



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos

Johanna Andrea Montoya Cano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente
Medellín, Colombia
2015

Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos

Johanna Andrea Montoya Cano

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):

Verónica Catalina Botero Fernández, Ph.D.

Línea de Investigación:

Contaminación ambiental

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Geociencias y Medio Ambiente

Medellín, Colombia

2015

Agradecimientos

Agradezco a la Profesora Verónica Botero Fernández por su orientación en el desarrollo de esta investigación, a la Facultad de Minas y al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología - Colciencias por su apoyo económico a través del programa Jóvenes Investigadores e Innovadores, al Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia – CTA por su reconocimiento y apoyo económico a este trabajo y a la compañía Soluciones en Geología y Minería S.A.S. por su apoyo logístico en las actividades de campo.

Resumen

Los drenajes ácidos de mina (DAM) son uno de los grandes problemas ambientales que enfrenta hoy la industria minera, estos son producto de la oxidación de minerales sulfurosos, proceso que ocurre aún tras el cierre y abandono de las minas.

La problemática de los DAM ha suscitado en el mundo importantes investigaciones en torno a su identificación y es el análisis de la reflectancia espectral con el apoyo de muestreos de aguas y de sedimentos, la metodología más usada en países como Estados Unidos y España para su identificación y cartografía. En Colombia, sin embargo, hasta ahora no se han implementado metodologías que permitan la estimación de las fuentes hídricas con problemas de acidez generados por la extracción mineral.

En el marco de este trabajo se analizó el pH, la composición mineralógica y la reflectancia espectral de los sedimentos en una zona de minería aurífera en el distrito minero Vetas California en Santander, Colombia, con el propósito de determinar la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH y con base en ello identificar en imágenes de satélite las áreas afectadas por drenajes ácidos.

De acuerdo con los resultados, en los drenajes de mina precipitan óxidos de hierro, cada uno asociado a condiciones específicas de pH, cuyo comportamiento espectral está relacionado con el de los sedimentos analizados. Los sedimentos de pH ácido presentan una mayor reflectancia que los sedimentos de pH neutro a alcalino en el intervalo espectral de 375 a 935 nm y gracias a estas diferencias en la reflectancia fue posible, usando imágenes satelitales, separar los sedimentos de acuerdo con su pH y entonces de forma indirecta identificar los drenajes con problemas de acidez en el área de estudio.

Palabras clave: minería aurífera, drenajes ácidos de mina, pH, óxidos de hierro, reflectancia espectral.

Abstract

The acid mine drainage (AMD) is one of the major environmental problems that the mining industry is currently facing; these are product of the oxidation of sulfide minerals, a process that occurs even after the closure and abandonment of mines.

The issue of AMD has generated important research about its identification around the world. The analysis of spectral reflectance supported by sampling water and sediments is the method most used in countries like The United States and Spain for identification and mapping of AMD. In Colombia, however, they have not implemented methodologies to estimate water sources with acidity problems generated by mineral extraction.

This research analyzed the pH, the mineralogical composition and the spectral reflectance of the sediments in the gold mining area in the Vetas California Mining District in Santander, Colombia, in order to determine the typical spectral signature for the type of sediment associated with each pH range and on that basis identify, in satellite imaging, areas affected by acid drainage.

According to the results, in mine drainage iron oxides precipitates, each oxide is associated with specific conditions of pH and whose spectral behavior is related to the behavior of sediments analyzed. Sediments with acidic pH exhibit greater spectral reflectance than sediments with neutral to alkaline pH in the spectral range of 375 to 935 nm. These differences in the reflectance made possible, using satellite imaging, to separate sediments according to their pH and to indirectly identify drainages with acidity problems in the study area.

Keywords: gold mining, acid mine drainage, pH, iron oxides, spectral reflectance

Contenido

	Pág.
Lista de figuras	VIII
Lista de tablas	X
Lista de fotografías	XI
1. Antecedentes	16
1.1 Minería en Colombia	16
1.2 Identificación de los DAM	19
2. Marco teórico	22
2.1 Generación de DAM	22
2.2 Los sensores remotos en la identificación de DAM	24
3. Metodología.....	27
3.1 Área de estudio	27
3.1.1 Geología.....	28
3.1.2 Actividad minera	29
3.1.3 DAM	32
3.2 Muestreo de sedimentos activos	32
3.3 Medición del pH de los sedimentos	34
3.4 Análisis de la composición mineralógica de los sedimentos	35
3.4.1 Preparación de las muestras	35
3.4.2 Difracción de rayos X.....	35
3.5 Análisis de la reflectancia espectral de los sedimentos	37
3.6 Correlación de datos	38
3.7 Tratamiento digital de las imágenes de satélite	38
4. Resultados y análisis.....	41
4.1 pH de las muestras de sedimento	41
4.2 Mineralogía de las muestras de sedimento	43
4.3 Reflectancia espectral de las muestras de sedimento	44
4.4 Correlación de los datos.....	46
4.4.1 pH y composición mineralógica	46
4.4.2 pH y reflectancia espectral.....	47
4.4.3 Mineralogía y reflectancia espectral.....	51
4.4.4 Firma espectral típica de los sedimentos según su pH	52
4.5 Identificación de DAM usando imágenes de satélite.....	53
4.5.1 Imágenes Landsat	53

4.5.2	Imágenes Aviris.....	54
4.5.3	Tratamiento digital de las imágenes de satélite.....	56
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	63
5.1	Conclusiones.....	63
5.2	Recomendaciones.....	64
A.	Anexo: firmas espectrales de las muestras de sedimento.....	66
6.	Bibliografía	77

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1. Localización del área de estudio	27
Figura 3-2. Geología del área de estudio (2001)	28
Figura 3-3. Localización de los centros de actividad minera en la región	29
Figura 4-1. pH de las muestras de sedimento	42
Figura 4-2. Reflectancia de la muestra M01 antes (izquierda) y después (derecha) de la corrección de valores atípicos	44
Figura 4-3. Reflectancia del blanco, del negro y de la muestra M01	45
Figura 4-4. Mineralogía y pH	47
Figura 4-5. Localización de los valores a_1	49
Figura 4-6. Localización de los valores a_2	49
Figura 4-7. Correlación de a_1 (izquierda) y a_2 (derecha) con el pH	51
Figura 4-8. Firmas espectrales de los óxidos de hierro identificados en las muestras de sedimento	51
Figura 4-9. Firmas espectral típica de los sedimentos según su pH	52
Figura 4-10. Firma espectral típica de los sedimentos en las imágenes Landsat.....	53
Figura 4-11. Clasificación de imagen Landsat del área de estudio	59
Figura 4-12. Clasificación de imagen Landsat del municipio de Remedios Antioquia	.60
Figura A- 1. Firma espectral de la muestra M01	66
Figura A- 2. Firma espectral de la muestra M02.....	66
Figura A- 3. Firma espectral de la muestra M03.....	67
Figura A- 4. Firma espectral de la muestra M04.....	67
Figura A- 5. Firma espectral de la muestra M05.....	67
Figura A- 6. Firma espectral de la muestra M06.....	68
Figura A- 7. Firma espectral de la muestra M07.....	68
Figura A- 8. Firma espectral de la muestra M08.....	68
Figura A- 9. Firma espectral de la muestra M09.....	69

Figura A- 10. Firma espectral de la muestra M10	69
Figura A- 11. Firma espectral de la muestra M11	69
Figura A- 12. Firma espectral de la muestra M12	70
Figura A- 13. Firma espectral de la muestra M13	70
Figura A- 14. Firma espectral de la muestra M14	70
Figura A- 15. Firma espectral de la muestra M15	71
Figura A- 16. Firma espectral de la muestra M16	71
Figura A- 17. Firma espectral de la muestra M17	71
Figura A- 18. Firma espectral de la muestra M18	72
Figura A- 19. Firma espectral de la muestra M19	72
Figura A- 20. Firma espectral de la muestra M20	72
Figura A- 21. Firma espectral de la muestra M21	73
Figura A- 22. Firma espectral de la muestra M22	73
Figura A- 23. Firma espectral de la muestra M23	73
Figura A- 24. Firma espectral de la muestra M24	74
Figura A- 25. Firma espectral de la muestra M25	74
Figura A- 26. Firma espectral de la muestra M26	74
Figura A- 27. Firma espectral de la muestra M27	75
Figura A- 28. Firma espectral de la muestra M28	75

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3.1. Clasificación del pH de los suelos.....	34
Tabla 4.1. pH de las muestras de sedimento.....	41
Tabla 4.2. Composición mineral de las muestras de sedimento	43
Tabla 4.3. a_1 y a_2 de la curva espectral de cada muestra de sedimento	48
Tabla 4.4. a_1 y a_2 de la curva espectral de cada muestra de sedimento en las imágenes Aviris.....	54
Tabla 4.5. Coeficiente de correlación entre la reflectancia en las bandas Landsat y el pH	57
Tabla 4.6. Números digitales en la banda 3 Landsat para los píxeles asociados a cada categoría de pH	57
Tabla 4.7. Clasificación del pH de las muestras de validación	59

Lista de fotografías

	Pág.
Fotografía 3-1 Planta de trituración en la margen derecha de la quebrada La Baja.....	30
Fotografía 3-2 Piscinas de sedimentación a orillas de la quebrada La Baja	31
Fotografía 3-3 Acumulación de material lixiviado a orillas de la quebrada La Baja	31
Fotografía 3-4 Bocamina a 20 m del canal de la quebrada La Baja.....	31
Fotografía 3-5 Centros de actividad minera en la parte alta de la quebrada La Baja	32

Introducción

El sector minero-energético ha sido durante años, uno de los sectores propuestos en los planes de desarrollo para liderar el crecimiento y la generación de empleo en el país; y ha tenido que enfrentarse a los pasivos ambientales que genera la actividad extractiva, entre los que se cuentan los drenajes ácidos de mina (DAM) (Peña Ortiz y Pérez Vega 2009), (Martínez Londoño 2010), (Díaz Álvarez 2013).

Los DAM son producto de la oxidación de minerales sulfurosos y la lixiviación de los metales asociados, procesos que ocurren aún tras el cierre y abandono de las minas (Hoffert 1947), (Walsworth y King 1999), (Blowes, y otros 2003), (Akcil & Koldas, 2004).

Grandes cantidades de minerales sulfurosos acompañan minerales de interés económico como el carbón y el oro, el cobre, el níquel y otros metales, razón por la cual se encuentran en altas proporciones en los desechos de mina. Los minerales sulfurosos se oxidan al entrar en contacto con el aire o el agua y bajan el pH del medio y estas aguas ácidas pueden disolver metales (Ferrier, Hudson y Pope 2009).

Los DAM se caracterizan por un bajo pH y una alta concentración de metales pesados y otros elementos tóxicos, pueden ser superficiales o subterráneos, contaminan los suelos gravemente y son tóxicos para la mayoría de las formas de vegetación (Wu, y otros 2005), (Walsworth y King 1999).

El pH de la mayoría de fuentes de agua natural fluctúa entre 6.5 y 8.5 unidades de pH, pero cuando las aguas residuales provenientes de actividades mineras drenan a estos cuerpos, el pH se reduce de forma considerable. El pH es un criterio importante de la calidad del agua, porque limita la posibilidad de vida acuática y muchos de los usos del agua (DANE 2005).

La problemática de los DAM ha suscitado en el mundo importantes investigaciones en torno a su identificación y es el análisis de la reflectancia espectral con el apoyo de muestreos de aguas y de sedimentos, la metodología más usada en países como Estados Unidos y España para su identificación y cartografía, mostrando así la utilidad de los sensores remotos en la caracterización de la superficie terrestre (Williams, et al. 2002), (Sares, y otros 2004), (Hauff, y otros 2005), (Montero, y otros 2005), (Velasco, y otros 2005), (Riaza, Ong y Müller, Pyrite mine wastes hyperspectral monitoring as a tool to detect climate change. 2007), (Ferrier, Hudson y Pope 2009), (Riaza, Buzzi, y otros 2011).

A pesar de ser Colombia un país de tradición minera, hasta ahora no se han implementado metodologías que permitan la estimación de las fuentes hídricas con problemas de acidez generados por la extracción mineral. Una cartografía precisa de los DAM y de las áreas afectadas permitiría orientar de forma adecuada los planes de remediación, contribuyendo así con el desarrollo ambiental que busca asegurar la calidad de vida y el bienestar social de la población a través del control de la contaminación en el territorio.

En el marco de este trabajo se analizó el pH, la composición mineralógica y la reflectancia espectral de los sedimentos en una zona de minería aurífera en el distrito minero Vetas California en el departamento de Santander, con el propósito de definir la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH y con base en ello identificar los drenajes ácidos de mina usando imágenes de satélite.

Objetivos

Se estableció el siguiente objetivo general:

- *Identificar los drenajes con problemas de acidez en una zona del distrito minero Vetas California en Santander, Colombia.*

Se establecieron 5 objetivos específicos:

- *Determinar los niveles de acidez de los sedimentos*
- *Analizar la composición mineralógica de los sedimentos*

- *Analizar la reflectancia espectral de los sedimentos*
- *Determinar la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH*
- *Identificar, usando imágenes de satélite, las zonas afectadas por drenajes ácidos de mina en el área de interés.*

1. Antecedentes

1.1 Minería en Colombia

La extracción de recursos minerales es una actividad industrial que genera graves impactos sobre el medio ambiente, sin embargo, mediante la aplicación de un esquema de planeación que incluya el uso de alternativas tecnológicas puede ser considerada como una actividad industrial tendiente hacia la sostenibilidad (Contraloría General de la República 2012).

La minería ha ganado participación dentro de la actividad económica colombiana durante los últimos 35 años (Escobar y Martínez 2012). La actividad minera del país está regulada por el Código de Minas (Congreso de Colombia 2001), previo requerimiento de la Ley 99 de 1993 que establece que para el desarrollo de un proyecto minero en Colombia se debe obtener una licencia ambiental, cuya aprobación está sujeta a la elaboración de un estudio de impacto ambiental que contenga las medidas de prevención, mitigación, corrección y compensación de los impactos negativos que pueda ocasionar el proyecto en el medio ambiente (Congreso de Colombia 1993).

En el Código de Minas se dan las pautas para llevar a cabo los planes de cierre de las minas, para que el titular de la actividad minera rehabilite las áreas que utilizó. Sin embargo, existen zonas donde se han cerrado o abandonado minas sin el control efectivo, estos sitios abandonados permanecen como focos de contaminación, provocando graves daños ambientales (Arango y Olaya 2012).

- **Normatividad colombiana en el manejo de los DAM**

A continuación, se muestra la normatividad colombiana en torno a la regulación de la contaminación por DAM.

Norma de vertimientos

El 17 de marzo de 2015, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presentó una nueva norma de vertimientos, la cual reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984. En el artículo 10 de esta ley se establecen los parámetros físico-químicos a monitorear y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales, provenientes de actividades mineras, a cuerpos de aguas superficiales. Allí se reglamenta que el pH de las descargas mineras debe estar entre 6 y 9 unidades (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2015).

Prevención y remediación de los DAM - Código de Minas (Ley 685 de 2001)

El Código de Minas ordena crear y adoptar la guía minero-ambiental para adelantar la gestión técnica de los proyectos (Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Medio Ambiente 2014).

Para evitar la generación de DAM, según la guía minero-ambiental, se debe tener un manejo especial de las aguas residuales de minería, de acuerdo con las siguientes medidas:

- Caracterizar el yacimiento y los componentes de los estériles para prever la posible generación de DAM.
- Los sitios de entrada de agua, bocaminas y bocavientos, activos y abandonados, grietas por subsidencia, aguas lluvias y aguas de escorrentía, corrientes superficiales y subsuperficiales, deben ser considerados como canales de acceso del agua a los frentes de trabajo y como mecanismos de transporte de partículas en suspensión de metales pesados, azufre disuelto y algunos iones metálicos en solución.
- Los drenajes mineros se deben evacuar preferiblemente por bombeo u algún otro método que minimice el arrastre de sedimentos.

- El sitio de escombros y estériles debe contar con un sistema de recolección y tratamiento de las aguas de escorrentía que hayan entrado en contacto con ellos, antes de ser vertidas a un cuerpo de agua o de infiltrarlas en el suelo.
- Las aguas de escorrentía que hayan transitado sobre materiales estériles, apilamientos de mineral, y las provenientes de los drenajes mineros deben ser interceptadas y conducidas a sistemas de tratamiento mediante canales hechos en tierra o impermeabilizados.
- Los yacimientos que contienen materiales reactivos, que favorecen la formación de DAM se deben cubrir por medio de coberturas o sellos de baja permeabilidad, como suelos de textura fina, arcillas o limos, y materiales sintéticos, de polietileno o neopreno.

Por otra parte, en esta guía se explica que, para la remediación de los DAM, es necesario aplicar una técnica de neutralización y la más utilizada, por su bajo costo y alta eficiencia, es la adición de cal. Este proceso de neutralización consta de cinco etapas de tratamiento: homogeneización, mezcla, aireación, sedimentación y disposición final del lodo de desecho. El requerimiento de cal es menor a 0.1 kg/1000l, para minas con drenajes con pH entre 3.5 y 5.0.

Para el tratamiento de los sólidos en suspensión, se proponen sedimentadores a gravedad tales como pozos, tanques o lagunas. El tratamiento de los sólidos disueltos y la estabilización del pH, se logra mediante la aireación del drenaje minero para favorecer la oxidación, haciendo correr el agua a través de las pendientes en cascadas artificiales, con lechos de roca caliza de diferentes tamaños.

El sistema de tratamiento y el vertedero final deben estar localizados dentro de la propiedad minera, además es necesario hacer el mantenimiento de estos sistemas de tratamiento, mensualmente debe revisarse que el sistema no presente fugas o infiltraciones y semestralmente se deben retirar los sedimentos de las pocetas de neutralización y sedimentadores.

1.2 Identificación de los DAM

Durante los últimos años en numerosos estudios se han usado con éxito metodologías que incluyen el uso de sensores remotos para la identificación de los DAM.

En el control de la extensión de la contaminación por DAM en la Faja Pirítica Ibérica al Suroccidente de España, se utilizaron imágenes hiperespectrales. La Faja Pirítica Ibérica es un gran afloramiento que alberga depósitos de sulfuros masivos que han sido explotados para uso industrial desde hace más de 5,000 años, generando problemas significativos de acidez. El monitoreo geoquímico de las aguas y de los sedimentos fluviales junto con la interpretación de espectros de campo y de laboratorio dieron lugar a la generación de un mapa de productos de oxidación de pirita del sitio que finalmente sirvió para identificar el pH de cada zona (Riaza, Buzzi, y otros 2011).

La caracterización del impacto ambiental de la mina de oro epitermal Rodalquilar en España se hizo con el uso de la espectroscopía de reflectancia, demostrando el éxito de los espectrómetros de campo en la cartografía de los desechos mineros. Se encontraron fuertes relaciones entre los espectros y las mediciones químicas de laboratorio que permitieron identificar zonas minerales correlacionables con el pH (Ferrier, Hudson y Pope 2009).

Utilizando geoquímica combinada, espectroscopia de campo y teledetección hiperespectral también se ha logrado cartografiar la contaminación por metales pesados en sedimentos fluviales. Los metales pesados presentan espectralmente rasgos distintivos en el visible y en el infrarrojo cercano del espectro electromagnético. Además, las firmas espectrales de los minerales que se unen a los metales pesados se pueden utilizar para la detección indirecta y mapeo de la dispersión de estos metales (Choe, y otros 2008).

En una región de explotación de antracita en Pensilvania Estados Unidos se desarrolló una investigación que muestra la utilidad de las imágenes espectrales para clasificar con precisión los drenajes afectados por el ácido versus los drenajes neutros a alcalinos de las minas (Williams, et al. 2002).

Para la evaluación del impacto por DAM en las cuencas de Colorado en Estados Unidos, se usaron imágenes hiperespectrales. Se tomaron muestras que fueron analizadas con un espectrómetro de infrarrojos de campo y se midió el contenido de metales, además se midió el pH, la conductividad, la alcalinidad, la acidez total, la concentración de iones y los sólidos suspendidos totales en el agua y finalmente todos estos datos fueron integrados con las imágenes (Hauff, y otros 2005).

Son numerosos los estudios que confirman la aplicación de la espectroscopia de imágenes en la identificación de los DAM. Montero et al. (2005) evaluaron el potencial de DAM de las minas abandonadas mediante la caracterización de las rocas asociadas a los desechos de mina, Sares et al. (2004) determinaron indirectamente el pH de una corriente afectada por DAM a través de la identificación de minerales de hierro precipitados en el lecho del río y Wu et al. (2005) y Kemper & Sommer (2002) estimaron las concentraciones de metales pesados en los suelos utilizando espectroscopia de reflectancia y modelos de predicción estadística.

Incluso el monitoreo hiperespectral de los desechos de mina se ha utilizado como herramienta para detectar el cambio climático, dado que la oxidación y la evaporación de los sulfuros son procesos controlados por la temperatura y la humedad. Así, al ser el clima el factor de control del crecimiento y la solución de sales de pirita y otros sulfuros metálicos de los desechos de mina, los datos hiperespectrales pueden usarse para la estimación de cambios en la disponibilidad de la humedad ambiental y la tasa de evaporación (Riaza, Ong y Müller 2007).

De acuerdo con estas investigaciones, los sistemas multiespectrales son útiles en la identificación y en el mapeo de la mineralogía y ayudan a definir el pH de los drenajes asociados a minas, pero están limitados en su precisión debido a la falta de bandas espectrales numerosas y continuas; sin embargo avanzadas tecnologías de teledetección como los espectrómetros de imágenes hiperespectrales permiten la identificación mineralógica precisa y asimismo una mejor estimación de la calidad del agua.

2. Marco teórico

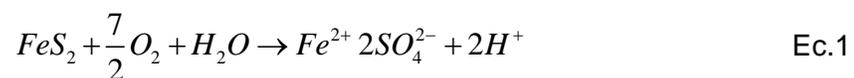
2.1 Generación de DAM

Los DAM se producen cuando los sulfuros que hacen parte del material estéril quedan expuestos al aire y al agua. A pesar de que este proceso se produce naturalmente, la minería puede promover la generación de DAM a través del aumento de la cantidad de sulfuros expuestos y el mal manejo de los relaves (Dold 2003).

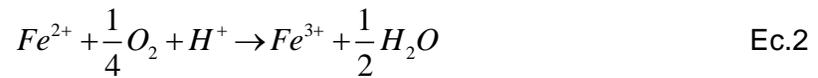
La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido. Así los DAM pueden neutralizarse por contacto con minerales consumidores de ácido y tener aguas con un pH neutro y una acidez insignificante a pesar de la continua oxidación de sulfuro; sin embargo, con el tiempo, el pH baja porque se agotan los minerales consumidores de ácido (Akcil y Koldas 2006). La composición mineralógica del material y la accesibilidad de los sulfuros a la oxidación son parámetros controladores en la generación de DAM (Dold 2003).

Las reacciones de generación de ácido son bien ilustradas mediante la oxidación de la pirita (FeS_2), que es el sulfuro más abundante y el que produce la mayor cantidad de acidez. Sin embargo, otros sulfuros también producen acidez, por ejemplo, calcopirita, arsenopirita, entre otros (Dold 2003).

La primera reacción importante es la oxidación de la pirita con el oxígeno atmosférico disponible, liberando un mol de hierro ferroso, dos de sulfato y dos de protones, Ec.1.



El H^+ representa un aumento en la acidez del agua, introduciendo una disminución en el pH. Si el ambiente circundante es suficientemente oxidante, gran parte de hierro ferroso se oxida a hierro férrico, de acuerdo con la Ec.2.



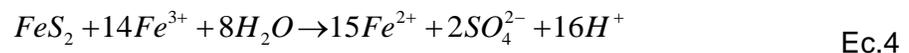
Como se observa en la Ec.2, la oxidación del ferroso a férrico es un proceso que consume (neutraliza) un mol de protones.

Generalmente, el hierro férrico producido se hidroliza precipitando como hidróxido férrico y liberando tres moles de protones (ver Ec.3).



Así se tiene que en el desarrollo de estos procesos se producen 4 moles de H^+ por mol de pirita oxidada (dos moles en la oxidación de la pirita menos un mol en la oxidación del ferroso al férrico más tres moles en la hidrólisis del férrico).

Parte de hierro férrico no precipita y puede ser usado para oxidar la pirita adicional, de acuerdo con la Ec.4.



Debe tenerse en cuenta que para la producción de los 14 moles de férrico necesarios en la reacción (4) debieron neutralizarse 14 moles de protones, esto significa que efectivamente se producen dos moles de protones en la oxidación de pirita vía férrico.

Cuando el férrico no está involucrado en la oxidación de sulfuros, precipita en forma de minerales secundarios como jarosita, schwermannita, ferrihidrita o goethita según las condiciones geoquímicas y la presencia de elementos necesarios para su formación, en

esta precipitación los minerales secundarios liberan cantidades de protones aportando más ácido al sistema (Dold 2003).

Algunos de estos minerales secundarios son metaestables y se transforman en fases más estables como la goethita liberando protones (Dold 2003).

2.2 Los sensores remotos en la identificación de DAM

Durante los últimos años, los sensores remotos han sido ampliamente utilizados en países como Estados Unidos y España para mapear los relaves a partir de las características de reflectancia de los minerales (Williams, et al. 2002), (Sares, y otros 2004), (Hauff, y otros 2005), (Montero, y otros 2005), (Velasco, y otros 2005), (Riaza, Ong y Müller 2007), (Ferrier, Hudson y Pope 2009), (Riaza, Buzzi, y otros 2011).

Los sensores remotos están diseñados para capturar imágenes en determinados rangos de longitudes de onda del espectro electromagnético, denominados bandas o canales. Estas imágenes son la representación de la energía reflejada por los diferentes objetos en cada banda (ITC 2008).

Las imágenes de satélite tienen resolución espacial y espectral. La resolución espacial se refiere al área mínima que es posible discriminar en una imagen y está dada por el tamaño de pixel y la resolución espectral se refiere al número y al ancho de los canales. De acuerdo con la resolución espectral se tienen imágenes multiespectrales o hiperespectrales, las multiespectrales cuentan con un número no muy elevado de bandas y las hiperespectrales registran información en cientos de bandas muy estrechas, así dos objetos pueden presentar la misma reflectancia en una imagen multiespectral pero podrían ser discriminados usando las bandas de una imagen hiperespectral (ITC 2008).

Diferentes estudios han demostrado que existe una relación entre la geoquímica y la mineralogía de los precipitados de los drenajes de mina (Williams, et al. 2002). Cada uno de los minerales secundarios de hierro que normalmente precipitan en los drenajes ácidos (schwermannita, ferrihidrita, goethita) se forman bajo condiciones de pH específicas y gracias a los avances en la resolución espectral de los sensores remotos,

es posible identificar estos minerales y así clasificar los drenajes afectados por el ácido versus los drenajes de mina neutros a alcalinos.

Indicadores espectrales pueden ser monitoreados en forma regular a través del procesamiento de imágenes, con el apoyo de campo y datos espectrales de laboratorio. De hecho, el análisis de imágenes hiperespectrales es uno de los métodos seleccionados por el Centro Común de Investigación de la Comunidad Europea (Ispra, Italia) para estudiar minas abandonadas en el marco de la gestión de los residuos de industrias extractivas (Riaza, Buzzi, y otros 2011).

Por otra parte, el ácido y los metales pesados asociados a los DAM son tóxicos para la mayoría de las formas de la vegetación, generando fenómenos como estrés y morbilidad, mortandad e invasión y finalmente cambios en la erosión superficial, que pueden ser controlados por una variedad de métodos de teledetección (Walsworth y King 1999).

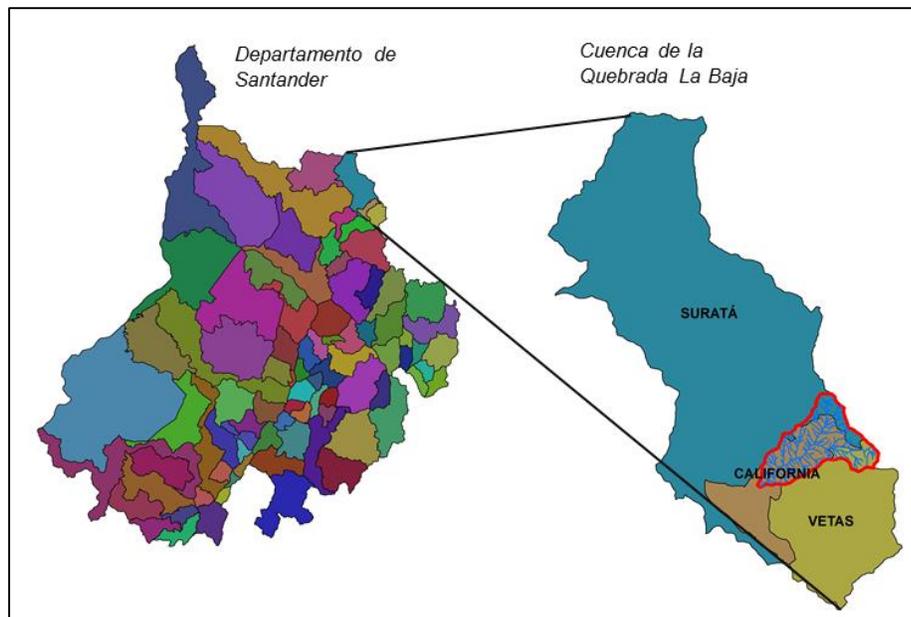
3. Metodología

En este capítulo se explica la metodología que se empleó para determinar la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH y con base en ello identificar, usando imágenes de satélite, los drenajes con problemas de acidez en una zona de minería aurífera en el distrito minero Vetás-California.

3.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca de la quebrada La Baja, ubicada al Noreste del departamento de Santander, en jurisdicción de los municipios de California, Suratá y Vetás. Esta cuenca tiene un área de aproximadamente 3,500 ha, sin embargo, la mayor parte del área de la cuenca está dentro del municipio de California. Ver **Figura 3-1**.

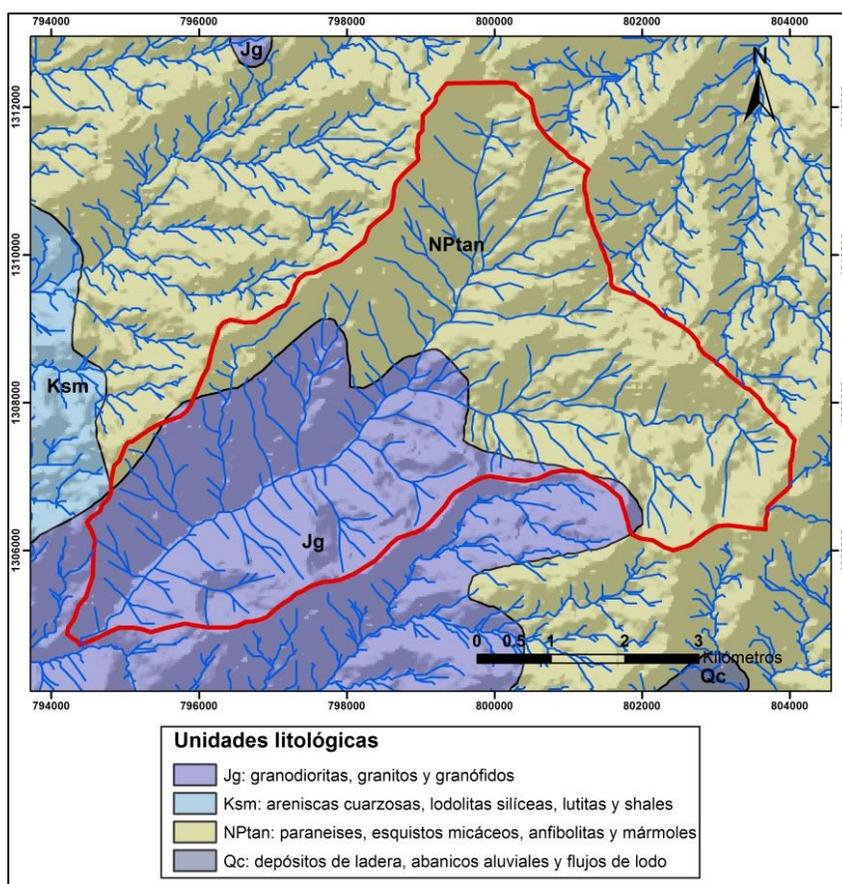
Figura 3-1. Localización del área de estudio



3.1.1 Geología

En el distrito minero Vetas California afloran rocas metamórficas como paraneises, esquistos micáceos, anfibolitas y cuarcitas; afloran también granodioritas, granitos y granófidios y se tienen además rocas sedimentarias que incluyen areniscas cuarzosas, lodolitas silíceas, lutitas y shales. En esta zona se tienen también depósitos recientes de ladera, abanicos aluviales y flujos de lodo (Servicio Geológico Colombiano 2001). En la **Figura 3-2** se muestra la geología del área de estudio.

Figura 3-2. Geología del área de estudio (2001)



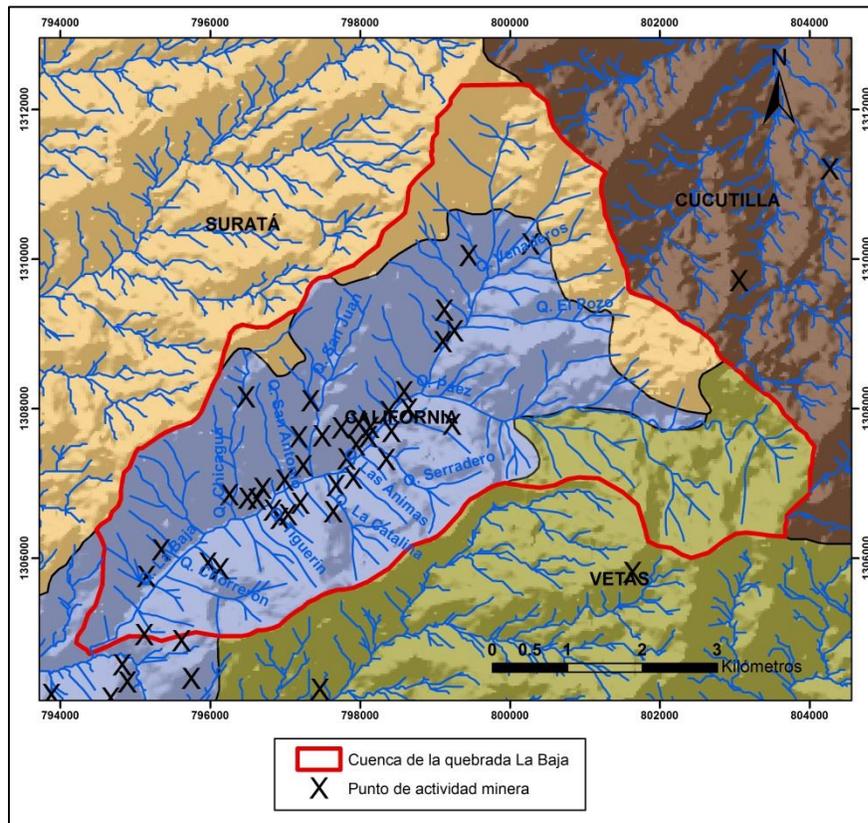
En esta región se tiene un grupo de depósitos auríferos epitermales en cizalla y venas del sistema de fallas Cucutilla que hace parte de la gran falla Bucaramanga. El yacimiento es rico en sulfuros y se caracteriza por la asociación de oro con plata y cobre, acompañada por algo de molibdeno, telurio, arsénico, selenio, tungsteno, uranio y elementos menores (Servicio Geológico Colombiano 2001).

Los dominios mineralizados se caracterizan por la presencia de sílice masiva de grano fino y por texturas de reemplazamiento, pirita y calcopirita diseminada y masas de grano grueso de pirita, con algo de calcopirita y ocasionalmente molibdenita, galena y esfalerita llenando los espacios abiertos (Servicio Geológico Colombiano 2001).

3.1.2 Actividad minera

En esta región se llevan a cabo actividades extractivas desde el período colonial, allí se desarrolla una minería principalmente de subsistencia y con bajo grado de tecnología (Servicio Geológico Colombiano 2001). En la **Figura 3-3** se muestra la localización de los centros en los que actualmente se desarrollan actividades extractivas según la información del Catastro Minero Colombiano (2014). (El sistema de coordenadas de las figuras corresponde a Magna Sirgas - origen Este).

Figura 3-3. Localización de los centros de actividad minera en la región



De acuerdo con los datos del Sistema de Información Minero Colombiano (2014), el distrito minero Vetas-California tuvo una producción cercana a los 49,000 gramos de oro en el año 2013, cantidad que representó el 100% de la producción en el departamento de Santander y cerca del 1% de la producción nacional.

El principal problema ambiental en la región es generado por el vertimiento directo de los efluentes producto de la explotación y el beneficio de los minerales, a las quebradas Angostura, Páez, La Baja, el Volcán y El Salado y al río Vetas, los cuales drenan sus aguas al río Suratá, del cual se captan aguas para la planta Bosconia que hace parte del sistema de acueducto de la ciudad de Bucaramanga (Ministerio de Minas y Energía 2005). La presencia de materiales ricos en sulfuros y sulfatos en esos afluentes, genera cambios en el pH dando lugar a la acidificación de las aguas.

En la **Fotografía 3-1**, **Fotografía 3-2**, **Fotografía 3-3**, **Fotografía 3-4** y **Fotografía 3-5** se muestran algunas zonas de actividad minera en el área de influencia de la quebrada La Baja.

Fotografía 3-1. Planta de trituración en la margen derecha de la quebrada La Baja



Fotografía 3-2. Piscinas de sedimentación a orillas de la quebrada La Baja



Fotografía 3-3. Acumulación de material lixiviado a orillas de la quebrada La Baja



Fotografía 3-4. Bocamina a 20 m del canal de la quebrada La Baja



Fotografía 3-5. Centros de actividad minera en la parte alta de la quebrada La Baja



3.1.3 DAM

Los DAM son un problema común en el municipio de California dado que los depósitos minerales de los que se extrae el oro y la plata son ricos en sulfuros, y además la mayor parte de la minería en esta área es de tipo artesanal, por lo que no se tiene un manejo adecuado de los relaves (Peña Ortiz y Pérez Vega 2009).

Sin embargo, el pH de los DAM generados en la zona por las actividades de explotación en el túnel La Perezosa de la compañía Greystar, es controlado mediante un sistema que incluye agitación, dosificación de carbonato de calcio y suministro de sulfato de aluminio como coagulante que influye directamente en la floculación, antes de ser descargados a alguna fuente hídrica (Peña Ortiz y Pérez Vega 2009).

3.2 Muestreo de sedimentos activos

Se hicieron trabajos de campo en el área de estudio durante una semana, en donde se llevó a cabo un muestreo de sedimentos finos activos de corriente, los cuales corresponden a la fracción fina y liviana presente en el lecho activo de las corrientes que conforman los drenajes.

La toma de las muestras se hizo siguiendo la metodología descrita en el documento técnico para el muestreo geoquímico de sedimentos finos activos o de lecho seco en zonas de interés en el territorio colombiano (Servicio Geológico Colombiano 2013).

Para la toma de las muestras 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 de calibre 4. 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 2.5 y 3 kg por muestra de sedimento activo.

- **Definición de la malla de muestreo**

La distribución de las muestras se definió teniendo en cuenta su representatividad en la caracterización del problema y los costos de los trabajos de campo y de los análisis de laboratorio, 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 de la cuenca de estudio.

Con base en el modelo digital de elevación ASTER (USGS y Japan ASTER Program 2003), se delimitaron los drenajes de la cuenca de la quebrada La Baja y se señalaron como puntos de muestreo las intersecciones y desembocaduras de las quebradas de mayor orden. Sin embargo, como el número de muestras superaba el presupuesto, se hizo una selección de 35 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, dado que la unión de drenajes de distinta procedencia puede producir cambios en la físico-química de las aguas favoreciendo procesos que pueden afectar la presencia de los contaminantes en el agua.

3.3 Análisis del pH de los sedimentos

El pH (potencial de hidrógeno) es una medida de la acidez o la alcalinidad de una solución, este se mide en una escala logarítmica y representa el logaritmo negativo de la concentración de los iones hidrógeno expresado en moles por litro ($\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$). Así, un pH de 4 representa una concentración de 1×10^{-4} moles/l de iones H^+ y un pH de 8 representa una concentración de 1×10^{-8} moles /l de iones H^+ .

En la **Tabla 3.1** se muestra la clasificación del pH de los suelos (United States Department of Agriculture, USDA 1999).

Tabla 3.1. Clasificación del pH de los suelos

Valor	Clasificación
< 3.5	Ultra ácido
3.5 - 4.4	Extremadamente ácido
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido
6.6 - 7.3	Neutro
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 - 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 - 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

Para medir el pH de los sedimentos se usó un pH-metro electrónico portátil marca Hanna HI98103, el cual tiene una resolución de 0.01 pH y una precisión de ± 0.2 pH. Para la calibración de este equipo se usaron dos puntos (potenciómetros) con pH de 4 y 7.

Para determinar el pH de cada muestra, se tomaban aproximadamente 100 g de sedimento y se disolvían en 200 ml de agua destilada y finalmente se introducía el pH-metro en la solución y después de 30 segundos se registraba la lectura digital.

Las mediciones del pH se hicieron siempre in situ con el propósito de evitar variaciones generadas por los cambios de temperatura.

3.4 Análisis de la composición mineralógica de los sedimentos

A continuación, se describe la metodología utilizada para determinar la composición mineralógica de las muestras.

3.4.1 Preparación de las muestras

En el laboratorio se tomaron, mediante la técnica de cuarteo, 100 g como muestra de trabajo de cada una de las muestras recolectadas en campo.

Las muestras de trabajo se pulverizaron en un molino de bolas durante tres minutos para obtener un tamaño de grano inferior a 150 μm y preparar una superficie plana de análisis en un portamuestras circular haciendo presión manual hasta lograr la compactación adecuada.

3.4.2 Difracción de rayos X

Para determinar la composición mineralógica de las muestras de sedimento, se usó la técnica de difracción de rayos X.

La difracción de rayos X permite obtener información detallada sobre la estructura cristalina de los minerales. Los cristales están formados por moléculas ordenadas que siguen un patrón tridimensional llamado sistema cristalino, los sistemas cristalinos están definidos por las llamadas redes o celdas de Bravais, estas redes son los arreglos tridimensionales posibles (cúbico, tetragonal, ortorrómbico, romboédrico, hexagonal, monoclinico o triclinico) de un cristal (Universidad de Granada 2009).

La difracción de rayos X está basada en la ley de Bragg, la cual permite calcular la distancia entre los planos de una muestra cristalina, de acuerdo con la Ec.5.

$$\lambda = 2d_{hkl} \text{sen}\theta_{hkl} \quad \text{Ec.5}$$

Dónde:

λ : longitud de onda del haz de rayos X incidente

d_{hkl} : distancia interplanar entre planos tipo hkl

Θ_{hkl} : ángulo entre el haz de rayos X incidente y el plano hkl de incidencia

Cuando una muestra es sometida en un difractómetro de rayos X a la acción de un haz de longitud de onda λ conocida, se obtiene un diagrama de picos (difractograma) en el que el eje X corresponde al ángulo 2Θ y el eje Y corresponde a la intensidad de la señal (Universidad de Granada 2009).

Cada muestra cristalina produce un difractograma característico. Si la muestra contiene diferentes sustancias cristalinas, su difractograma será una combinación de los difractogramas de las sustancias que contiene (Universidad de Granada 2009).

La interpretación de un difractograma para la identificación de la muestra usualmente se hace a través del método de Hanawalt en el que se identifica el ángulo 2Θ para cada uno de los picos y se calcula la intensidad relativa, teniendo en cuenta que la intensidad del pico más alto es del 100% (Lutterotti 2012).

Luego, teniendo el ángulo Θ y conociendo la longitud de onda del haz incidente (λ), se calcula, usando la ley de Bragg, la distancia interplanar (d_{hkl}) para cada pico (Lutterotti 2012).

En la base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD) se tienen los seis picos más intensos de cada estructura cristalina, los cuales han sido determinados de forma experimental, así, para identificar los minerales contenidos en una muestra basta con comparar los valores obtenidos de distancia interplanar para los picos del difractograma con los valores reportados en esta base de datos (Lutterotti 2012).

El análisis de las muestras de sedimento se hizo en un difractómetro de rayos X marca PANalytical, modelo EMPYREAN, usando una radiación de rayos X, K_{α} del Cu con $\lambda=1.5818 \text{ \AA}$ en el laboratorio Alpha 1 S.A.

- **Cuantificación de las proporciones minerales**

La intensidad de las reflexiones de una fase mineral depende de su concentración en la muestra; sin embargo la relación entre la intensidad y la proporción no es lineal debido a los efectos de absorción, por ello para la cuantificación de las fases minerales presentes en cada una de las muestras se usó el método de refinamiento de Rietveld, el cual proporciona información sobre la concentración de los minerales con base en parámetros como la celda unitaria, el tamaño de grano y las posiciones atómicas (Lutterotti 2012).

3.5 Análisis de la reflectancia espectral de los sedimentos

Para medir la reflectancia de los sedimentos se usó un espectrómetro HR2000, el cual es sensible entre las longitudes de onda de 200 y 1,100 nm y tiene una resolución óptica de 0.065 nm. Para operar este espectrómetro se requiere una fibra óptica a través de la cual viaja la luz que irradia un objeto en particular hasta el espectrómetro.

OOIBase32 es un programa de adquisición y visualización que permite, en tiempo real, procesar la señal que recibe el espectrómetro. Con este software es posible tomar diferentes mediciones espectroscópicas tales como absorbancia, reflectancia y transmisión.

Para efectos de este trabajo se midió la reflectancia, la cual corresponde a la radiación que una superficie retorna sin cambios en la longitud de onda. La reflexión puede ser especular o difusa, la primera se da cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión y la segunda cuando el ángulo de incidencia es diferente del ángulo de reflexión (Curtis D. 1999).

La reflectancia se expresa como un porcentaje (% R_λ) relativo a la reflectancia de una sustancia de referencia estándar, de acuerdo con la Ec.6.

$$\%R_\lambda = \frac{S_\lambda - D_\lambda}{R_\lambda - D_\lambda} \times 100\% \quad \text{Ec.6}$$

Donde S_λ es la intensidad de la muestra en la longitud de onda λ , D_λ es la intensidad de la oscuridad en la longitud de onda λ y R_λ es la intensidad de referencia en la longitud de onda λ .

En este trabajo, la intensidad de referencia (R_λ) se tomó como el espectro de una hoja de papel bond blanca y para registrar la intensidad de la oscuridad (D_λ) se bloqueaba la entrada de luz al espectrómetro cubriendo completamente la punta de la fibra óptica.

Tanto el espectro de referencia como el de la oscuridad varían de acuerdo con las condiciones de luz, por ello se medían nuevamente en cada punto de muestreo.

Para medir la intensidad de la muestra (S_λ) se apuntaba directamente al sedimento con la punta de la fibra óptica.

Se tomaron dos mediciones de reflectancia para cada sedimento, una en el sitio de muestreo con el sedimento mojado y otra en el laboratorio después de haber secado la muestra en un horno a 30°C. Todas las mediciones se hicieron tratando de mantener una diferencia de altura constante de 30 cm entre el sedimento y la punta de la fibra óptica.

3.6 Correlación de datos

Se analizó la correlación existente entre el pH de los sedimentos, su composición mineralógica y su reflectancia espectral, con el propósito de determinar la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH.

3.7 Tratamiento digital de las imágenes de satélite

De acuerdo con la firma espectral típica obtenida, se evaluó el comportamiento espectral de los sedimentos en las longitudes de onda correspondientes a las bandas espectrales de las imágenes hiperespectrales Aviris y de las imágenes multiespectrales Landsat, con el propósito de identificar máximos y mínimos de reflectancia que permitirían, usando estas imágenes, la discriminación de los sedimentos de acuerdo con su pH.

Para el área de estudio solo se tienen disponibles imágenes multiespectrales, así que en el tratamiento digital se usaron imágenes del satélite Landsat TM del año 2010. El tratamiento de estas imágenes se hizo en el software SPRING (Sistema de procesamiento de información referenciada) Versión 5.3 (Espaciais 2014).

En el preprocesamiento de las imágenes se llevó a cabo un proceso de corrección atmosférica, dado que la presencia de aerosoles y nubes en la atmósfera dispersan la radiación y esta puede ser recibida por el satélite como una porción añadida (Song, y otros 2001). La corrección se hizo por el método de sustracción del objeto oscuro, el cual supone que las zonas más oscuras (sombras) de las imágenes deben tener una radiancia cercana a cero (Lu, y otros 2002), así, a cada una de las bandas de las imágenes se le restó el valor promedio de los píxeles de sombra en ella.

Después de la corrección atmosférica, se evaluó la correspondencia entre los valores digitales de los píxeles y el pH de los sedimentos y de acuerdo con los resultados se llevó a cabo una clasificación, con el propósito de identificar aquellos píxeles que correspondían a sedimentos asociados a drenajes con problemas de acidez.

4. Resultados y análisis

4.1 pH de las muestras de sedimento

Debido a las condiciones de acceso en campo, solo fue posible acceder a 28 de los 35 puntos de muestreo inicialmente propuestos.

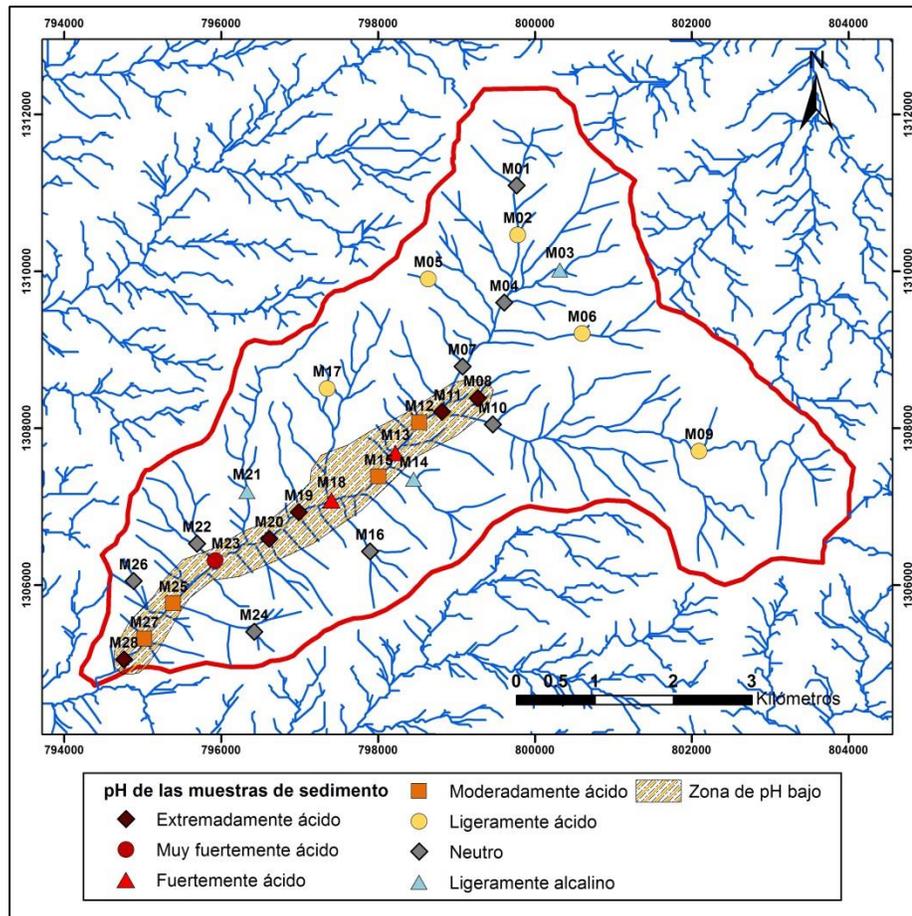
En la **Tabla 4.1** se muestran las coordenadas de los puntos de muestreo en el sistema de coordenadas Magna Sirgas - origen Este, el pH de cada una de las muestras de sedimento y su clasificación de acuerdo con el Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Además, la **Figura 4-1** muestra la distribución espacial de las muestras y su pH.

Tabla 4.1. pH de las muestras de sedimento

Código de la muestra	Coordenada X	Coordenada Y	pH	Clasificación pH
M01	799,763.93	1,311,095.66	6.8	Neutro
M02	799,781.93	1,310,467.01	6.1	Ligeramente ácido
M03	800,319.51	1,310,017.48	7.5	Ligeramente alcalino
M04	799,605.78	1,309,601.43	7.0	Neutro
M05	798,640.07	1,309,905.30	6.2	Ligeramente ácido
M06	800,605.77	1,309,209.19	6.4	Ligeramente ácido
M07	799,077.64	1,308,788.40	6.9	Neutro
M08	799,272.44	1,308,383.49	4.0	Extremadamente ácido
M09	802,095.31	1,307,708.73	6.2	Ligeramente ácido
M10	799,463.17	1,308,045.98	6.9	Neutro
M11	798,814.90	1,308,206.93	4.2	Extremadamente ácido
M12	798,527.96	1,308,072.68	5.9	Moderadamente ácido
M13	798,224.25	1,307,684.68	5.5	Fuertemente ácido
M14	798,457.46	1,307,349.56	7.8	Ligeramente alcalino
M15	798,009.04	1,307,385.38	5.9	Moderadamente ácido

Código de la muestra	Coordenada X	Coordenada Y	pH	Clasificación pH
M16	797,897.22	1,306,427.49	6.8	Neutro
M17	797,353.12	1,308,505.85	6.4	Ligeramente ácido
M18	797,409.44	1,307,081.25	5.4	Fuertemente ácido
M19	796,991.03	1,306,926.64	4.0	Extremadamente ácido
M20	796,614.06	1,306,587.09	4.4	Extremadamente ácido
M21	796,331.17	1,307,191.84	7.6	Ligeramente alcalino
M22	795,692.44	1,306,526.16	7.1	Neutro
M23	795,924.89	1,306,313.01	4.6	Muy fuertemente ácido
M24	796,422.20	1,305,403.47	6.6	Neutro
M25	795,388.75	1,305,768.12	6.0	Moderadamente ácido
M26	794,883.27	1,306,047.66	6.6	Neutro
M27	795,024.82	1,305,315.81	6.0	Moderadamente ácido
M28	794,758.66	1,305,049.18	4.4	Extremadamente ácido

Figura 4-1. pH de las muestras de sedimento



De acuerdo con los resultados, en la parte alta de la cuenca el pH es neutro, sin embargo, en la parte media – baja de la cuenca se tiene una zona con problemas de acidez que coincide con la localización de los centros de explotación mineral, esta zona se muestra sombreada en la Figura 4-1.

4.2 Mineralogía de las muestras de sedimento

Con base en su pH y su distribución en la cuenca de estudio, se seleccionaron 10 de las 28 muestras de sedimento, cubriendo todo el rango de pH y con una distribución aproximadamente uniforme en el área.

De acuerdo con los resultados, las muestras analizadas contienen un porcentaje de minerales amorfos, del orden de 4%, que no fueron identificados mediante difracción de rayos X, dado que carecen de una estructura cristalina. En la Tabla 4.2 se muestran los resultados del análisis de la composición mineral de las muestras de sedimento.

Tabla 4.2. Composición mineral de las muestras de sedimento

Código de la muestra	M03	M04	M09	M11	M13	M18	M19	M23	M26	M27
pH	7.5	7.0	6.2	4.2	5.5	5.4	4.0	4.6	6.6	6.0
Cuarzo (%)	50.5	44.5	48.0	37.8	50.1	48.6	56.4	45.2	55.4	59.9
Ortoclasa (%)						10.3	12.2	11.6		
Albita (%)	12.4	14.3			13.7	5.6				
Illita (%)	12.6	12.5	15.5	41.2	17.9	14.9		25.3	11.9	15.1
Microclina (%)	11.1	14.2	16.7						13.8	8.5
Anortita (%)			9.6						9.2	7.3
Clinocloro (%)						3.2				
Hornblenda (%)	3.5	2.9	3.8							3.6
Alunita (%)				4.5	4.8	4.6	8.6	7.8		
Muscovita (%)							6.1			
Pigeonita (%)				3.0	1.2	2.2	4.3			
Filipsita (%)						2.0				
Pirita (%)					3.8	1.5		2.7		0.8
Jarosita (%)				3.8		3.3				
Ferrihidrita (%)	3.9	2.8							1.9	
Schewertmannita (%)				3.6	2.9		3.4			
Goethita (%)	1.2	3.5	2.4				3.2	1.9	2.8	
Tennantita (%)				1.1			0.9	0.8		

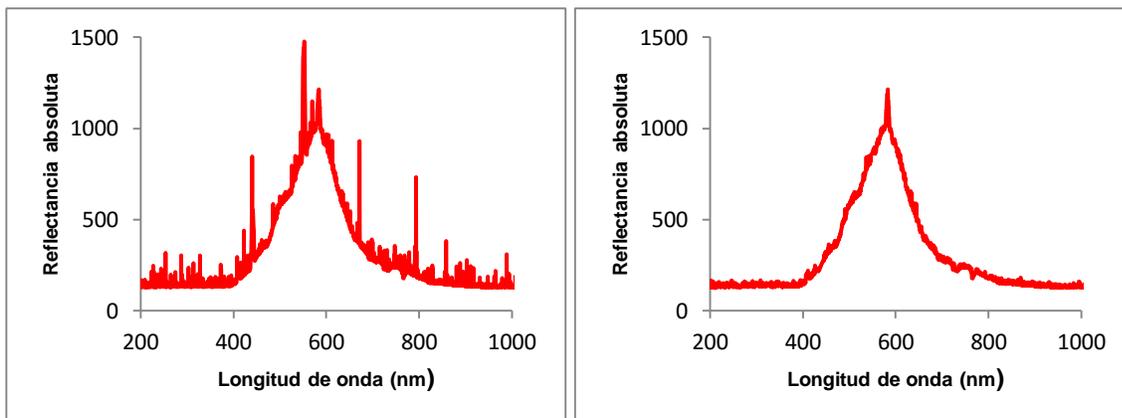
Código de la muestra	M03	M04	M09	M11	M13	M18	M19	M23	M26	M27
Vermiculita (%)	0.5	0.4	0.1						0.1	
Minerales amorfos (%)	4.3	4.9	3.9	5.0	5.6	3.8	4.9	4.7	4.9	4.8

4.3 Reflectancia espectral de las muestras de sedimento

Para cada muestra se obtuvieron bajo las mismas condiciones de luz, la reflectancia del blanco (R_λ), la reflectancia del negro (D_λ) y la reflectancia del sedimento (S_λ) en 2048 puntos diferentes entre las longitudes de onda 188.25 y 1095.74 nm, espaciados aproximadamente cada 0.44 nm.

Durante el análisis, se encontraron valores atípicos en los conjuntos de datos de reflectancia probablemente generados por el ruido atmosférico, los cuales fueron corregidos de acuerdo con el valor del límite superior y el valor del límite inferior en cada uno de los intervalos de análisis. En la Figura 4-2 se muestra el conjunto de datos obtenidos para la reflectancia de la muestra M01, antes y después de hacer la corrección de valores atípicos.

Figura 4-2. Reflectancia de la muestra M01 antes (izquierda) y después (derecha) de la corrección de valores atípicos

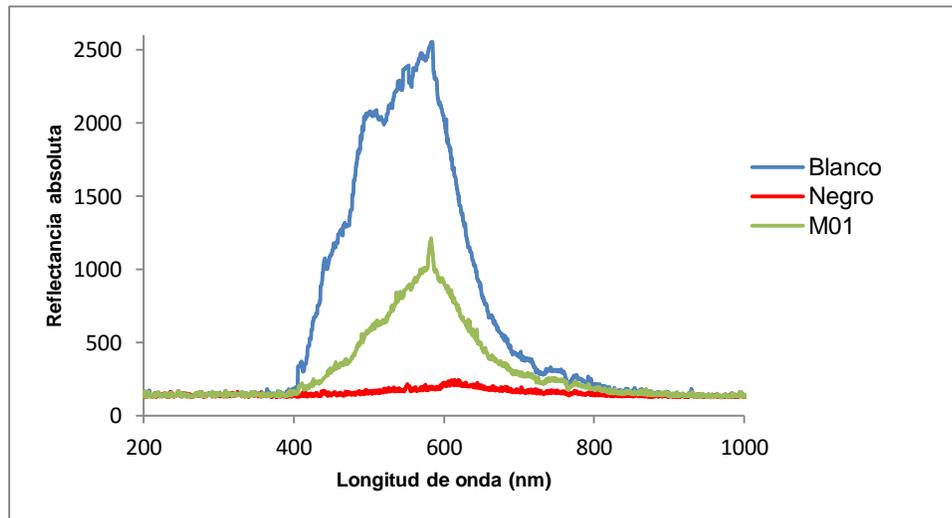


Tal como se mencionó en la metodología, para cada muestra de sedimento se midió la reflectancia espectral in situ (sedimento húmedo) y en el laboratorio (muestra seca). En el análisis de los datos, se encontró que la reflectancia espectral de los sedimentos secos es aproximadamente un 20% mayor que la reflectancia de los sedimentos húmedos para cualquier longitud de onda. Esta diferencia en la reflectancia es producto de la alta

absorción espectral del agua en las muestras húmedas. En la correlación de los datos se usaron las firmas espectrales de los sedimentos secos, aunque el resultado obtenido debería ser el mismo de haberse usado las firmas espectrales de los sedimentos húmedos.

En la Figura 4-3 se muestra la reflectancia absoluta del blanco y la del negro comparadas con la reflectancia absoluta de la muestra M01. Tal como se observa en la gráfica, la reflectancia de la muestra siempre es menor o igual que la reflectancia del blanco y mayor igual que la reflectancia del negro, dado que el blanco es el color que mayor energía refleja y la reflectancia del negro es la mínima

Figura 4-3. Reflectancia del blanco, del negro y de la muestra M01



- **Cálculo del porcentaje de reflectancia**

Tal como se explicó en el apartado 3.5, la reflectancia de los sedimentos se expresa como un porcentaje de reflectancia respecto a la reflectancia de referencia (blanco) de acuerdo con la Ec.6. En la correlación de los datos se usó el porcentaje de reflectancia de las muestras.

En el Anexo A se muestra la firma espectral para cada una de las 28 muestras de sedimento.

4.4 Correlación de los datos

A continuación, se analiza la correlación entre los datos para obtener la firma espectral típica del tipo de sedimento asociado a cada rango de pH.

4.4.1 pH y composición mineralógica

De acuerdo con los resultados, todas las muestras tienen cuarzo y la illita aparece en nueve de las diez muestras analizadas. Sin embargo, no se observó alguna correlación entre el contenido de estos minerales y el pH de los sedimentos.

La microclina, la anortita y la hornblenda no aparecen en sedimentos de pH extremadamente ácido a fuertemente ácido mientras que la alunita, la pigeonita y la tennantita solo aparecen en los sedimentos que tienen este pH. La pirita aparece en las muestras de pH extremadamente ácido a moderadamente ácido.

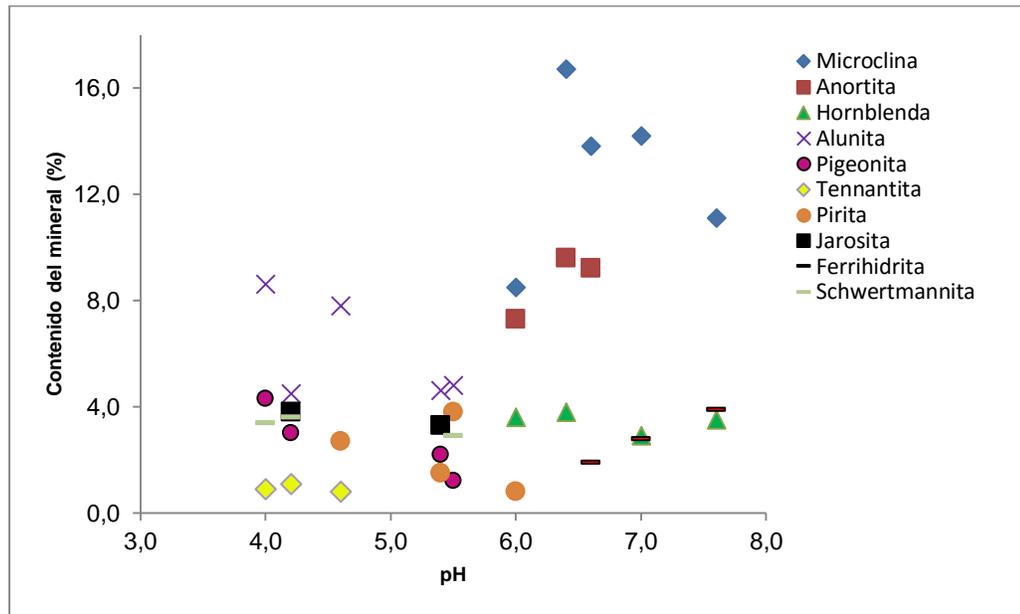
La vermiculita solo aparece en los sedimentos de pH neutro a ligeramente alcalino.

Solo los sedimentos de pH extremadamente ácido tienen jarosita y schwertmannita mientras que la ferrihidrita aparece solo en los sedimentos de pH neutro a ligeramente alcalino. La goethita aparece en un amplio rango de pH.

En la Figura 4-4 se muestra, para los minerales que aparentemente tienen una correlación con el pH, su contenido y los valores de pH en los que aparecen.

De acuerdo con la Figura 4-4, aunque cada uno de estos minerales aparece solo en muestras de pH bajo o en muestras de pH alto, no se observa una correlación entre el pH y el contenido de cada mineral, excepto para la ferrihidrita cuyo contenido aumenta con el aumento del pH y para la pigeonita cuyo contenido disminuye con el aumento del pH.

Figura 4-4. Mineralogía y pH



4.4.2 pH y reflectancia espectral

Entre las longitudes de onda 375 y 935 nm los sedimentos de pH ácido presentan una mayor reflectancia, alcanzando diferencias de hasta un 50% con respecto a la reflectancia de los sedimentos de pH neutro a alcalino. En este intervalo, la curva espectral de cada sedimento presenta dos puntos de máxima reflectancia (longitudes de onda en las que la muestra refleja la mayor cantidad de energía), nombrados a_1 y a_2 , siendo $a_2 > a_1$. Aunque en todo el intervalo los sedimentos de pH bajo presentan mayor reflectancia, el análisis de la correlación entre la reflectancia y el pH se redujo a evaluar la correlación entre los valores a_1 y a_2 con el pH.

En la **Tabla 4.3** se muestran los valores a_1 y a_2 para cada muestra y en la **Figura 4-5** y **Figura 4-6** se muestra, respectivamente, la localización de los valores a_1 y a_2 y su relación con el pH.

Tabla 4.3. a_1 y a_2 de la curva espectral de cada muestra de sedimento

Código de la muestra	pH	Clasificación pH	a_1		a_2	
			Longitud de onda (nm)	Reflectancia (%)	Longitud de onda (nm)	Reflectancia (%)
M01	6.8	Neutro	390.74	53.04	873.77	59.38
M02	6.1	Ligeramente ácido	390.74	53.28	803.96	59.67
M03	7.5	Ligeramente alcalino	390.74	44.22	805.55	58.74
M04	7.0	Neutro	390.74	50.96	824.18	62.34
M05	6.2	Ligeramente ácido	390.74	63.21	805.26	68.32
M06	6.4	Ligeramente ácido	390.74	54.88	806.71	65.87
M07	6.9	Neutro	390.74	61.33	805.55	64.53
M08	4.0	Extremadamente ácido	400.38	76.39	748.48	98.26
M09	6.2	Ligeramente ácido	390.74	55.14	808.95	73.84
M10	6.9	Neutro	390.74	52.61	808.59	65.26
M11	4.2	Extremadamente ácido	400.38	72.07	789.04	100.00
M12	5.9	Moderadamente ácido	390.74	66.93	788.25	76.21
M13	5.5	Fuertemente ácido	390.74	65.61	788.28	80.32
M14	7.8	Ligeramente alcalino	390.74	48.80	862.59	50.18
M15	5.9	Moderadamente ácido	390.74	68.34	789.09	80.05
M16	6.8	Neutro	390.74	52.77	808.15	56.54
M17	6.4	Ligeramente ácido	390.74	54.91	804.32	66.26
M18	5.4	Fuertemente ácido	400.38	69.79	786.45	84.88
M19	4.0	Extremadamente ácido	400.38	83.23	785.13	100.00
M20	4.4	Extremadamente ácido	400.38	70.23	789.48	79.92
M21	7.6	Ligeramente alcalino	390.74	40.28	808.15	53.22
M22	7.1	Neutro	390.74	50.69	861.30	55.28
M23	4.6	Muy fuertemente ácido	390.74	70.12	789.48	87.25
M24	6.6	Neutro	390.74	55.61	808.59	71.22
M25	6.0	Moderadamente ácido	390.74	65.32	785.63	70.88
M26	6.6	Neutro	390.74	50.32	809.67	65.17
M27	6.0	Moderadamente ácido	390.74	66.28	786.33	85.52
M28	4.4	Extremadamente ácido	400.38	71.98	789.04	96.48

Figura 4-5. Localización de los valores a_1

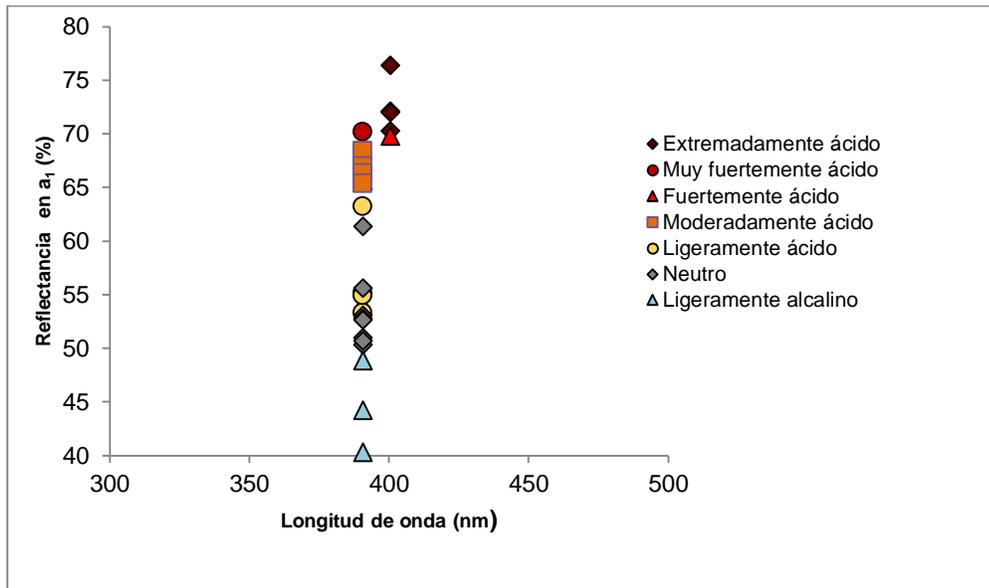
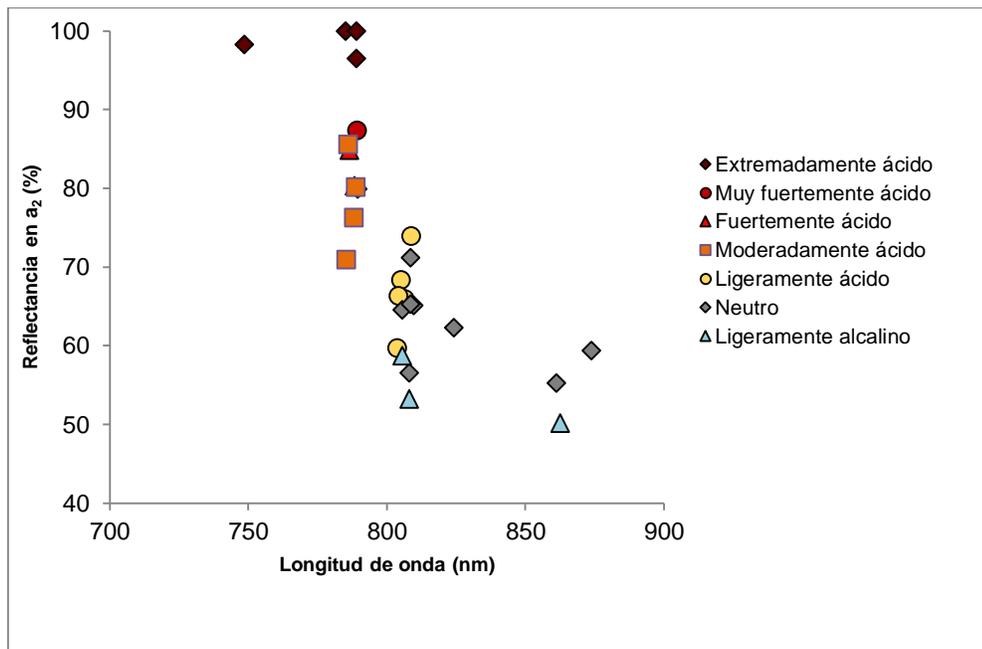


Figura 4-6. Localización de los valores a_2



De acuerdo con la información de la **Tabla 4.3** y tal como se observa en la **Figura 4-5** y en la **Figura 4-6**, a_1 y a_2 son mayores para las muestras de pH ácido, lo cual indica que existe una correlación entre el porcentaje de reflectancia y el pH.

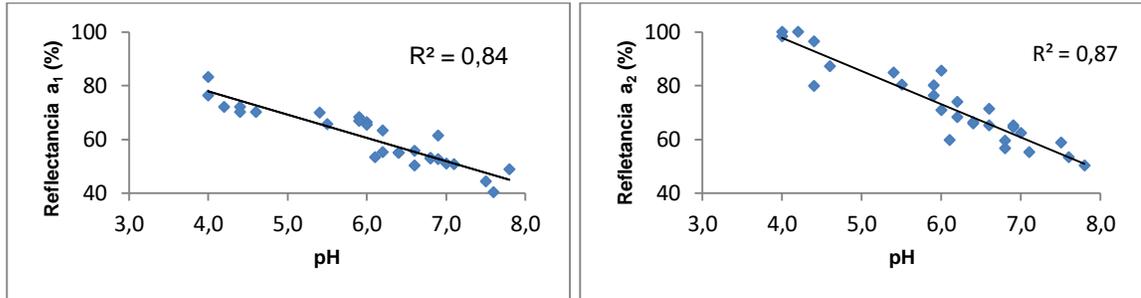
El máximo de reflectancia a_1 se tiene en la longitud de onda 390.74 nm para la mayoría de las muestras y en 400.38 nm para las muestras de menor pH, este valor es en promedio 72.43% para los sedimentos de pH extremadamente ácido a fuertemente ácido, 66.72% para los de pH moderadamente ácido, 56.28% para los de pH ligeramente ácido, 53.42% para los de pH neutro y 44.43% para los de pH ligeramente alcalino.

El máximo de reflectancia a_2 se tiene en el intervalo espectral de 748.48 a 789.48 nm para los sedimentos de menor pH y en el intervalo espectral de 804.32 a 873.77 nm para las muestras de mayor pH. a_2 es en promedio 90.89% para los sedimentos de pH extremadamente ácido a fuertemente ácido, 78.17% para los de pH moderadamente ácido, 66.79% para los de pH ligeramente ácido, 62.47% para los de pH neutro y 54.05% para los de pH ligeramente alcalino.

Aunque a_1 y a_2 son mayores para los sedimentos de pH ácido, la diferencia entre el a_1 promedio de los sedimentos de pH más bajo y el de los sedimentos de pH más alto alcanza sólo el 28%, mientras que la diferencia entre el a_2 promedio de los sedimentos de pH más bajo y el de los sedimentos de pH más alto es cercana al 40%. La gran diferencia que se tiene entre los valores a_2 , facilita la identificación del pH de los sedimentos a partir de su reflectancia espectral.

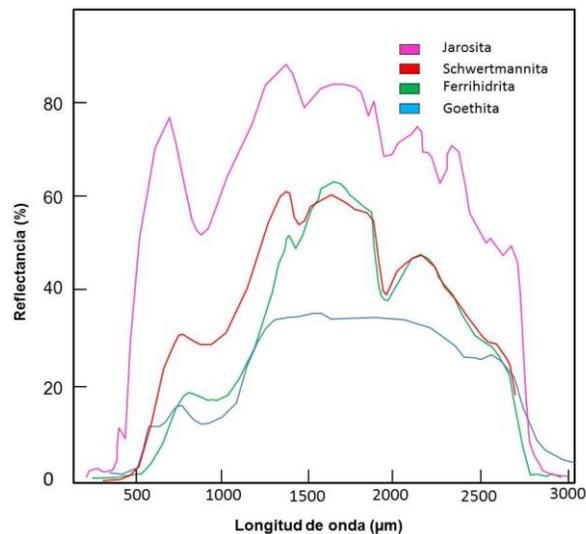
- **Coefficiente de correlación**

Entre las longitudes de onda 375 y 935 nm se tiene una correlación lineal entre el pH y el porcentaje de reflectancia de los sedimentos. De acuerdo con la **Figura 4-7**, el porcentaje de reflectancia en a_1 tiene una correlación del 84% con el pH y el porcentaje de reflectancia en a_2 tiene una correlación del 87% con el pH, lo cual indica que es posible determinar el pH de un sedimento a partir de su reflectancia espectral.

Figura 4-7. Correlación de a_1 (izquierda) y a_2 (derecha) con el pH

4.4.3 Mineralogía y reflectancia espectral

Los óxidos de hierro son separables de acuerdo con su reflectancia espectral. En la **Figura 4-8** se muestran las firmas espectrales de estos sedimentos, tomadas de la librería espectral digital del Servicio Geológico de Estados Unidos.

Figura 4-8. Firmas espectrales de los óxidos de hierro identificados en las muestras de sedimento

Es clara la relación que existe entre el comportamiento espectral de los óxidos de hierro y el de los sedimentos analizados. En el rango espectral de 375 a 935 nm, la jarosita y la schwertmannita que sólo aparecen en sedimentos de pH ácido, tienen mayor reflectancia que la ferrihidrita que sólo aparece en sedimentos de pH neutro a ligeramente alcalino. Además, el valor a_2 en la curva espectral de la jarosita y la schwertmannita se alcanza en

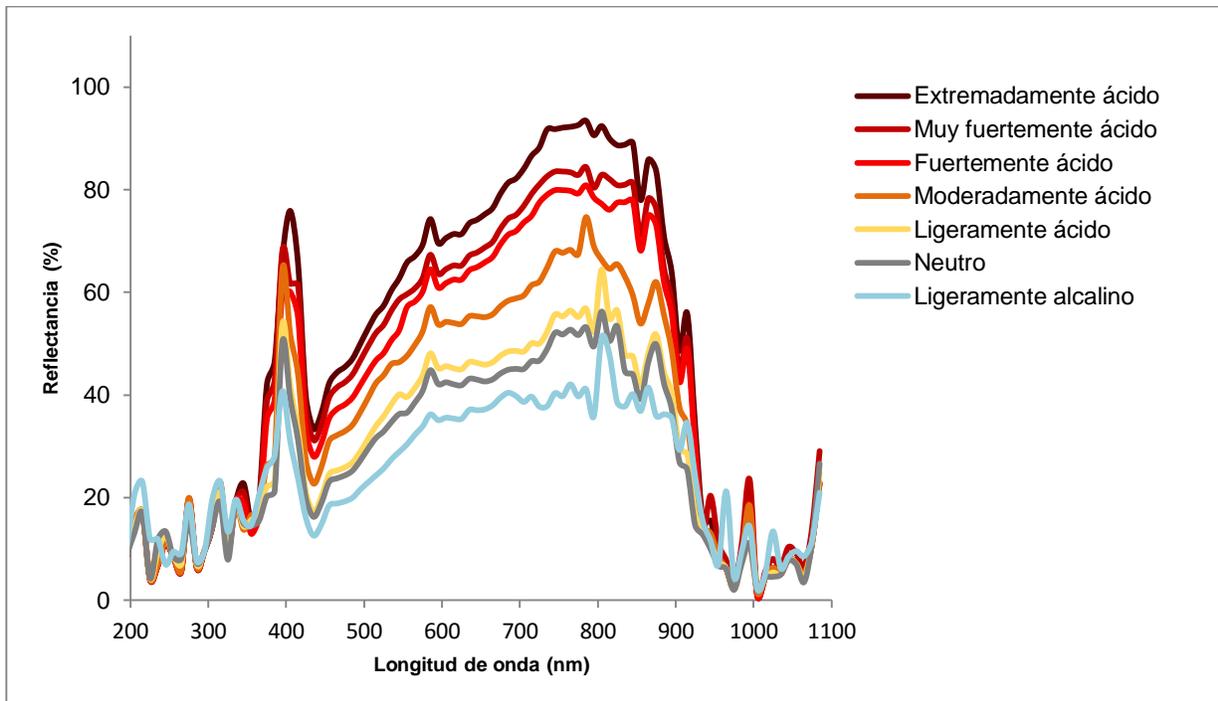
una longitud de onda menor que para la ferrihidrita, tal como pasa con las muestras de sedimento.

4.4.4 Firma espectral típica de los sedimentos según su pH

Teniendo en cuenta la correlación existente entre el pH y la reflectancia espectral de los sedimentos, la firma espectral típica del sedimento asociado a cada rango de pH se definió como la curva dada por la media de los valores de reflectancia de las muestras del mismo rango de pH. Así se obtuvo la firma espectral típica para un sedimento de pH extremadamente ácido, uno de pH muy fuertemente ácido, uno de pH fuertemente ácido, uno de pH moderadamente ácido, uno de pH ligeramente ácido, uno de pH neutro y uno de pH ligeramente alcalino. Ver Figura 4-9.

Tal como se observa en la Figura 4-9, entre las longitudes de onda 375 y 935 nm, la reflectancia es mayor para los sedimentos de menor pH.

Figura 4-9. Firma espectral típica de los sedimentos según su pH



4.5 Identificación de DAM usando imágenes de satélite

Con el propósito de definir las combinaciones de bandas espectrales que permitirían discriminar los sedimentos de acuerdo con su pH, se evaluó el comportamiento espectral de los sedimentos en las longitudes de onda correspondientes a las bandas espectrales de las imágenes multiespectrales Landsat y de las imágenes hiperespectrales Aviris.

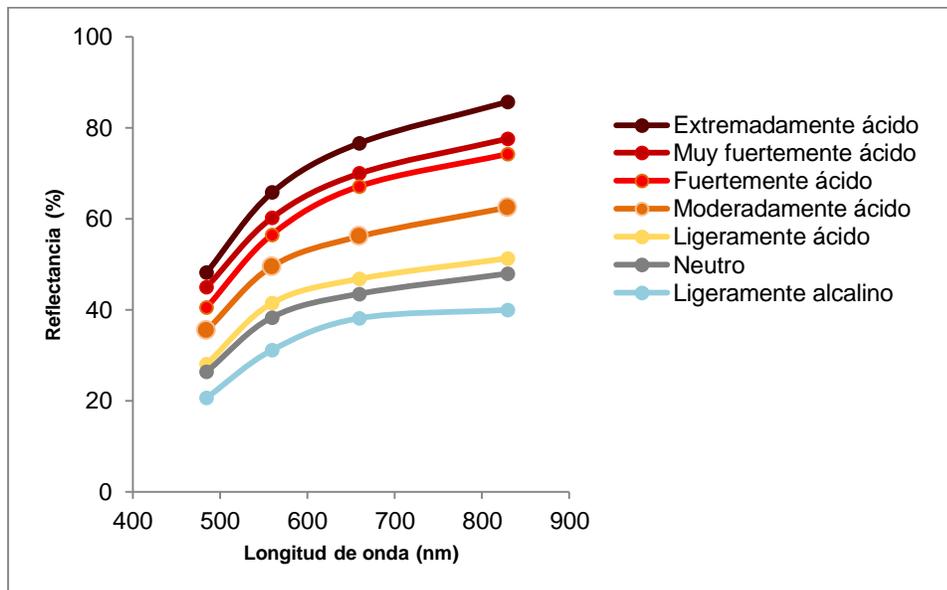
La reflectancia en cada banda espectral se calculó como la media del porcentaje de reflectancia en las longitudes de onda contenidas en la misma banda.

4.5.1 Imágenes Landsat

Las imágenes Landsat tienen seis bandas multiespectrales, cuatro de ellas están contenidas en el rango espectral de análisis de este trabajo: banda 1 o azul (450-520 nm), banda 2 o verde (520-600 nm), banda 3 o rojo (630-690 nm) y banda 4 o infrarrojo cercano (760-900 nm).

En la Figura 4-10 se muestra la firma espectral típica de los sedimentos de acuerdo con su reflectancia en las cuatro bandas Landsat mencionadas.

Figura 4-10. Firma espectral típica de los sedimentos en las imágenes Landsat



De acuerdo con la Figura 4-10, en las imágenes Landsat, el porcentaje de reflectancia es mayor para los sedimentos de menor pH. El punto de máxima reflectancia estaría ubicado en la banda 4 (760-900 nm) para todos los sedimentos, con una reflectancia media de 85.72% para los sedimentos de pH extremadamente ácido, 77.66% para los de pH muy fuertemente ácido, 74.20% para los de pH fuertemente ácido, 62.54% para los de pH moderadamente ácido, 51.37% para los de pH ligeramente ácido, 47.95% para los de pH neutro y 39.99% para los de pH ligeramente alcalino.

Es claro que por la baja resolución espectral de las imágenes Landsat, se pierde información importante de cada curva espectral.

4.5.2 Imágenes Aviris

Las imágenes Aviris son imágenes hiperespectrales que capturan información en 214 bandas contiguas en el rango espectral de 370 y 2,500 nm, con un ancho de banda de 10 nm. De estas 214 bandas, 72 están contenidas en el rango espectral de análisis.

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de reflectancia máximos a_1 y a_2 para cada muestra de sedimento y la banda Aviris en la cual estarían localizados.

Tabla 4.4. a_1 y a_2 de la curva espectral de cada muestra de sedimento en las imágenes Aviris

Código de la muestra	pH	Clasificación pH	a_1		a_2	
			Banda Aviris	Reflectancia (%)	Banda Aviris	Reflectancia (%)
M01	7.5	Ligeramente alcalino	B3	39.88	B44	56.75
M02	6.9	Neutro	B3	48.78	B44	62.1
M03	7.8	Ligeramente alcalino	B3	44.98	B50	45.62
M04	6.6	Neutro	B3	46.93	B44	63.25
M05	7	Neutro	B3	48.04	B46	60.09
M06	6.6	Neutro	B3	52.94	B44	68.25
M07	6.1	Ligeramente ácido	B3	51.49	B42	57.72
M08	4.4	Extremadamente ácido	B4	68.35	B42	77.21
M09	6.9	Neutro	B3	59.37	B44	62.81
M10	5.9	Moderadamente ácido	B3	66.35	B42	76.04
M11	5.5	Fuertemente ácido	B3	60.48	B42	79.33

Código de la muestra	pH	Clasificación pH	a ₁		a ₂	
			Banda Aviris	Reflectancia (%)	Banda Aviris	Reflectancia (%)
M12	6	Moderadamente ácido	B3	63.07	B42	67.12
M13	4	Extremadamente ácido	B4	82.41	B42	100
M14	6.8	Neutro	B3	50.06	B51	57.17
M15	5.4	Fuertemente ácido	B4	66.88	B42	82.41
M16	6.8	Neutro	B3	49.81	B44	54.44
M17	6.4	Ligeramente ácido	B3	50.32	B44	61.14
M18	4.6	Muy fuertemente ácido	B3	68.2	B42	84.37
M19	4	Extremadamente ácido	B4	73.26	B38	98.1
M20	4.4	Extremadamente ácido	B4	71.19	B42	93.25
M21	7.6	Ligeramente alcalino	B3	37.35	B44	51.16
M22	6.2	Ligeramente ácido	B3	61.24	B44	66.77
M23	4.2	Extremadamente ácido	B4	70.92	B42	100
M24	6.2	Ligeramente ácido	B3	54.26	B44	71.22
M25	5.9	Moderadamente ácido	B3	64.75	B42	75.03
M26	7.1	Neutro	B3	47.62	B50	50.31
M27	6	Moderadamente ácido	B3	63.98	B42	80.26
M28	6.4	Ligeramente ácido	B3	52.2	B44	64.62

De acuerdo con la información de la Tabla 4.4, en las imágenes Aviris, el máximo de reflectancia espectral a₁ estaría localizado en la banda 3 (390-400 nm) para la mayoría de las muestras y en la banda 4 (400-410 nm) para las muestras de menor pH, mientras que el máximo de reflectancia espectral a₂ estaría localizado en la banda 42 (780-790 nm) para los sedimentos de pH ácido y en la banda 44 (800-810) para los sedimentos de pH neutro a alcalino.

La menor reflectancia se tendría en la banda 64 (1,000-1,010 nm) para todas las muestras. Este valor es en promedio 0.84% para los sedimentos de pH extremadamente ácido a fuertemente ácido, 1.75% para los sedimentos de pH moderadamente ácido, 1.91% para los sedimentos de pH ligeramente ácido, 1.94% para los sedimentos de pH neutro y 2.15% para los sedimentos de pH ligeramente alcalino.

Así, al dividir las bandas 42 y 64 (B42/B64) se deberían obtener valores mayores para los sedimentos de pH ácido, dado que estos sedimentos tienen una alta reflectancia en la banda 42 y su reflectancia en la banda 64 tiende a cero. De este modo, esta razón

permitiría identificar aquellos sedimentos de pH ácido y entonces de forma indirecta identificar los drenajes con problemas de acidez.

4.5.3 Tratamiento digital de las imágenes de satélite

De acuerdo con el análisis anterior, las imágenes hiperespectrales serían las más adecuadas para la identificación de los DAM, sin embargo, no se tienen imágenes de este tipo disponibles para el área de estudio, así que se hizo el tratamiento digital de una imagen del satélite Landsat TM del año 2010.

En el análisis de las bandas de la imagen, se observó que, aunque la reflectancia máxima de los sedimentos está en la banda 4 (760-900 nm), es en la banda 3 rojo (630-690 nm) en donde se tiene un mayor contraste entre los diferentes tipos de coberturas. En esta última es posible diferenciar los cuerpos de agua, la vegetación y los suelos desnudos, gracias a que el agua y la vegetación presentan mayor absorción que los suelos desnudos.

En el análisis de la correlación entre los números digitales de los píxeles y el pH de los sedimentos, se evaluó la reflectancia no solo en las bandas 1, 2, 3 y 4 que son las bandas de las imágenes Landsat contenidas en el rango espectral en el que se obtuvo información con el espectrómetro, sino también en las bandas 5 y 7. Para ello se identificó el número digital, en cada banda, para cada uno de los píxeles en los que se tenían las muestras de sedimento.

Es importante tener en cuenta que el valor de reflectancia o número digital (ND) de los píxeles de las imágenes de satélite corresponde a un número entre 0 y 255, en donde 0 es la menor reflectancia (0%) y 255 es la máxima reflectancia (100%).

En la **Tabla 4.5** se muestra el coeficiente de correlación obtenido entre la reflectancia espectral en las bandas de la imagen Landsat y el pH.

Tabla 4.5. Coeficiente de correlación entre la reflectancia en las bandas Landsat y el pH

Banda Landsat	Longitud de onda (nm)	(R ²) ND Vs pH
1 – Azul	450-520	0.82
2 – Verde	520-600	0.84
3 – Rojo	630-690	0.85
4 – Infrarrojo cercano	760-900	0.24
5 – Infrarrojo medio	1,550 – 1,750	0.72
7 – Infrarrojo distante	2,080-2,350	0.75

De acuerdo con los resultados, la reflectancia en la banda 3 es la que mayor correlación tiene con el pH, con un porcentaje del 84%.

Con base en el número digital de los píxeles se calculó el porcentaje de reflectancia de cada sedimento en la banda 3 y se comparó con el porcentaje de reflectancia que se obtuvo en la longitud de onda de esta banda midiendo con el espectrómetro. Se encontró que, aunque en ambos casos el porcentaje de reflectancia es mayor para los sedimentos de menor pH, la reflectancia es mayor cuando se mide directamente sobre el sedimento que cuando se evalúa en la imagen de satélite. Esta diferencia se da porque en la imagen se tiene la reflectancia de píxeles que no corresponden solo al sedimento sino a diferentes tipos de coberturas.

Usando los datos de pH de 25 de las 28 muestras, se halló la ecuación de la recta que relaciona la reflectancia en la banda 3 y el pH y con base en esta ecuación se calcularon los valores de reflectancia límite para cada uno de los rangos de pH (**Tabla 4.6**) y de acuerdo con estas clases se hizo la clasificación de la imagen.

Las tres muestras sobrantes se usaron para validar los resultados de la clasificación.

Tabla 4.6. Números digitales en la banda 3 Landsat para los píxeles asociados a cada categoría de pH

pH	Calificación	Número digital B3
<3.5	Ultra ácido	ND>68
3.5 - 4.4	Extremadamente ácido	68≥ND>56
4.5 - 5.0	Muy fuertemente ácido	56≥ND>48

pH	Calificación	Número digital B3
5.1 - 5.5	Fuertemente ácido	$48 \geq ND > 41$
5.6 - 6.0	Moderadamente ácido	$41 \geq ND > 34$
6.1 - 6.5	Ligeramente ácido	$34 \geq ND > 27$
6.6 - 7.3	Neutro	$27 \geq ND > 17$
7.4 - 7.8	Ligeramente alcalino	$17 \geq ND > 10$
>7.8	Alcalino	$ND \leq 10$

En el proceso de clasificación, algunos píxeles de diferentes coberturas fueron clasificados en alguna de las categorías definidas, sin embargo, sólo se tuvieron en cuenta los píxeles que corresponden a drenajes.

En la **Figura 4-11** se muestran los resultados de la clasificación de los píxeles en la banda 3. Teniendo en cuenta que el valor de mínimo de pH aceptado por la norma de vertimientos es de 6 unidades de pH, las categorías de pH que no cumplen con este requerimiento son: ultra ácido, extremadamente ácido, muy fuertemente ácido, fuertemente ácido y moderadamente ácido, y por tanto los píxeles clasificados en estas cinco categorías corresponderían a drenajes con problemas de acidez.

Tal como se observa, en la cuenca de la quebrada La Baja no se identificaron drenajes con problemas de acidez diferentes de los que ya se habían identificado con el muestreo, sin embargo, al sur de la cuenca, se identificaron problemas de acidez en el río Vetás.

Las tres muestras de validación fueron clasificadas en el rango de pH correcto (**Tabla 4.7**), lo cual permite validar la correspondencia existente entre los números digitales de los píxeles en la banda 3 y el pH de los sedimentos.

Figura 4-11. Clasificación de imagen Landsat del área de estudio

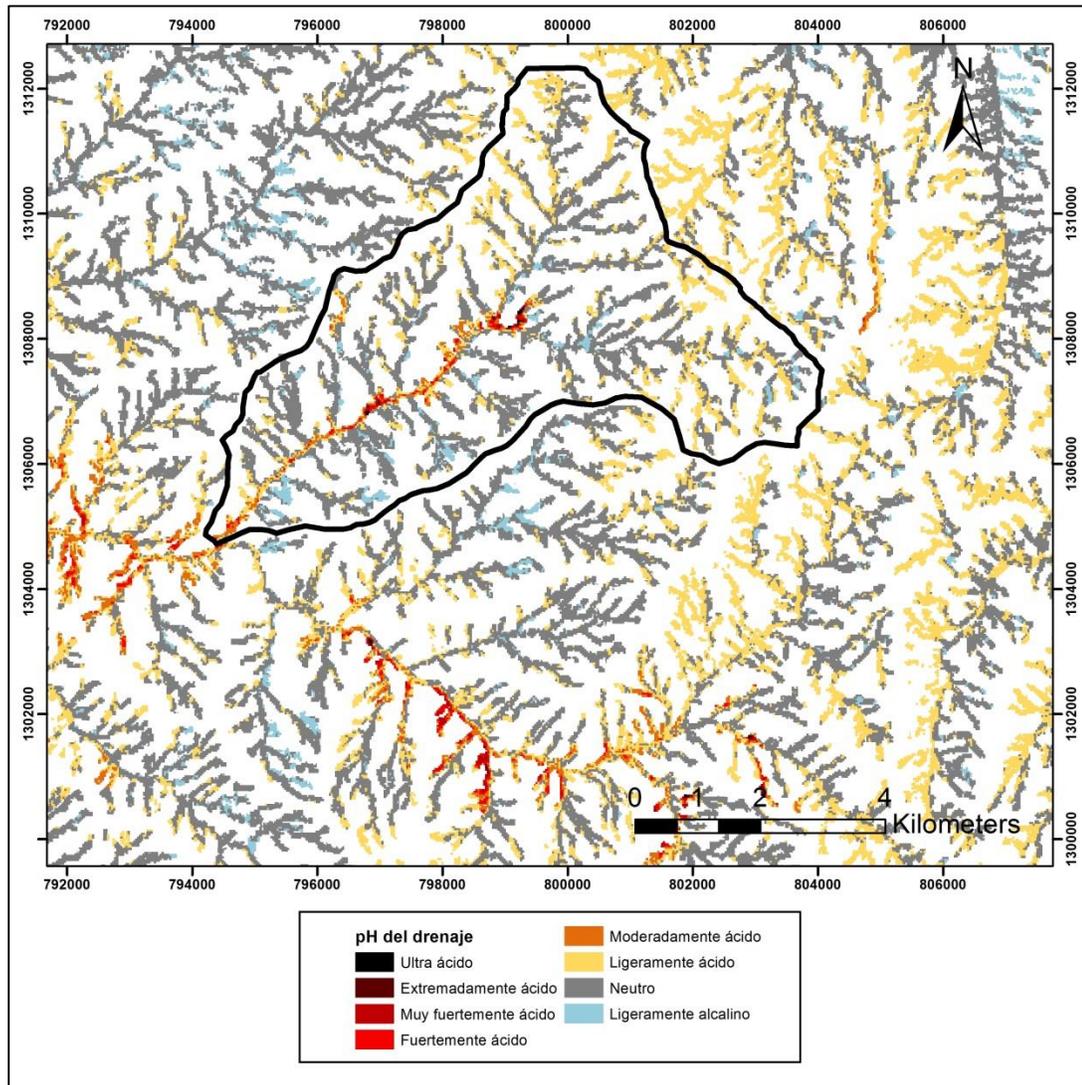


Tabla 4.7. Clasificación del pH de las muestras de validación

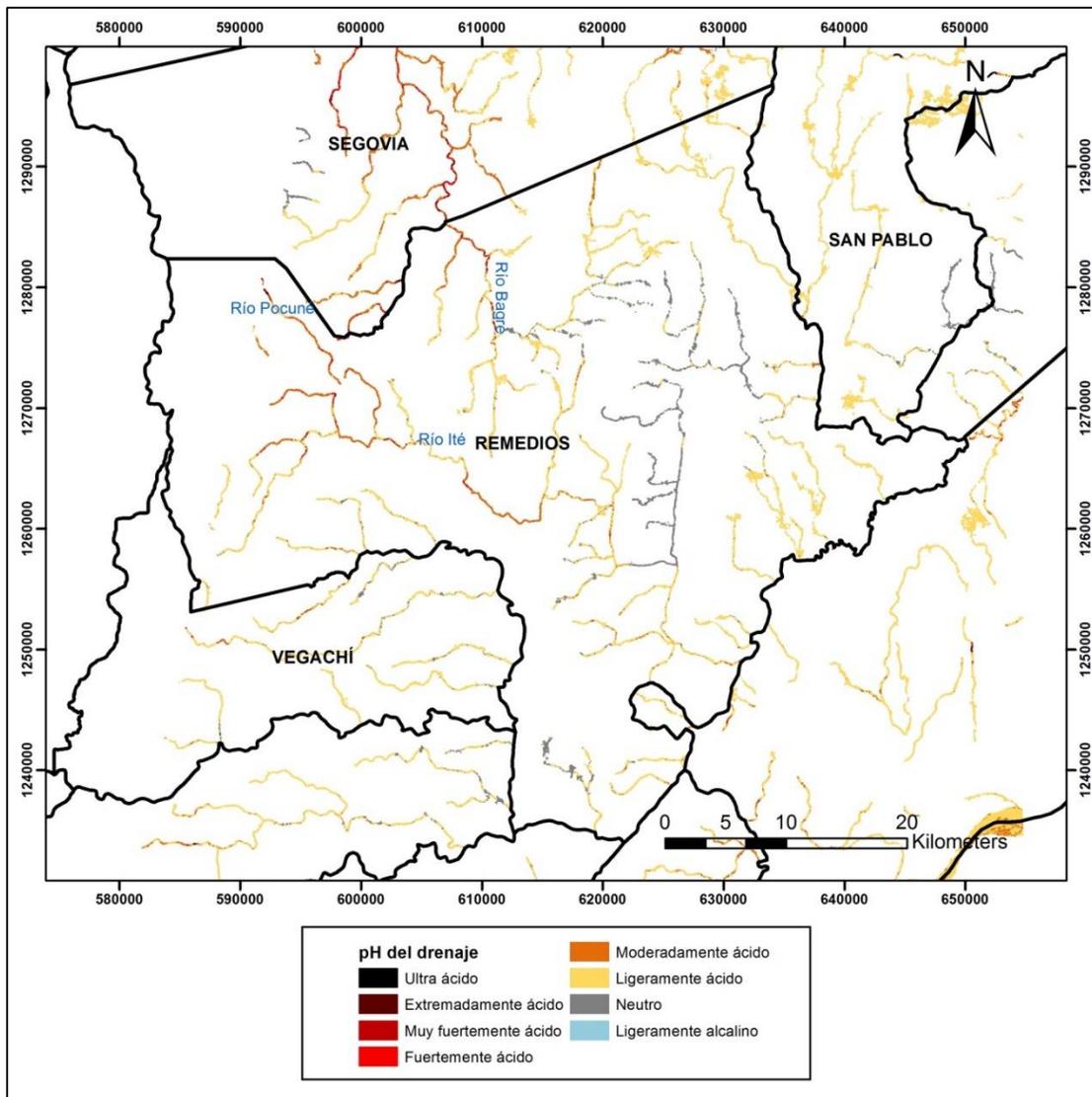
Código de la muestra	pH	Clasificación del pH	Clasificación del pH en la imagen Lansat
M04	7.0	Neutro	Neutro
M12	5.9	Moderadamente ácido	Moderadamente ácido
M18	5.4	Fuertemente ácido	Fuertemente ácido

Las clases definidas con base en la correlación de la banda 3 y el pH no son aplicables en otras imágenes, dado que la reflectancia de una misma cobertura en otra imagen

podría ser mayor o menor de acuerdo con las condiciones de luz o con fenómenos como la dispersión.

Con base en las clases definidas para la imagen Landsat del área de estudio y teniendo en cuenta las diferencias de reflectancia, se definieron las clases para una imagen de satélite Landsat del municipio de Remedios en el Nordeste antioqueño, este municipio hace parte del distrito minero Segovia-Remedios, en donde se han reportado problemas de contaminación de drenajes generados por la actividad minera. (Contraloría General de la República 2014). En la **Figura 4-12** se muestran los resultados de la clasificación.

Figura 4-12. Clasificación de imagen Landsat del municipio de Remedios Antioquia



De acuerdo con los resultados, la mayoría de los drenajes del municipio de Remedios tienen un pH aceptable, que varía entre ligeramente ácido y neutro; sin embargo al noroccidente del municipio, cerca de su límite con el municipio de Segovia, se observan problemas de acidez en el río Ité, en el río Pocuné y en el río Bagre, drenajes en los que de acuerdo con la bibliografía se tienen problemas de contaminación generados por la descarga directa de efluente provenientes de la actividad minera (Contraloría General de la República 2014).

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En la parte alta de la cuenca de estudio el pH es neutro, sin embargo, en la parte baja de la cuenca se tiene una zona con problemas de acidez que coincide con la localización de los centros de explotación minera.

Entre las longitudes de onda 375 y 935 nm se tiene una correlación lineal entre el pH y el porcentaje de reflectancia de los sedimentos. Los sedimentos de pH ácido presentan una mayor reflectancia, alcanzando diferencias de hasta un 50% con respecto a la reflectancia de los sedimentos de pH neutro a alcalino.

La diferencia entre la reflectancia de los sedimentos de diferente pH puede ser explicada a través del comportamiento espectral de los óxidos de hierro: en el rango espectral de 375 a 935 nm, la jarosita y la schwertmannita, que solo aparecen en sedimentos de pH ácido, tienen mayor reflectancia que la ferrihidrita que solo aparece en sedimentos de pH neutro a ligeramente alcalino.

El máximo de reflectancia espectral a_1 está localizado en el intervalo espectral de 400-410 nm para los sedimentos de menor pH y entre 390 y 400 nm para los sedimentos de pH neutro a alcalino, mientras que el máximo de reflectancia espectral a_2 está localizado entre 780 y 790 nm para los sedimentos de pH ácido y entre 800 y 810 para los sedimentos de pH neutro a alcalino.

Los sedimentos de pH ácido tienen una alta reflectancia en las longitudes de onda de la banda 42 de las imágenes Aviris y su reflectancia en las longitudes de onda de la banda 64 de estas mismas imágenes, tiende a cero. Así, la razón entre el porcentaje de

reflectancia de las bandas 42 y 64 (B42/B64) de estas imágenes permitiría identificar aquellos sedimentos de pH ácido y entonces de forma indirecta identificar los drenajes con problemas de acidez. Por otra parte, en las imágenes Aviris es posible, usando la información de las librerías espectrales, identificar de forma directa los minerales jarosita y schwertmannita, que, de acuerdo con los análisis de laboratorio, solo aparecen en sedimentos de pH ácido, y ferrihidrita que solo aparece en sedimentos de pH neutro a ligeramente alcalino.

Por su baja resolución espectral, en las imágenes Landsat, la curva espectral de todos los sedimentos tiene un comportamiento ascendente similar y las razones entre el porcentaje de reflectancia en las diferentes bandas son muy parecidas para todos los sedimentos. Sin embargo, la reflectancia espectral se mantiene considerablemente mayor para los sedimentos de menor pH. Así, en el tratamiento digital de estas imágenes se encontró una alta correlación entre el pH de los sedimentos y el número digital de los píxeles en las bandas 1, 2 y 3, con una correlación del 82%, 84% y 85% respectivamente, siendo mayores los números digitales de los píxeles correspondientes a sedimentos de pH ácido; lo cual permitió identificar, de forma indirecta, aquellos drenajes con problemas de acidez en el área de estudio.

En el tratamiento digital de las imágenes de satélite para la identificación de los DAM, es importante tener en cuenta la temporalidad, puesto que la fecha de captura de las imágenes debe ser posterior al inicio de las actividades de explotación mineral; además es importante contar con imágenes en las que se tengan los drenajes descubiertos, puesto que cuando están cubiertos por la vegetación, los píxeles tienen valores de reflectancia diferentes.

5.2 Recomendaciones

Los DAM identificados en el área de estudio deberían ser reportados a la entidad ambiental encargada, con el propósito de que se aplique alguna de las técnicas existentes de neutralización, como la adición de cal por ejemplo, que es una de las técnicas más utilizadas por su bajo costo y alta eficiencia, y así recuperar estas zonas con problemas de acidez.

Un análisis multitemporal, es decir, un análisis de imágenes de satélite de diferentes fechas, permitiría identificar los cambios en la reflectancia espectral de los sedimentos y así establecer, de forma aproximada, el momento de generación de los DAM y monitorear los cambios de acidez en los drenajes.

Se recomienda la adquisición de imágenes hiperespectrales y el uso de las librerías espectrales de los minerales óxidos de hierro asociados a los sedimentos de cada rango de pH para identificar de forma inequívoca los drenajes con problemas de acidez y comparar los resultados con los resultados que, usando imágenes multiespectrales, se obtuvieron en este trabajo.

La identificación de DAM a través del tratamiento digital de imágenes de satélite de otras zonas mineras del país, junto con la verificación en campo del pH de los sedimentos, permitiría validar la aplicabilidad de los resultados de este trabajo en el resto del territorio nacional.

A. Anexo: firmas espectrales de las muestras de sedimento

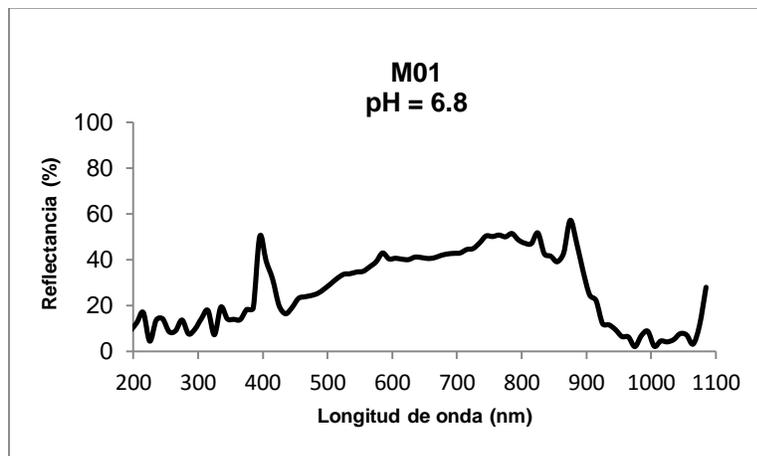


Figura A- 1. Firma espectral de la muestra M01

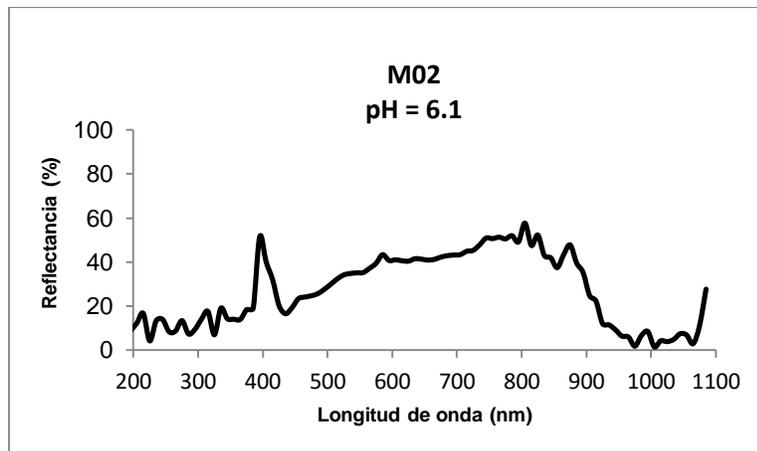


Figura A- 2. Firma espectral de la muestra M02

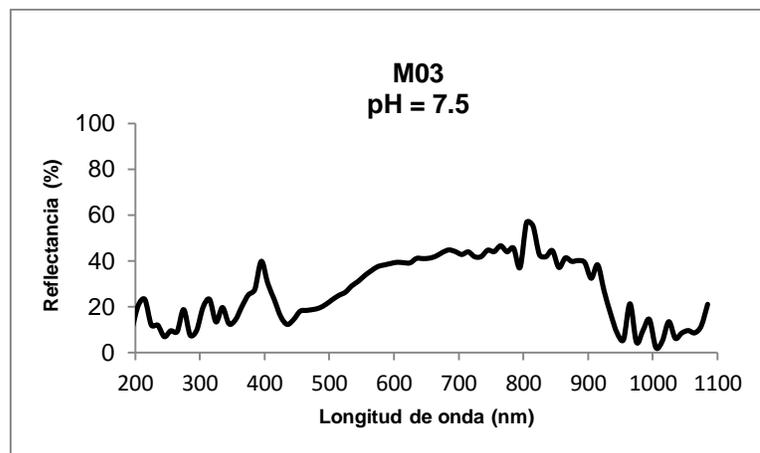


Figura A- 3. Firma espectral de la muestra M03

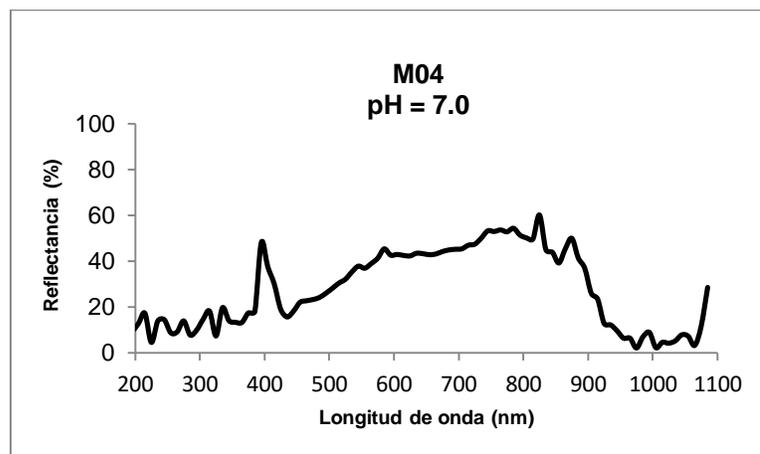


Figura A- 4. Firma espectral de la muestra M04

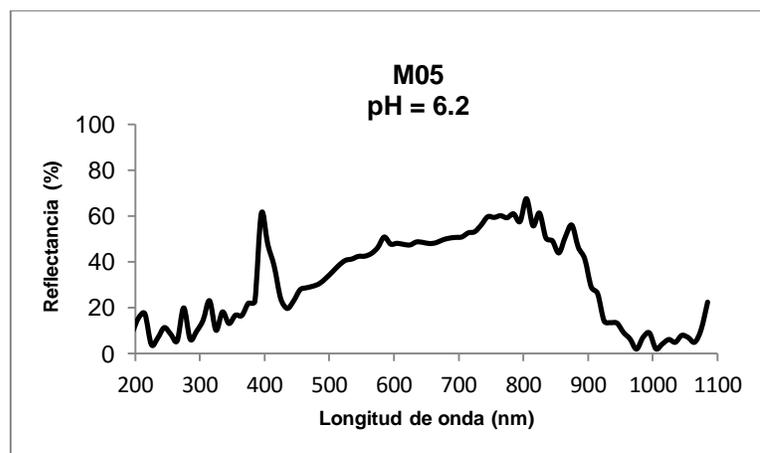


Figura A- 5. Firma espectral de la muestra M05

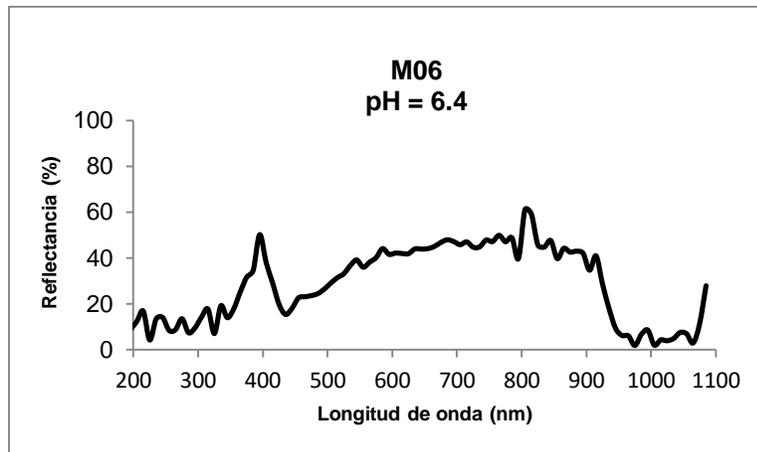


Figura A- 6. Firma espectral de la muestra M06

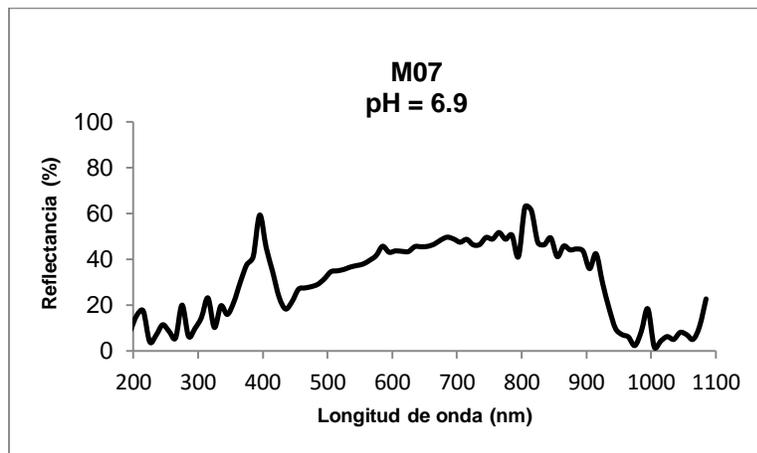


Figura A- 7. Firma espectral de la muestra M07

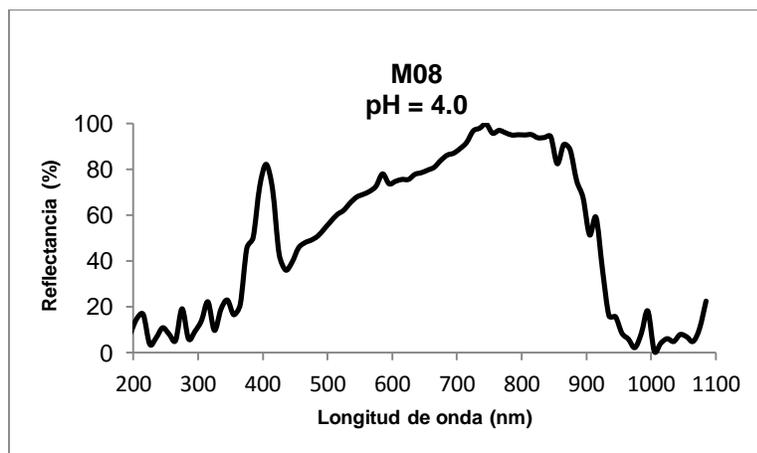


Figura A- 8. Firma espectral de la muestra M08

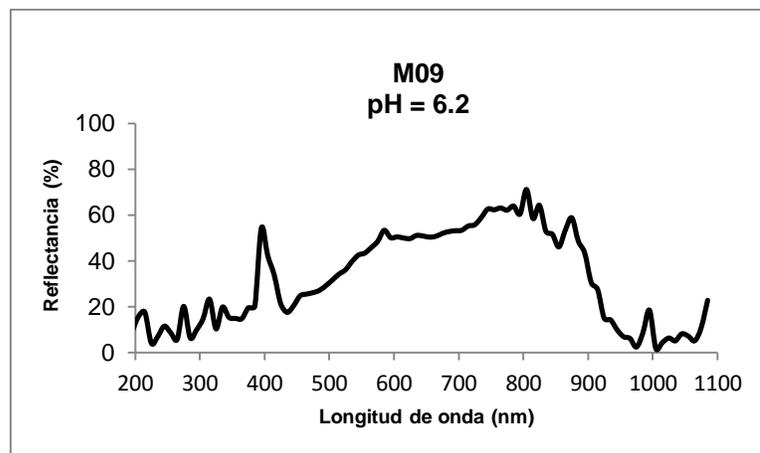


Figura A- 9. Firma espectral de la muestra M09

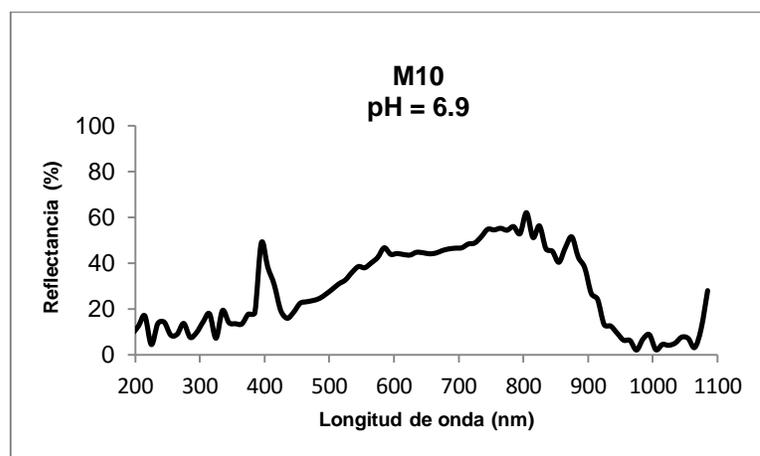


Figura A- 10. Firma espectral de la muestra M10

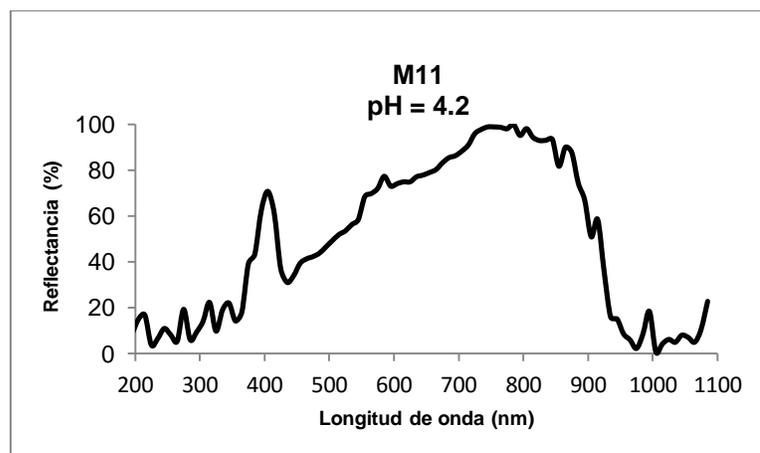


Figura A- 11. Firma espectral de la muestra M11

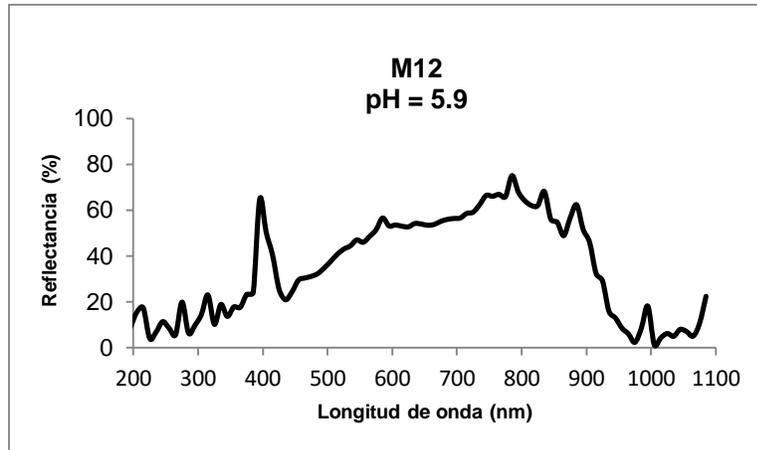


Figura A- 12. Firma espectral de la muestra M12

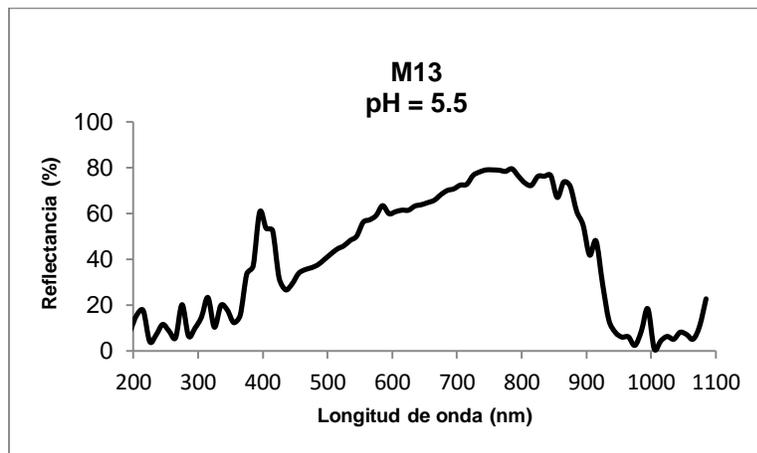


Figura A- 13. Firma espectral de la muestra M13

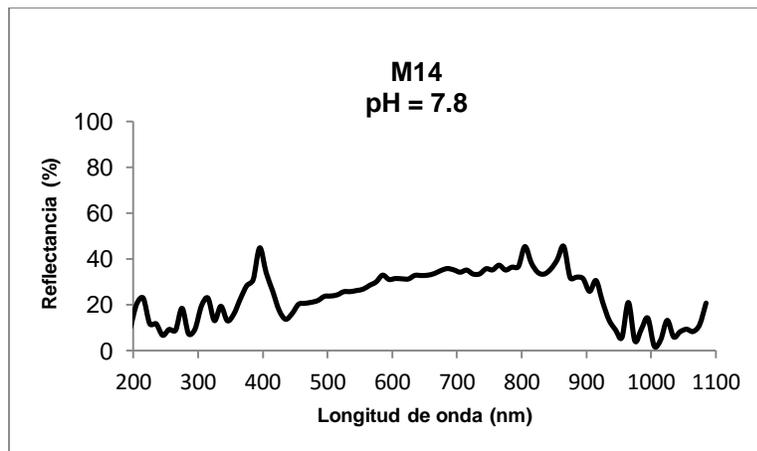


Figura A- 14. Firma espectral de la muestra M14

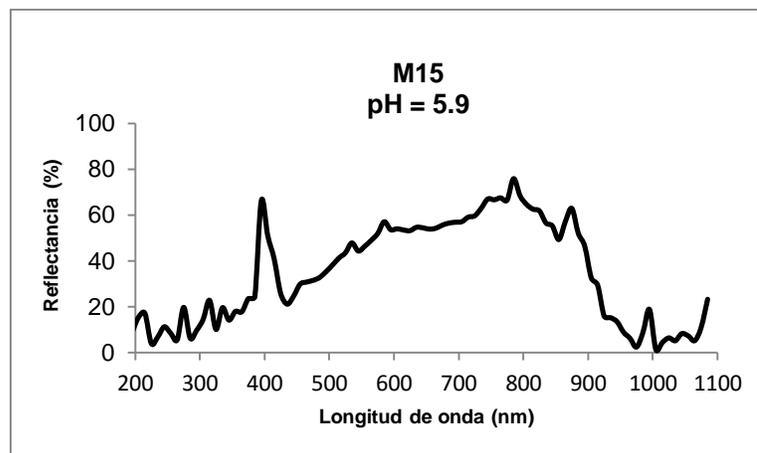


Figura A- 15. Firma espectral de la muestra M15

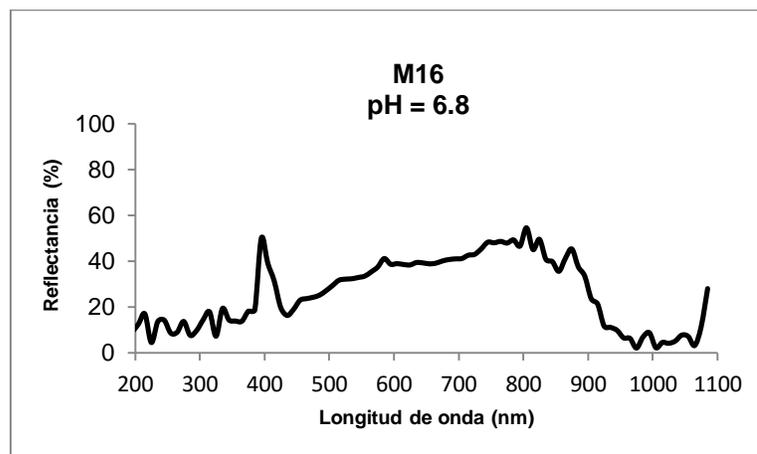


Figura A- 16. Firma espectral de la muestra M16

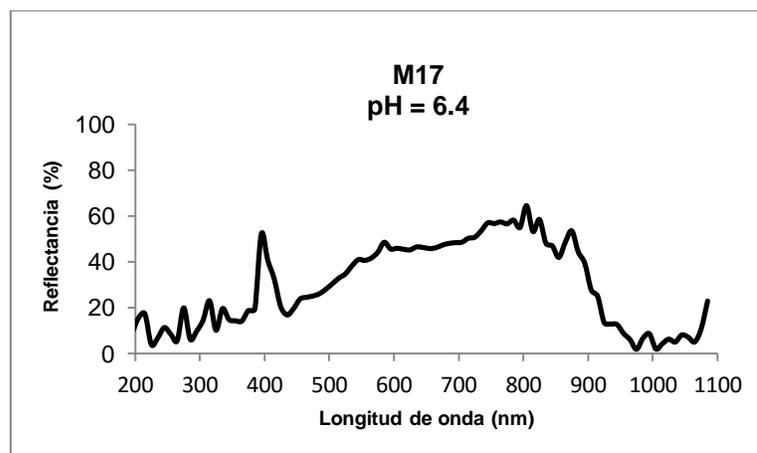


Figura A- 17. Firma espectral de la muestra M17

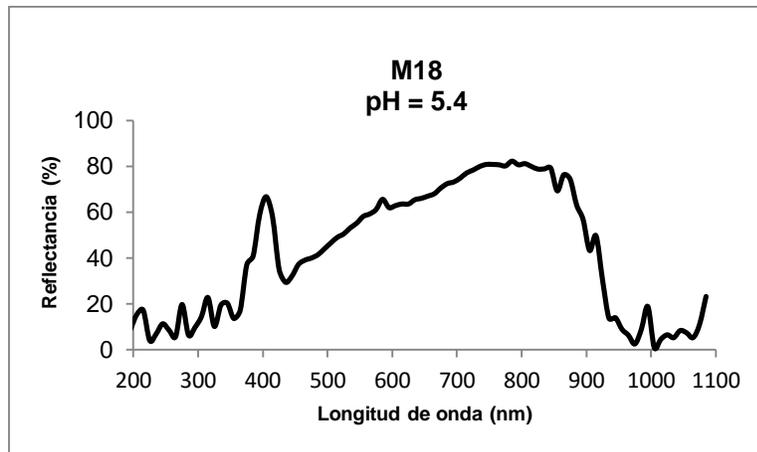


Figura A- 18. Firma espectral de la muestra M18

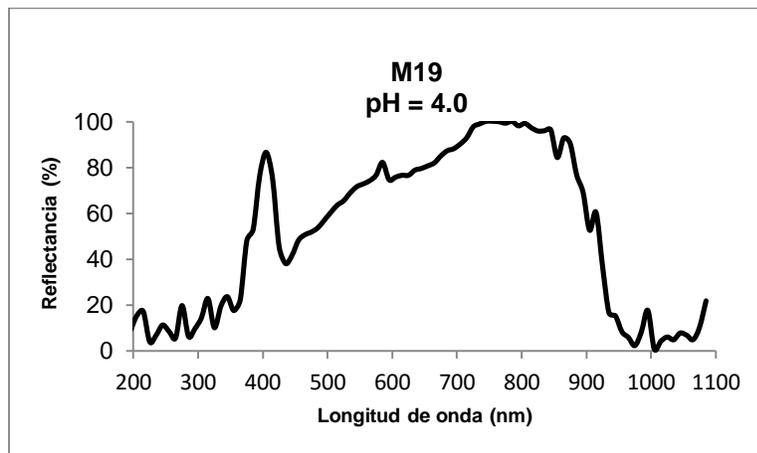


Figura A- 19. Firma espectral de la muestra M19

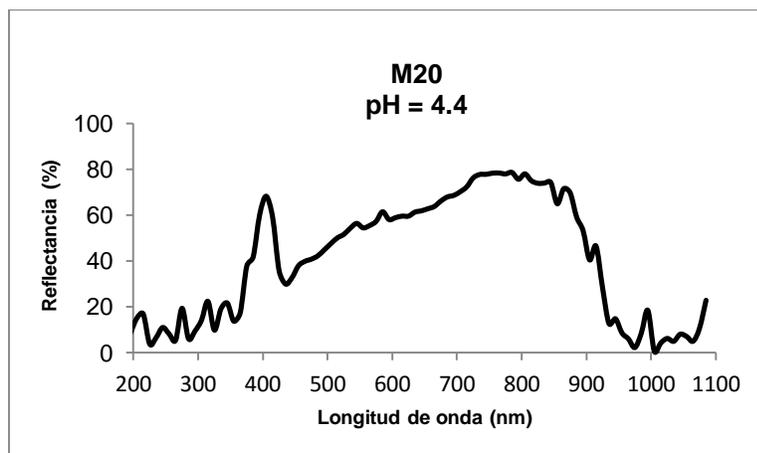


Figura A- 20. Firma espectral de la muestra M20

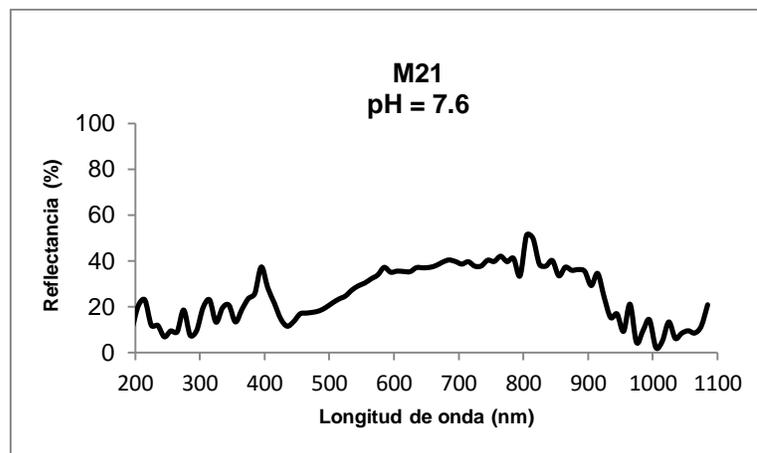


Figura A- 21. Firma espectral de la muestra M21

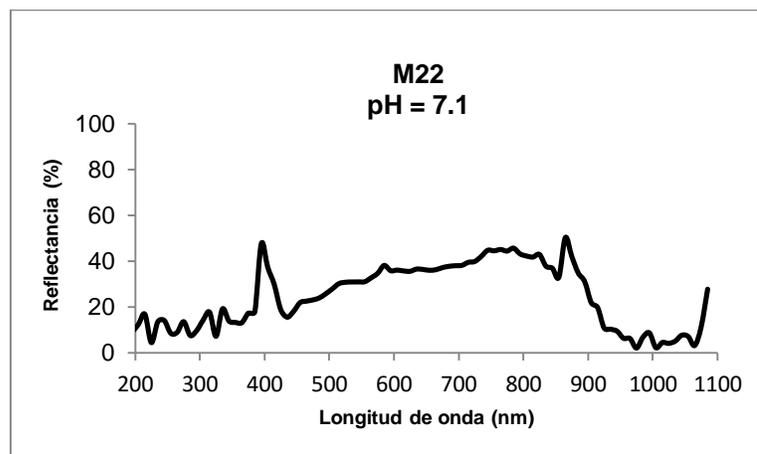


Figura A- 22. Firma espectral de la muestra M22

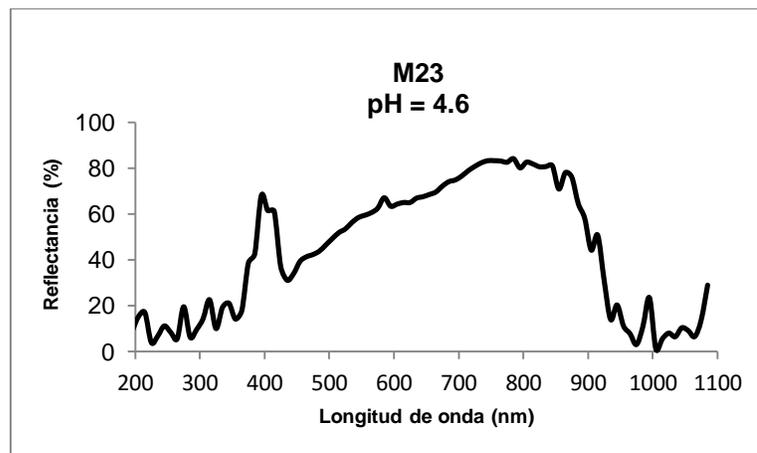


Figura A- 23. Firma espectral de la muestra M23

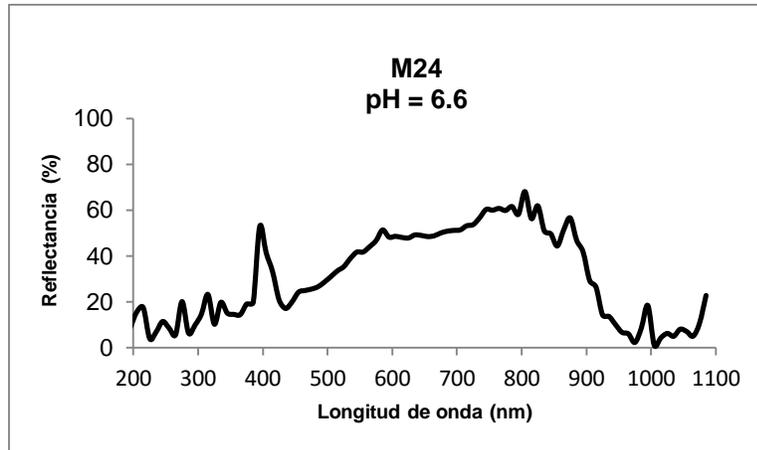


Figura A- 24. Firma espectral de la muestra M24

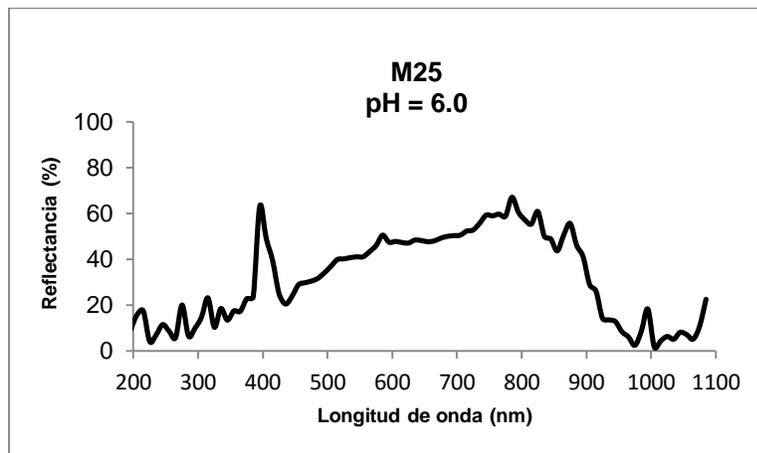


Figura A- 25. Firma espectral de la muestra M25

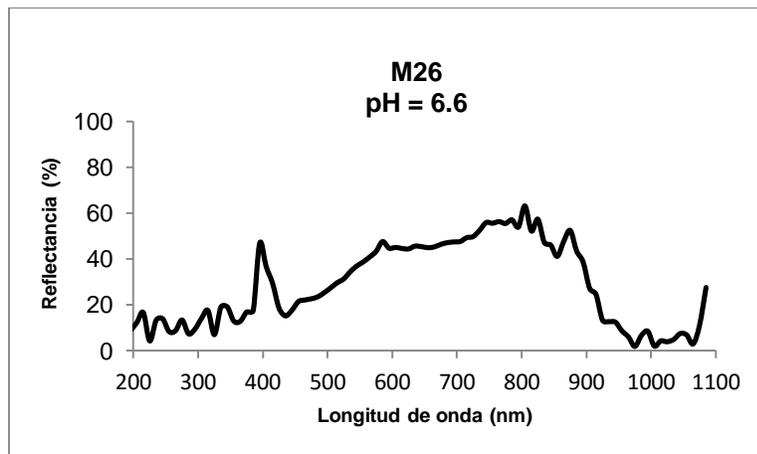


Figura A- 26. Firma espectral de la muestra M26

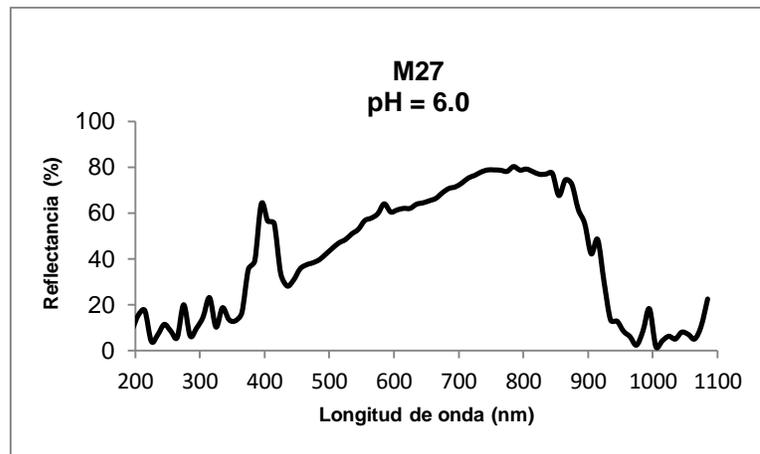


Figura A- 27. Firma espectral de la muestra M27

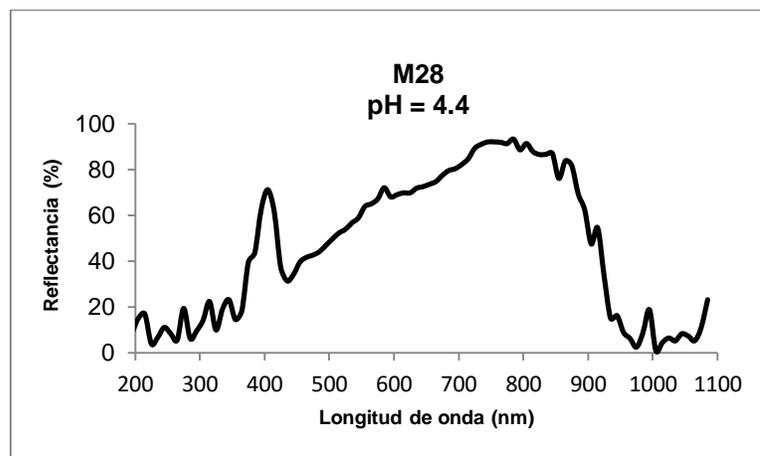


Figura A- 28. Firma espectral de la muestra M28

6. Bibliografía

- Akcil, A, y S Koldas. «Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies.» *Journal of Cleaner Production*, 2006: 1139-114.
- Arango, Marcela, y Yris Olaya. «Problemática de los pasivos ambientales mineros en Colombia.» *Gestion y Ambiente*, 2012: 125-133.
- Blowes, D. W., C. J. Ptacek, J. L. Jambor, y C. G. Weisener. «The geochemistry of acid mine drainage.» *Treatise on Geochemistry* 9 (2003): 149-204.
- Choe, E, F Van Der Meer, F Van Ruitenbeek, H Van Der Werff, B De Smeth, y K Woong Kim. «Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: a case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain.» *Remote Sensing of Environment*, 2008: 3222-3233.
- Congreso de Colombia. «Ley 685 de 2001. Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.» Bogotá, 2001.
- Congreso de Colombia. «Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA y se dictan otr.» Bogotá., 1993.
- Contraloría General de la República. «Contraloría General de la República.» 5 de Agosto de 2014. http://www.contraloriagen.gov.co/documents/10136/182814564/FA_2014EE0131029_ContaminacionCianuro.pdf/16f5e05c-cfdb-44f9-a155-e21b26993df3 (último acceso: 29 de 04 de 2015).
- Contraloría General de la República. «La explotación ilícita de recursos minerales en Colombia - Efectos sociales y ambientales.» Bogotá, 2012.
- Curtis D., Mobley. «Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements.» *Curtis D. Mobley*, 1999: 7442-7455.

- DANE. *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. 2005. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/pH_12.pdf (último acceso: 25 de 03 de 2014).
- Díaz Álvarez, Johanna. «Tratamiento biológico como alternativa para disminuir el impacto ambiental ocasionado por el drenaje generado por la actividad minera en el municipio de Marmato Caldas.» Manizales, 2013.
- Dirección General de Asuntos Ambientales Ministerio de Energía y Minas. «Guía Ambiental para el Manejo de Drenajes Ácidos de Mina.» s.f.
- Dold, B. «Aguas ácidas: formación, predicción, control y prevención.» *Minería*, 2003: 29-37.
- Escobar, Andrés, y Humberto Martínez. «El sector minero colombiano actual.» 2012.
- Espaciais, Instituto Nacional de Pesquisas. *Divisão de Processamento de Imagens*. 2014. <http://www.dpi.inpe.br/> (último acceso: 23 de 02 de 2015).
- Ferrier, G, K A Hudson, y R j Pope. «Characterisation of the environmental impact of the Rodalquilar mine, Spain by ground-based reflectance spectroscopy.» *Journal of Geochemical Exploration*, 2009: 11-19.
- Hauff, P, D Coulter, D Peters, M Sares , E Prosh, y F Henderson. «Using AVIRIS in the NASA BAA Project to evaluate the impact of natural acid drainage on Colorado watersheds.» *Colorado Geological Survey*, 2005: 2-11.
- Hoffert, Raymund. «Acid mine drainage.» *Industrial & Engineering Chemistry* 5, nº 39 (1947): 642-647.
- ITC, Unesco. «Capacity Building for Natural Disaster Reduction.» *Aplicación de Sistemas de Información Geográfica y Sensores Remotos para el Análisis de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo*. 2008. <http://www.itc.nl/external/unesco-rapca/Presentaciones%20Powerpoint/02%20Introduccion%20Sensores%20Remotos/Introduccion%20Sensores%20Remotos.pdf> (último acceso: 24 de 02 de 2015).
- Kemper, T, y S Sommer. «Estimate of heavy metal contamination in soils after a mining accident using reflectance spectroscopy.» *Environmental Science and Technology*, 2002: 2742-2747.

- López Pamo, E., O. Aduvire, y D. Baretino. «Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro.» *Boletín Geológico y Minero* 1, n° 113 (2002): 3-21.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio, y E. Moran. «Assessment of atmospheric correction methods for Landsat TM data applicable to Amazon basin LBA research.» *International Journal of Remote Sensing*, 2002: 2651-2671.
- Lutterotti, Luca . «Introduction to diffraction and the Rietveld method.» 2012. <http://www.ing.unitn.it/~luttero/laboratoriomateriali/RietveldRefinements.pdf> (último acceso: 26 de 01 de 2015).
- Martínez Londoño, Edgar Alberto. «Remoción de sulfatos de drenajes ácidos de minería de carbón para producción de yeso sintético mediante el uso de un subproducto industrial.» Medellín, 2010.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. «Resolución 0631.» Bogotá, 2015.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Agencia Nacional de Licencias Ambientales*. 2014. <http://www.anla.gov.co/> (último acceso: 25 de Febrero de 2015).
- Ministerio de Minas y Energía. «Distritos mineros: exportaciones e infraestructura de transporte.» Bogotá, 2005.
- Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Medio Ambiente. «Guía minero ambiental de explotación.» Bogotá, 2014.
- Montero, I, G Brimhall, C Alpers, y G Swayze. «Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping.» *Chemical Geology*, 2005: 453-472.
- Paterson, N. «Remote Mapping of Mine Wastes.» *Proceedings of Exploration 97*, 1997: 905-916.
- Peña Ortiz, Javier, y William Pérez Vega. «Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM).» Bucaramanga, 2009.
- Riaza, Asunción, C Ong, y Andreas Müller. «Pyrite mine wastes hyperspectral monitoring as a tool to detect climate change.» *Conference Proceedings*, 2007: 227-232.

- Riaza, Asunción, Jorge Buzzi, Eduardo García, Veronique Carrère, y Andreas Müller. «Monitoring the Extent of Contamination from Acid Mine Drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) Using Hyperspectral Imagery. .» *Remote Sensing*, 2011: 2166-2186.
- Sares, M, P Hauff, D Peters, D Coulter, D Bird, y F Henderson. «Characterizing sources of acid rock drainage and resulting water quality impact using hyperspectral remote sensing—Examples from the upper Arkansas river basin, Colorado.» *Advanced integration of geospatial technologies in mining reclamation*, 2004: 7-9.
- Servicio Geológico Colombiano. «Documento técnico para el muestreo geoquímico de sedimentos finos activos o de lecho seco.» Bogotá, 2013.
- Servicio Geológico Colombiano. «Mapa geológico generalizado del departamento de Santander.» 2001.
- . *Sistema de Información Minero Colombiano*. 2014. <http://www.simco.gov.co/> (último acceso: 1 de 12 de 2014).
- Song, Conghe, Curtis Woodcock, Karen Seto , Mary Lenney, y Scott Macomber. «Classification and change detection using landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects?» *Remote Sensing of Environment*, 2001: 230-244.
- United States Department of Agriculture, USDA. «Soil quality test kit guide.» 1999.
- Universidad de Granada. «Cristalografía - Difracción de rayos X.» 2009. http://www.ugr.es/~olopez/estruct_macromol/difracc_rayos_x/DRX.pdf (último acceso: 26 de 01 de 2015).
- USGS y Japan ASTER Program. *Global Land Cover and Facility*. 2003. www.landcover.org (último acceso: 15 de Junio de 2014).
- Velasco, Francisco, Ana Alvaro, Saioa Suárez, José Miguel Herrero, y Iñaki Yusta. «Mapping Fe-bearing hydrated sulphate minerals with short wave infrared (SWIR) spectral analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain).» *Journal of Geochemical Exploration*, nº 87 (2005): 45-72.
- Walsworth, N, y D King. «Image modelling of forest changes associated with acid mine drainage.» *Computers Geosciences*, 1999: 567-580.
- Williams, David, Jerry Bigham, Charles Cravotta, Sam Traina, John Anderson, and John Lyon. "Assessing mine drainage pH from the color and spectral reflectance of chemical precipitates." *Applied Geochemistry*, 2002: 1273-1286.

Wu, Y, J Chen, Q Tian, y X Wu. «Feasibility of reflectance spectroscopy for the assessment of soil mercury contamination.» *Environmental Science and Technology*, 2005: 873-878.