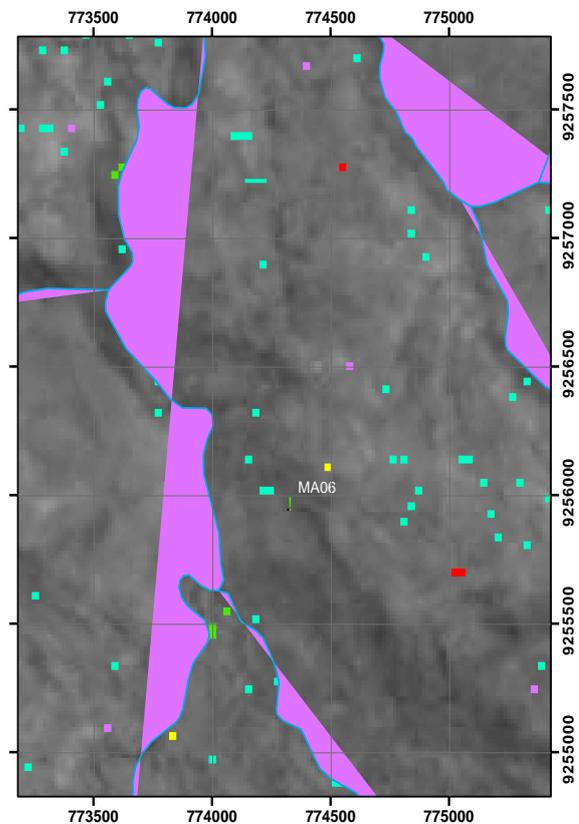


Figura 27: Ubicación de muestra de agua MA6.

Para corroborar los metales pesados en la zona de estudio se utilizó la información presentada por la Dirección General de Salud Ambiental en el estudio denominado: "Monitoreo de los ríos Llaucano, Maigasbamba y Hualgayoc.

En el cual se monitoreo fuentes de contaminación mediante el análisis de estaciones codificadas en la siguiente tabla, de las cuales se realiza la selección de los puntos que se encuentre dentro del distrito de Bambamarca

Tabla 11: Estaciones de monitoreo del rio Llaucano Maigasbamba y Hualgayoc (DIGESA, 2011).

Estación	Descripción
E0	SLL Laguna Las Pircas
E1	RTG-1 Rio Tingo
E2	RTG-2 Rio Tingo, puente carretera
E3	RTG-3 Rio Tingo, Bocamina
E4	QM-1 Quebrada La Eme
E5	RLL-1 Rio Llaucano
E6	RH-1 Rio Hualgayoc
E7	RH-2 Rio Hualgayoc
E8	RLL-2 Rio Llacucano - Puente Paccha
E9	RM-9 Rio Maygasbamba
E10	RTA-1 Rio Tambillo
E11	RLLCH Rio Llaucano Chota
E12	RLLCP Rio Llaucano - Centro Poblado De Llaucán
E13	RPOM Rio Pomagón, 150 m aguas arriba de la confluencia con el río Llaucano.

Se seleccionados los datos de las estaciones 5, 8, 9, 12, 13, ya que coinciden en la ubicación espacial del distrito de Bambamarca y se presenta el siguiente cuadro resumen en el cual se obtuvieron los siguientes resultados para aporte mineral de Hierro, Cobre y Zinc

Tabla 12: Resultados del análisis de metal pesado Hierro en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13 (DIGESA, 2011).

HIERRO Mg/L					
Mes	ESTACIÓN - CODIGO				
	E5 RLL-1	E8 RLL-2	E9 RM-9	E12 RLLCP	E13 RPOM
Ene-11					
Feb-11					
Mar-11	4.660	1.460	3.930	0.36	7.46
Abr-11					
May-11	3.470	4.550	13.400	0.094	0.107
Jun-11					
Jul-11					
Ago-11	2.890	5.080	0.271	0.038	0.14
Set-11					
Oct-11					
Nov-11	4.660	2.310	3.660	0.474	0.118
Dic-11					
ESTADÍSTICA	ESTACIÓN				
	E5	E8	E9	E12	E13
MEDIANA	4.065	3.430	3.795	0.227	0.129
MAXIMO	4.660	5.080	13.400	0.474	7.46
MINIMO	2.890	1.460	0.271	0.038	0.107
PERC 90	4.660	4.921	10.559	0.44	5.264
PROMEDIO	3.920	3.350	5.315	0.242	1.956
MUESTRA	4.000	4.000	4.000	4	4
DESV STD	0.887	1.740	5.641	0.209	3.669
RIESGO	ALTO	ALTO	ALTO	NING	MOD

Tabla 13: Resultados del análisis de metal pesado Zinc en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13. (DIGESA, 2011).

ZINC Mg/L					
Mes	ESTACIÓN - CODIGO				
	E5	E8	E9	E12	E13
	RLL-1	RLL-2	RM-9	RLLCP	RPOM
Ene-11					
Feb-11					
Mar-11	0.362	0.363	0.477	0.011	0.043
Abr-11					
May-11	1.170	0.012	1.370	0.011	0.011
Jun-11					
Jul-11					
Ago-11	1.420	0.022	0.042	0.011	0.011
Set-11					
Oct-11					
Nov-11	0.307	0.011	0.284	0.011	0.011
Dic-11					
ESTADÍSTICA	ESTACIÓN				
	E5	E8	E9	E12	E13
MEDIANA	0.766	0.6725	0.3805	0.011	0.011
MAXIMO	1.42	1.06	1.37	0.011	0.043
MINIMO	0.307	0.297	0.042	0.011	0.011
PERC 90	1.345	1.0369	1.1021	0.011	0.0334
PROMEDIO	0.8148	0.6755	0.5433	0.011	0.019
MUESTRA	4	4	4	4	4
DESV STD	0.564	0.402	0.579	0	0.016
RIESGO	NING	NING	NING	NING	NING

Tabla 14: Resultados del análisis de metal pesado Hierro en las estaciones 5, 8, 9, 12, 13 (DIGESA, 2011).

COBRE Mg/L					
Mes	ESTACIÓN - CODIGO				
	E5	E8	E9	E12	E13
	RLL-1	RLL-2	RM-9	RLLCP	RPOM
Ene-11					
Feb-11					
Mar-11	0.029	0.078	0.488	0.01	0.012
Abr-11					
May-11	0.068	0.226	0.990	0.01	0.01
Jun-11					
Jul-11					
Ago-11	0.062	0.041	0.010	0.01	0.01
Set-11					
Oct-11					
Nov-11	0.031	0.192	1670.000	0.01	0.01
Dic-11					
ESTADÍSTICA	ESTACIÓN				
	E5	E8	E9	E12	E13
MEDIANA	0.0465	0.135	0.739	0.01	0.01
MAXIMO	0.068	0.226	1.67	0.01	0.012
MINIMO	0.029	0.041	0.01	0.01	0.01
PERC 90	0.0662	0.2158	1.466	0.01	0.0114
PROMEDIO	0.0475	0.1353	0.7895	0.01	0.0105
MUESTRA	4	4	4	4	4
DESV STD	0.0204	0.0887	0.714	0	0.001
RIESGO	NING	MOD	ALTO	NING	NING

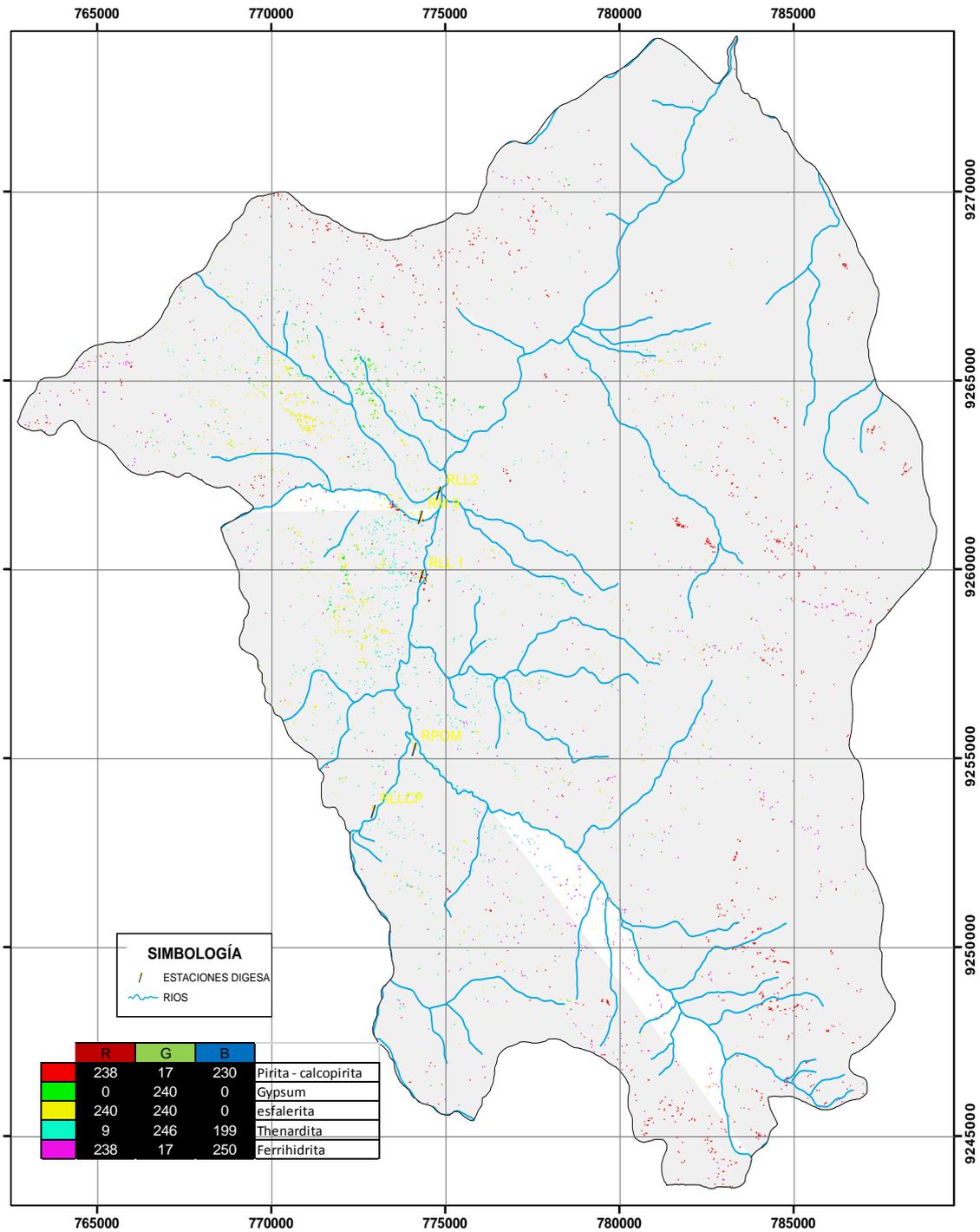


Figura 29: Ubicación de muestras de DIGESA por muestreo de metales pesados.

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN Y CONTRASTACIÓN

6.1 Discusión

A partir de los resultados obtenidos y a manera de discusión podemos verificar que mediante el uso de imágenes satelitales es posible la localización de minerales generadores de acidez y metales pesados, teniendo como principal fuente de información, la firma espectral de cada mineral para su ubicación en campo. Además, podemos confirmar que en la zona de Bambamarca existe gran aporte mineral en suelos y agua, lo cual genera la presencia de acidez y metales pesados, por lo cual por medio del muestreo se pudo corroborar que en zonas de abastecimiento ácido de sedimentos finos, siempre hay un aporte de acidez en agua, y en zonas con presencia de acidez siempre existe la disociación de metales pesados.

También se verifica que el mayor aporte de acidez es generado por la Pirita, Calcopirita y Esfalerita, ya que son minerales más inestables, y minerales como Ferrihidrita, thenardita, son minerales que representan un mayor aporte de metales pesados en condiciones de acidez.

El resultado será de gran ayuda para identificar los focos contaminantes y zonas a remediar, ya que en el distrito de Bambamarca se viene haciendo un monitoreo de salud por presencia de metales pesados en la sangre pobladores, así como muchas enfermedades generadas por la calidad del agua de consumo, es por ellos que este aporte será de gran utilidad para la localización de residuos ácidos y metales pesados que estén alterando la calidad de las aguas de escorrentía superficial y en consecuencia la calidad de vida de muchos pobladores

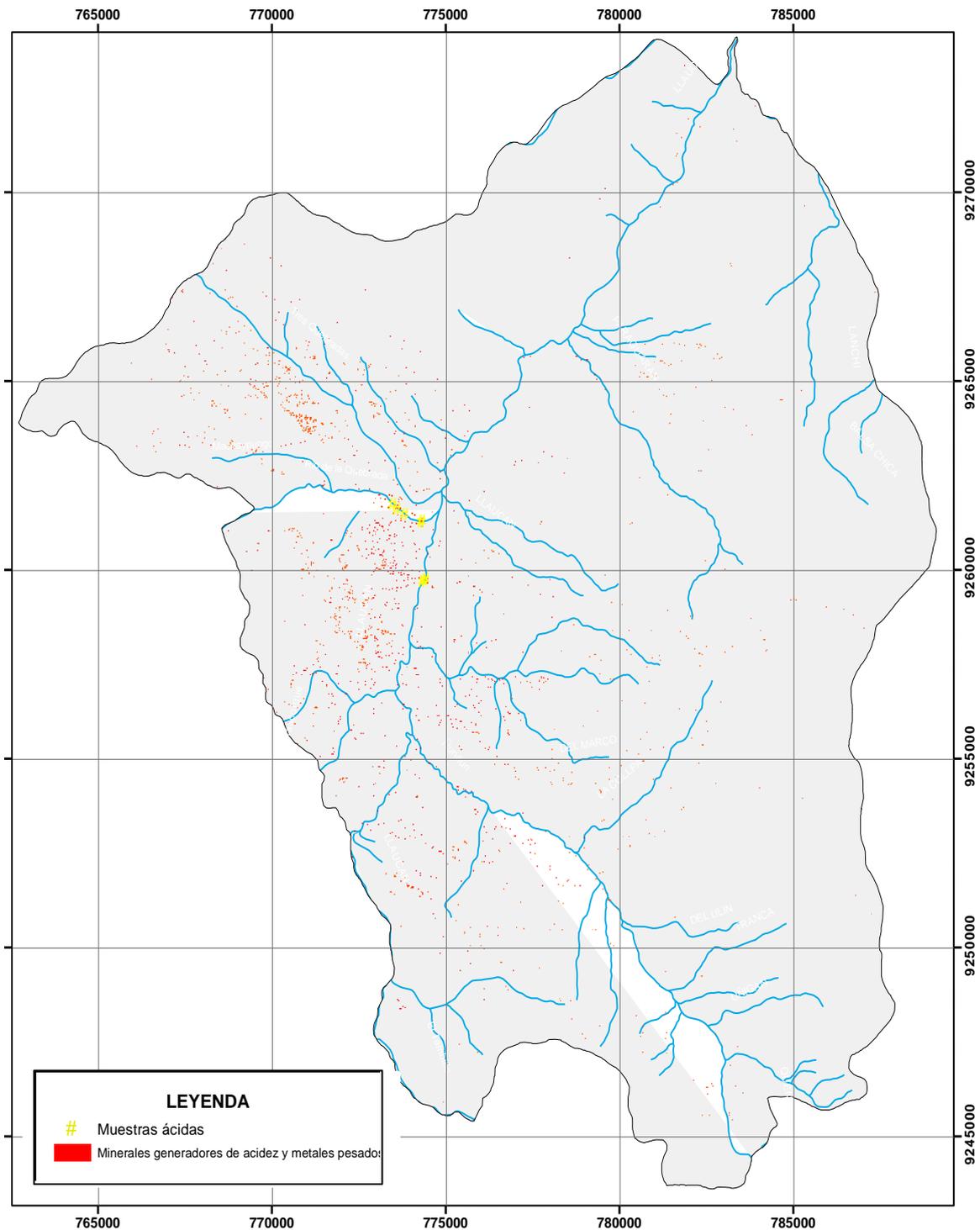


Figura 30: Principales zonas con presencia de minerales generadores de acidez, y corroboración en campo de acidez en agua y suelos.

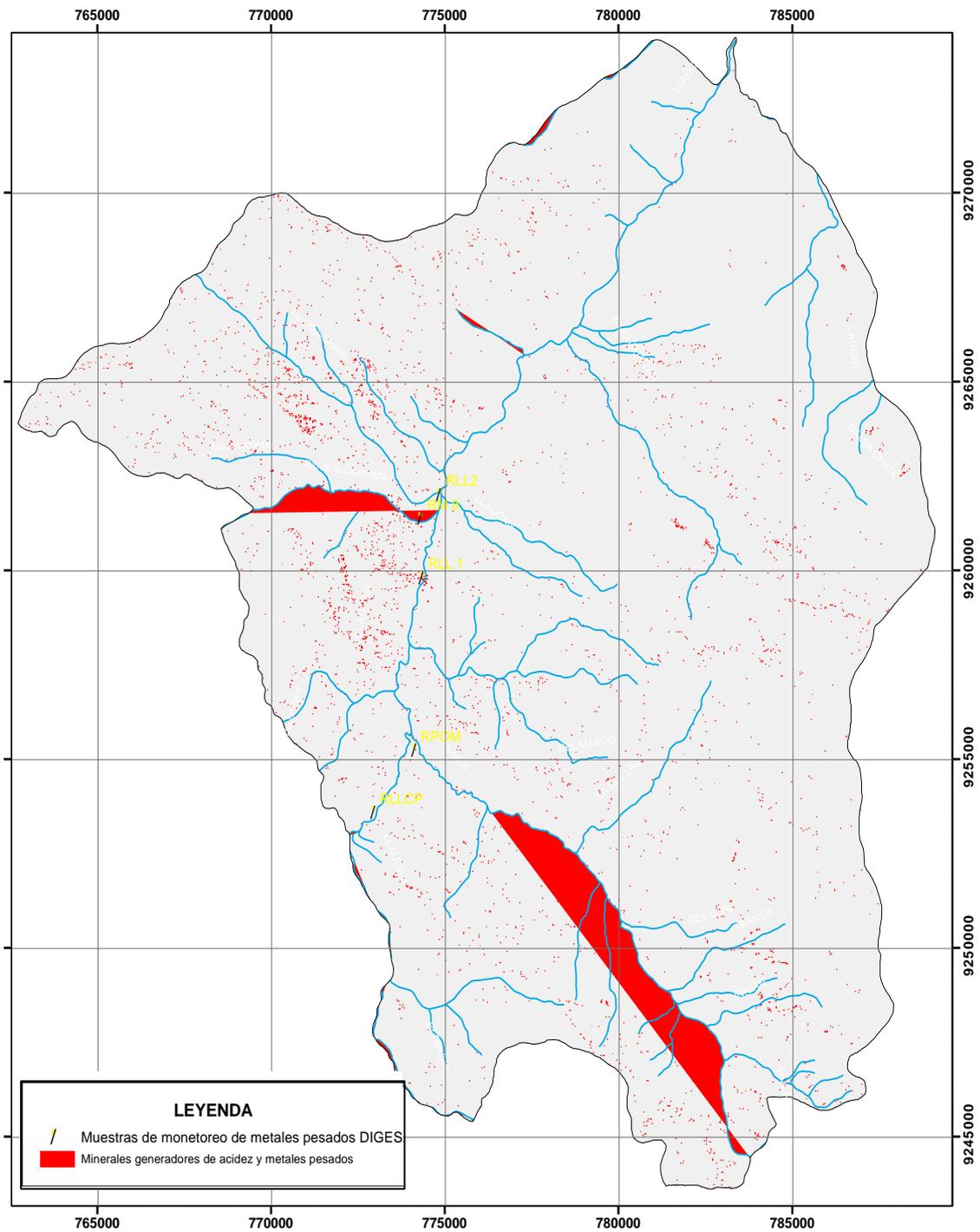


Figura 31: Principales zonas con presencia de minerales generadores de metales pesados, y corroboración con los puntos de monitoreo de DIGESA.

6.2 Contratación

Una vez realizada la discusión de resultados se confirma que mediante el uso de técnicas multiespectrales es posible ubicar focos contaminantes con características acidas y presencia de metales pesados en el distrito de Bambamarca, resultados corroborados con muestreo en campo que arrojaron la presencia de acidez efectiva en los focos contaminados de muestreo planificado y presencia de metales pesados corroborado con la información brindada por DIGESA en el estudio denominado "Monitoreo de los ríos Llaucano, Maygasbamba y Hualgayoc", además se pudo identificar que las muestras con mayor acidez y con presencia de metales pesados corresponden a zonas con mayor aporte mineral, y fueron identificadas por el método de análisis espectral.

CONCLUSIONES

- Se localizaron las principales zonas con presencia de minerales generadores de acidez y residuos con metales pesados mediante el uso de técnicas de análisis multiespectral, identificando la mayor cantidad de zonas con residuos contaminantes al Nor – Oeste del distrito de Bambamarca.
- Se identificaron minerales como Pirita, Calcopirita, esfalerita que corresponden a los minerales que generan mayor aporte de acidez por oxidación y minerales como Thenardita, y Ferrihidrita que son minerales que generan mayor aporte de metales pesados al realizarse su descomposición por cambios en pH y oxidación.
- Se realizó la comparación de firmas espectrales mediante el método de la envolvente, determinándose así minerales como Pirita, Calcopirita, Ferrihidrita, Thenardita y Gypsum
- Se contrastó la técnica espectral utilizada para la identificación de zonas con presencia de residuos ácidos y metales pesados, realizando un muestreo en campo la cual efectivamente corroboró que muestras con presencia de mayor acidez corresponden a zonas con mayor aporte mineral del tipo sulfuro y según muestras de DIGESA contrastadas corresponden a zonas con mayor aporte de minerales ricos en hierro.
- Se delimito las zonas con mayor aporte de acidez y aporte de metales pesados en plano, identificando los principales drenajes de afectación como son el rio Maygasbamba y Llaucano.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda trabajar en imágenes satelitales con características atmosféricas favorables para evitar la pérdida de información espectral.
- Se recomienda a las instituciones seguir con este tipo de investigaciones para profundizar y conocer más acerca de la teledetección.
- Se recomienda realizar muestreo en campo para minimizar el rango de error del resultado arrojado del análisis espectral.
- Se recomienda realizar siempre enmascaramiento antes de cualquier trabajo multiespectral para garantizar la extracción correcta de pixeles puros de información.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2006). Drenaje Acido De Mina Generación Y Tratamiento. Instituto Geológico y Minero de España. Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente. España
- Alpers CN, Blowes DW, Nordstrom DK, Jambor JL (1994) Secondary minerals and acid mine-water chemistry. In: Jambor JL, Blowes DW (eds) Environmental Geochemistry of Mine Wastes. Mineralogical Association of Canada Short Course Volume 22:247-270
- Duarte, V.M. (2013). Origen y distribución espacial de metales pesados en suelos de Zimapán, Hidalgo. Tesis de doctorado. Instituto de Enseñanzas e Investigación de Ciencias. 120 p.
- Jambor JL, Blowes DW (2009) Theory and application of mineralogy in environmental studies of sulfide-bearing mine wastes. In: Cabri LJ, Vaughan DJ (eds) Modern Approaches of Ore and Environmental Mineralogy. Mineralogical Association of Canada Short Course Volume 27: 367-401
- Sabins, F. (1978). Sensoramiento Remoto: Principios e Interpretación. (3aEd). Freeman.Oceanografía & ingeniería.
- 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].
- Vega, J. (2012). Nivel De Contaminación Por Metales Pesados En El Rio Toro, Distrito De Huamachuco De La Provincia Sánchez Carrión. Durante El Año 2009 – 2010. Tesis para optar el grado de maestro en gestión de riesgos ambientales. Universidad nacional de Trujillo. La Libertad. Perú.

ANEXOS

ANEXO 01

PROCEDIMIENTOS PARA LA TOMA DE PH EN SEDIMENTOS

Materiales

- Suelo seco tamizado malla N° 60
- Agua destilada
- Recipientes de 100 ml
- Balanza (de precisión de 0,1 g)
- Varilla de cristal o agitador
- pH-metro

En el Laboratorio

1. Mezclar en un vaso de precipitados 100 g de sedimento seco tamizado, con 100 ml de agua destilada. Para manipular el sedimento utilizar una cuchara u otro utensilio.
2. Remover bien la mezcla del sedimento/agua con una cuchara u otro utensilio. Remover la mezcla durante 30 segundos y dejar reposar tres minutos. Repetir este proceso cinco veces. Después dejar que la muestra vaya decantando hasta que se forme un sobrenadante (líquido claro sobre el suelo depositado), alrededor de cinco minutos.
3. Medir el pH del sobrenadante utilizando un pH-metro. Introducir el pH-metro en el sobrenadante. Registrar el valor de pH en la Hoja de Datos de pH del sedimento. Para calibrar el pH-metro se deberán utilizar guantes.

GLOBE, 2005

Plano 1: Plano topográfico - hidrológico.

Plano 2: Plano de minerales que generan acides y metales pesados.

Plano 3: Plano de contrastación de zonas ácidas vs muestras en campo.

Plano 4: Plano de contrastación de metales pesados vs DIGESA, 2011

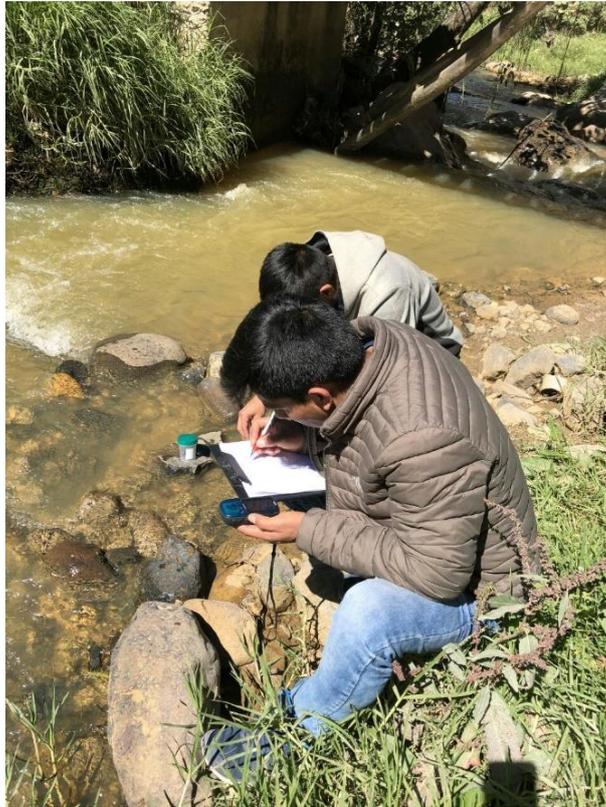


Foto 1: Toma de Muestra 01.



Foto 2: Toma de Muestra 02.

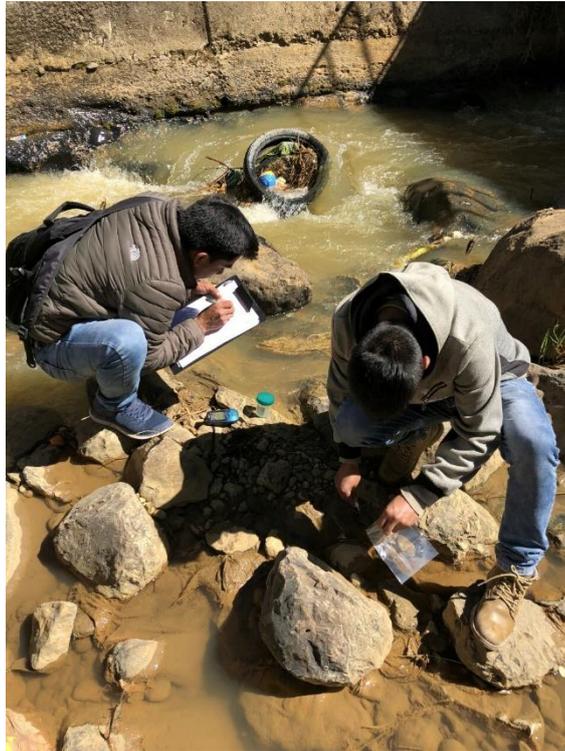


Foto 3: Toma de Muestra 03.



Foto 4: Toma de Muestra 05.



Foto 5: Toma de Muestra 05.



Foto 6: Toma de Muestra 07.

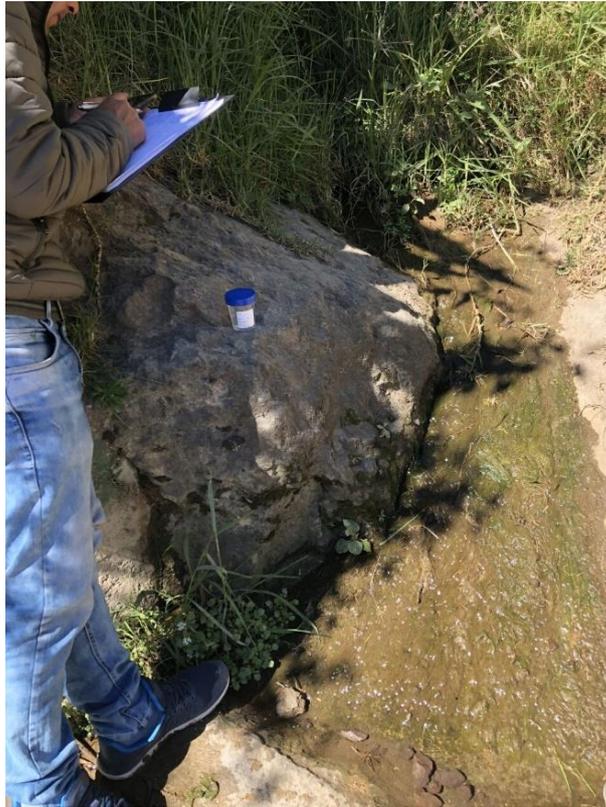


Foto 7: Toma de Muestra 08.



Foto 8: Toma de Muestra 11.



Foto 9: Toma de Muestra 11.

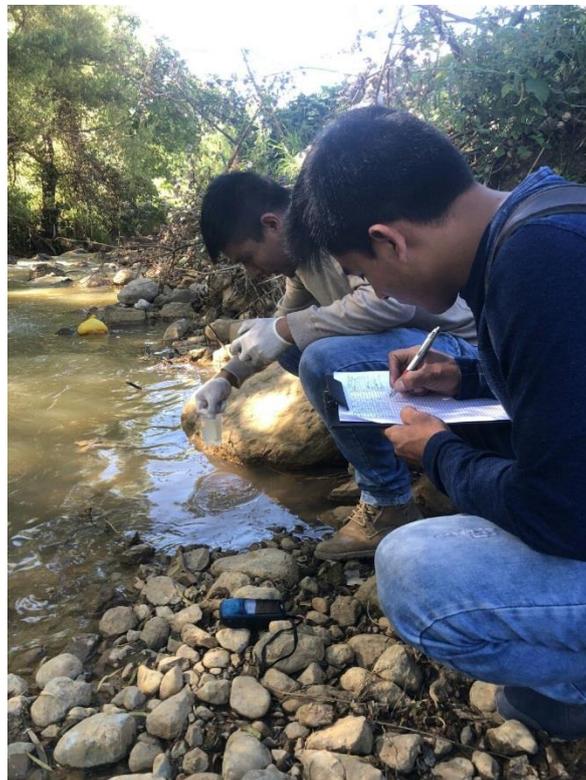


Foto 10: Toma de Muestra 12.



Foto 11: Toma de Muestra 13.



Foto 12: Toma de Muestra 14.



Foto 13: Toma de Muestra 15.

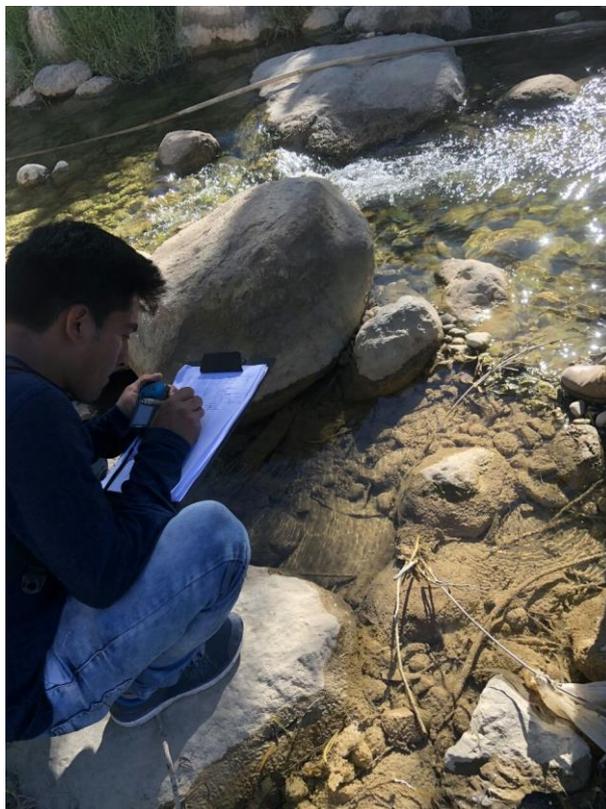


Foto 14: Toma de Muestra 16.