

**TRATAMIENTO BIOLÓGICO COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR EL
IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR EL DRENAJE ÁCIDO,
GENERADO POR LA ACTIVIDAD MINERA EN EL MUNICIPIO DE
MARMATO- CALDAS**

JOHANNA DÍAZ ÁLVAREZ

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES**

2013

**TRATAMIENTO BIOLÓGICO COMO ALTERNATIVA PARA DISMINUIR EL
IMPACTO AMBIENTAL OCASIONADO POR EL DRENAJE ÁCIDO,
GENERADO POR LA ACTIVIDAD MINERA EN EL MUNICIPIO DE
MARMATO- CALDAS**

JOHANNA DÍAZ ÁLVAREZ

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar
el título de Magister en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente

Asesor de Tesis
PhD.Francy Nelly Jiménez García

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES
MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE
MANIZALES
2013**

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico principalmente a mi Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, por guiarme por el buen camino y darme la fortaleza para continuar y no desmayar en los problemas que se presentaban.

Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres Margarita Álvarez y José Alirío Díaz, siempre los he sentido presentes en mi vida, demostrándome su amor, ayudándome a salir adelante en los momentos más difíciles, sé que están orgullosos de la persona en la cual me he convertido.

A mi esposo Alexander Mejía por la confianza, paciencia, la espera y el apoyo que me brindó todo este tiempo.

A esa personita que amo con toda mi vida, mi hija Manuela quien ha sido y es mi razón de vida, mi motivación, inspiración y felicidad, gracias por existir.

Gracias a todas las personas que ayudaron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

Agradecimiento

A mi directora de tesis la Dra. Francly Nelly Jiménez, por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su paciencia y su motivación me permitieron aprender mucho más que lo estudiado en el proyecto y terminar mis estudios con éxito.

A la empresa MEDORO RESOURCES LTD. por brindarme todo el apoyo económico y técnico para realizar las pruebas.

A todas las directivas de la Universidad de Manizales por su apoyo y colaboración para la realización de la maestría.

Al PH D James R. Kunkel, Ing. Nancy Jiménez, Ing. Mónica Osorio por su participación, colaboración y asesoría técnica en el proyecto.

A la Esp. Esperanza Valencia rectora de la Institución Educativa Marmato por brindarme el espacio y el tiempo para realizar mi estudio.

A mis colegas, compañeros y amigos por su colaboración y apoyo en el cubrimiento de mi trabajo.

Y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron o participaron en la realización de esta investigación, hago extensivo mi más sincero agradecimiento.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

RESUMEN

La generación de Drenaje Ácido de Mina (DAM) en las actividades mineras es y será un problema ambiental muy preocupante, que tiene que ser corregido por los actores de las operaciones. Este tipo de drenaje es el agua contaminada originada de la explotación minera, ya sea superficial o profunda, típicamente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. El DAM es el mayor problema ambiental provocado por la industria minera y es también su mayor pasivo, especialmente para las corrientes de agua. Una mina generadora de ácido tiene el potencial para causar un impacto devastador a largo plazo en los ríos, arroyos y vida acuática, volviéndose en efecto, una "máquina de contaminación perpetua".

Por lo anterior, en el presente trabajo se realizó un estudio sobre el DAM de la Mina Cascabel ubicada en el Municipio de Marmato Caldas, importante zona minera de Colombia, que hasta el momento no realiza ningún tipo de tratamiento de este tipo a las aguas residuales de sus procesos mineros. De acuerdo a los resultados de los análisis se encontró que el drenaje presentaba metales pesados como: Cobre, cromo, hierro y plomo, así como sólidos suspendidos en valores por debajo de los límites permitidos y otros metales como: aluminio, arsénico, cadmio, manganeso, mercurio y zinc los cuales sobrepasan los límites permitidos por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible. Además se evidenció la presencia de sulfatos y valores de pH por fuera del límite permitido. Estas aguas estaban siendo liberadas a la quebrada Cascabel, siendo esta una de las razones por las cuales el agua de la mina Cascabel está generando contaminantes al ambiente, al suelo y al agua.

Por tal razón se implementó en prueba piloto un tratamiento inicial al drenaje de la mina con el fin de determinar qué impacto ambiental benéfico ocasionaría. Este tratamiento consistió en un sistema reductor y productores de alcalinidad, en el que se utilizó Hidróxido de Sodio, que además de neutralizar las aguas

ácidas, perjudican la oxidación de los sulfuros y elimina los metales pesados volviéndolos insolubles.

Después de realizar los análisis del agua tratada se encontró que se reduce la presencia de algunos elementos como: cobre, hierro, aluminio, cadmio, manganeso, zinc; aunque se reduce la concentración de estos metales sólo el aluminio, cobre y el hierro quedan con valores por debajo de los permitidos mientras los demás (cadmio, manganeso y zinc) aún están presentes y en cantidades que sobrepasan los límites permitidos.

Se encuentra además un aumento considerable en la alcalinidad (pasa de valores alrededor de 4, a valores alrededor de 8) de las aguas del drenaje ácido lo cual es un alivio para el medio ambiente de la quebrada Cascabel.

De estos resultados se plantea una propuesta para un tratamiento posterior que podría disminuir a niveles aceptables los metales aún presentes.

ABSTRACT

Generating Acid Mine Drainage (AMD) in mining is and will be an environmental problem of great concern, which has to be corrected by the actors of operations. This type of drain is contaminated water caused by mining, either superficial or deep, typically high acidity, rich in sulfate and elevated levels of heavy metals, especially iron, manganese and aluminum. The DAM is the biggest environmental problem caused by the mining industry and is also its greatest liability, especially for streams. An acid-generating mine has the potential to cause a devastating impact long term in rivers, streams and aquatic life, becoming in effect a "perpetual polluting machine".

Therefore, in the present work, a study on the DAM of the Mine Cascabel located in the Municipality of Caldas Marmato, a major mining area of Colombia, so far not done any treatment to wastewater processes miners. According to the analysis results found that the drain had heavy metals such as copper, chromium, iron and lead and suspended solids levels below allowable limits and other metals such as aluminum, arsenic, cadmium, manganese, mercury and zinc which exceed the limits allowed by the Ministry of Environment and Sustainable Development. It also showed the presence of sulfate and pH values over the limit. These waters were being released into the broken bell, which is one of the reasons why the mine water Cascabel is generating pollutants into the environment, soil and water.

For this reason was implemented in pilot initial treatment to mine drainage in order to determine what environmental impact charitable cause. This treatment consisted in a reducing system and producing alkalinity, which was used sodium hydroxide, which also neutralize acidic waters and hamper sulphide oxidation and removes heavy metals making them insoluble.

After the wastewater treatment analysis was performed a reduction in the presence of some elements such as copper, iron, aluminum, cadmium,

manganese, zinc was found; even though lower concentrations were quantified, copper and iron values were within the acceptance range.

A significant increase in alkalinity (pass values around 4 to values around 8) of the waters of acid drainage was also registered; which is a relief to the environment of the gorge Cascabel.

From these results it is presented a proposal for further treatment that may reduce to acceptable levels, the metals still present.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN.....	9
CAPÍTULO 1: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN.....	11
1.1 Planteamiento del problema.....	11
1.2 Justificación.....	13
1.3 Objetivos.....	18
1.3.1 Objetivo General.....	18
1.3.2 Objetivos Específicos.....	18
CAPÍTULO 2. HISTORIA DE LA MINERÍA.....	20
2.1 Actividad Minera en América.....	20
2.2 Actividad Minera en Colombia.....	22
2.2.1 Antecedentes históricos:.....	22
2.2.2 Desempeño reciente de la minería:.....	24
2.2.3 Ingresos de la Nación.....	25
2.2.4 Composición de la minería en Colombia.....	26
2.3 Actividad Minera en el municipio de Marmato.....	27
2.3.1 Su ubicación.....	27
2.3.2 Su conformación geológica.....	29
2.3.3 Sus zonas mineras.....	30
2.3.4 Su explotación minera.....	31
2.3.5 Su impacto económico en el país.....	35
2.3.6 Bases para el ordenamiento geoambiental área minera de Marmato.....	36
Capítulo 3. MARCO TEÓRICO.....	43
3.1. Drenaje ácido.....	43
3.1.1 Definición:.....	43
3.1.2 Problemática de los drenajes ácidos de minas.....	44
3.1.3 Generación de aguas ácidas.....	46
3.1.4 Control del DAM.....	50

3.2. Impacto de metales sobre el medio ambiente y la salud humana.	53
3.3. Antecedentes de tratamientos del DAM.....	58
CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	64
4.1. Ubicación del muestreo	64
4.2. Metodología	65
4.2.1 Caracterización fisicoquímica del agua.....	66
4.2.2 Selección de una alternativa de tratamiento	68
4.2.3 Implementación del tratamiento en prueba piloto	69
4.2.4 Planteamiento de una propuesta concreta	70
CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	71
5.1. Caracterización fisicoquímica del agua. Prueba preliminar	71
5.2. Implementación del tratamiento.....	74
5.3. Interpretación y discusión de resultados	76
5.4. Propuesta concreta.....	79
CAPITULO 6. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES.....	81
6.1 Conclusiones	81
6.2 Recomendaciones	83
BIBLIOGRAFÍA	84

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1, Porcentaje de municipios por departamento que tienen minería de hecho	16
Figura 2. Mapa de la geografía de Marmato	29
Figura 3. Explotación del Oro Tecnificada y Artesanal	34
Figura 4. Forma natural de la pirita	44
Figura 5. Ubicación de la mina cascabel	66
Figura 6. Vertimiento de drenaje y deterioro ambiental	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tributación minera	26
Tabla 2. Parámetros a monitorear en los vertimientos puntuales de aguas residuales.	69
Tabla 3. Comparación de los resultados de los análisis y los límites permitidos. ..	72
Tabla 4. Resultados de análisis de aguas de la mina Cascabel después de la prueba piloto..	75
Tabla 5. Promedio pruebas preliminares y promedio de pruebas pilotos de análisis de aguas de la mina Cascabel.....	76

INTRODUCCIÓN

La industria de explotación minera es una de las actividades más problemáticas en todo el mundo. La extracción minera y su proceso son fuente de muchos contaminantes que están dispuestos en el ambiente, de ahí la contaminación del agua, el suelo y el aire. La exposición de los minerales sulfurosos al aire, agua, procesos microbianos y oxidación, produce drenaje ácido de mina, caracterizado por su alta acidez y alta cantidad de metales pesados disueltos. Cuando esta agua contaminada alcanza los cuerpos del agua, ocurrirán alteraciones del ecosistema. La flora y la fauna pueden ser afectadas y los recursos hídricos pueden tornarse dañinos para el consumo humano o los propósitos agrícolas e industriales. También la infiltración del drenaje ácido de la mina puede contaminar suelos y el agua subterránea (Gamonal, 2004)

Los residuos mineros generan soluciones ácidas como el ácido sulfúrico, entre otros, producto de la exposición de rocas que contienen sulfuro con la atmósfera (agua, oxígeno y dióxido de carbono), que son vertidas directamente por procesos de lixiviación a aguas superficiales y subterráneas, generando así impactos al medio ambiente, como es la degradación de los ecosistemas acuáticos, la flora y la fauna, imposibilita el uso agrícola e industrial del suelo y por ende el ser humano se ve afectado por ello.

El término drenaje contaminado se refiere al agua de drenaje que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un asiento minero, o que podría ocasionar un impacto ambiental adverso. Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, elementos como: valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5, alcalinidad decreciente y acidez creciente, concentraciones elevadas de sulfato, concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales), concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales ¹

¹ Normas Técnicas para Diseño Ambiental (guías)

En el presente trabajo realiza un estudio al drenaje ácido de la mina Cascabel y se propone una alternativa que permita mitigar el impacto ambiental que este ocasiona. Para ello se realizará la caracterización fisicoquímica de las aguas superficiales de la mina y se ejecuta en prueba piloto una alternativa de tratamiento. Después de los análisis de las aguas tratadas y de los resultados encontrados se propone un posible tratamiento posterior para reducir la concentración de metales y elementos que aún permanecen y afectan el ecosistema.

En el primer capítulo de este trabajo se presenta la propuesta de investigación la cual incluye planteamiento del problema, justificación y objetivos. En el capítulo 2, se hace una reseña histórica de la minera para poner en contexto la situación minera en nuestro país. En el capítulo 3, se muestra un marco teórico en el cual se incluyen los diferentes tópicos que son relevantes para este trabajo. El capítulo 4 contiene la metodología llevada a cabo para el desarrollo del trabajo y en el capítulo 5 se presentan los resultados y análisis de los mismos. Finalmente se presentan las conclusiones y perspectivas del trabajo.

CAPÍTULO 1: PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Históricamente el municipio de Marmato ha sustentado su economía en la explotación minera, constituyéndose esta actividad en la principal fuente de ingresos y empleo para sus habitantes. Los ingresos varían de acuerdo a la cantidad y calidad del oro extraído. Marmato es el primer productor de oro en el departamento de Caldas y el más antiguo del país.²

En la zona alta del municipio se realiza aún la explotación minera por técnicas manuales, mientras que en la zona baja, Empresa Mineros Nacionales, es más tecnificada.

Actualmente en Marmato, se están implementando proyectos para la caracterización de minerales y el empleo de tecnologías limpias, para generar un mayor valor agregado al recurso minero y desarrollar la vocación turística del distrito minero, como perspectivas económicas que contribuyan al desarrollo local y regional.

- Numerosos estudios geológicos entre los que podemos mencionar los realizados en el año 1989 por INGEOMINAS, en el 2003 por Ricardo Arturo Méndez Fajury y CORPOCALDAS en el 2004 y 2006 advierten de la necesidad de evacuar la actual zona urbana pues se prevén deslizamientos de proporciones catastróficas.
- La zona urbana de Marmato es considerada por el Ministerio de Cultura como Patrimonio Histórico, quién elaboró una valoración Arquitectónica y un plan especial de protección. Plantea dentro de su protección, la creación del Parque Nacional de la Minería.

²Caracterización del municipio de Marmato 2008

- El rechazo reiterado de los habitantes de la zona urbana a cualquier tipo de traslado.
- El proyecto del Nuevo Marmato como alternativa para el desalojo de la zona potencialmente peligrosa, carece de recursos suficientes para su construcción y adecuación.
- Cualquier iniciativa de mejoramiento o adecuación de las condiciones actuales, de los servicios públicos o del equipamiento urbano o de infraestructura, se choca con la imposibilidad, por haber sido declarada zona de alto riesgo.

En general, las actividades mineras desarrolladas en el Distrito minero de Marmato revisten un importante carácter empresarial. La mayoría de los obreros de las minas tienen vínculo laboral formal con los titulares de los derechos mineros; estos últimos se encuentran en un proceso de legalización definitiva de los derechos mineros, adquiridos en parte por procesos informales y en parte por procesos formales derivados de las diferentes instituciones que han administrado las actividades extractivas de oro en la denominada Zona Alta de Marmato (Minminas).³

La modalidad de laboreo más frecuente consiste en la pequeña empresa administrada directamente por el titular del derecho, aunque también se presenta el arrendamiento de las minas y de frentes dentro de la misma mina a terceros. Otra modalidad menos difundida consiste en la operación conjunta bajo sociedad informal entre el titular (o titulares) del derecho minero y los obreros (EOT 2004 – 2011).

³ Ministerio de Minas y Energía de Colombia es la oficina estatal que se encarga de dirigir la política nacional en cuanto a minería, hidrocarburos e infraestructura energética.

1.2 Justificación

El surgimiento de los ambientes mineros se debe, a la utilización de los recursos del subsuelo, estos ambientes en general presentan grados de transformación muy altos para el medio ambiente, hecho que es preocupante tanto a nivel nacional como internacional.

Los productos minerales son consumidos preferentemente por los sectores industriales y los de construcción. Es por esto que se podría argumentar, que en la sociedad moderna en la que estamos inmersos, la utilización de los recursos minerales y en consecuencia la actividad minera, es un sustento importante para la misma, por lo tanto es casi imposible dejar a un lado esta actividad.

La actividad minera ha sido el factor decisivo para el surgimiento y posterior crecimiento de importantes ciudades y pueblos del mundo, siendo la palanca de desarrollo económico por su aportación tecnológica y de innovación, infraestructura básica y por las importantes inversiones sociales que realiza en las comunidades donde opera.

La actividad minera siendo una práctica que se realiza a nivel mundial, y que trae consigo tantos beneficios, aun en muchas zonas no se le da la importancia al impacto ecológico que se ésta genera y simplemente se practica sin tener en cuenta que ella es una de las actividades que más daño causa al ambiente y a la salud, siendo estos irreversibles.

Recientemente, un grupo de expertos en Medio Ambiente y Salud dirigido por investigadores de la Universidad de Harvard, bajo el auspicio del Instituto Blacksmith⁴ determinaron cuáles son los sitios más peligrosos para la salud humana, en especial para los niños, debido a sus elevadas concentraciones de

⁴ Trabaja en algunos de los lugares más contaminados del mundo, compartiendo recursos y experiencia con grupos y organismos locales para resolver los problemas de la contaminación, la limpieza de sitios contaminados, y salvar vidas

productos contaminantes y tóxicos. Dentro de ese grupo establecieron un ranking de los diez sitios más contaminados del mundo:

1. Chernobil (Ucrania)
2. Dzerzhinsk (Rusia)
3. Haina (República Dominicana)
4. Kabwe (Zambia)
5. La Oroya (Perú)
6. Linfen (China)
7. Mailuu-Suu (Kirziguistán)
8. Norilsk (Rusia)
9. Ranipet (India)
10. Rudnaya Pristan (Rusia)

El 60% de los mencionados sitios está vinculado directamente con la actividad minero-metalúrgica: Kabwe (Zambia), La Oroya (Perú), Linfen (China), Mailuu-Suu (Kirziguistán), Norilsk (Rusia), Rudnaya Pristan (Rusia). En estos 6 casos se combinan varias de las causas que han incrementado el efecto de los desastres medioambientales que ha provocado la actividad minero-metalúrgica.

En general los tipos de contaminantes cuantificados en los estudios realizados (Informe Mantaro) son: Plomo, cadmio, arsénico, y demás como el Cobre, Zinc, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, níquel, mercurio, antimonio, cobalto, selenio uranio (en Mailuu-Suu (Kirziguistán) y dióxido sulfúrico

Las consecuencias ecológicas y sociales de la contaminación minero-metalúrgica son considerables a nivel local, regional y global, dos razones fundamentales fortalecen esta afirmación; la emisión de contaminantes al medio afecta los ecosistemas acuáticos y terrestres y la salud de las personas en especial la salud de los niños.

Esta actividad trae también consecuencias económicas debido a los daños causados por la ocurrencia de desastres medioambientales asociados a la actividad minero metalúrgica en la forma de las pérdidas de vidas humanas, la

destrucción de la propiedad, la interrupción de las vías de comunicaciones, la contaminación del medio ambiente y las pérdidas económicas para la industria minera y las comunidades y pueblos asociados a esta es enorme. Además, la pérdida de imagen y el rechazo social a esta actividad calificada como contaminante ha dado lugar a problemas sociales, inestabilidad de los gobiernos, e incluso a guerras.

A nivel nacional en Colombia, no estamos ajenos a este fenómeno, la industria minera es una de las fuentes principales que generan ingresos económicos para la población y para la Nación, pero desafortunadamente, el escaso control de las autoridades, la ilegalidad y el uso de insumos químicos ha traído nefastas consecuencias para los ecosistemas, con un agravio especial para los recursos hídricos, que ha convertido a la minería ilegal en el problema más sensible desde el punto de vista del impacto ambiental que tiene hoy en día el país.

Gracias a su diversidad de ambientes, Colombia dispone de una variada oferta de productos mineros, entre los que se incluyen carbón, oro, platino, níquel, esmeraldas y caliza, así como la de otros que se producen en menor escala: principalmente sal, roca fosfórica, arcillas, arenas silíceas, minerales de cobre y manganeso, magnesita, barita, yeso y varios tipos de rocas ornamentales. Hay dos modalidades de extracción de estos recursos mineros: la primera formal y de gran escala; la segunda a escalas menores, tradicional y artesanal, con una reconocida carencia de tecnología adecuada y definida, en muchos casos, informal y de subsistencia, lo que la hace insegura, poco rentable, no competitiva y ambientalmente no sostenible.

Según la investigación realizada por la Defensoría del Pueblo⁵, en el 44% de los

⁵ La investigación sobre la minería de hecho en el país, realizada por la Defensoría Delegada para los Derechos Colectivos y del Ambiente de la Defensoría del Pueblo, recogió información de 1.010 municipios del territorio nacional (90%), a través de los reportes de las autoridades ambientales y de las alcaldías municipales. Estos datos pertenecen a unidades de explotación minera de hecho que han operado en los últimos dos años

municipios del país, en los últimos dos años, ha existido minería ilegal o de hecho. Los departamentos de Córdoba (86%)⁶, Boyacá (69%), Risaralda (64%), Quindío (62%), Valle del Cauca (55%), Caldas (52%) y Antioquia (46%) tienen el mayor porcentaje de municipios con minería de hecho⁷, como lo muestra la Figura 1.

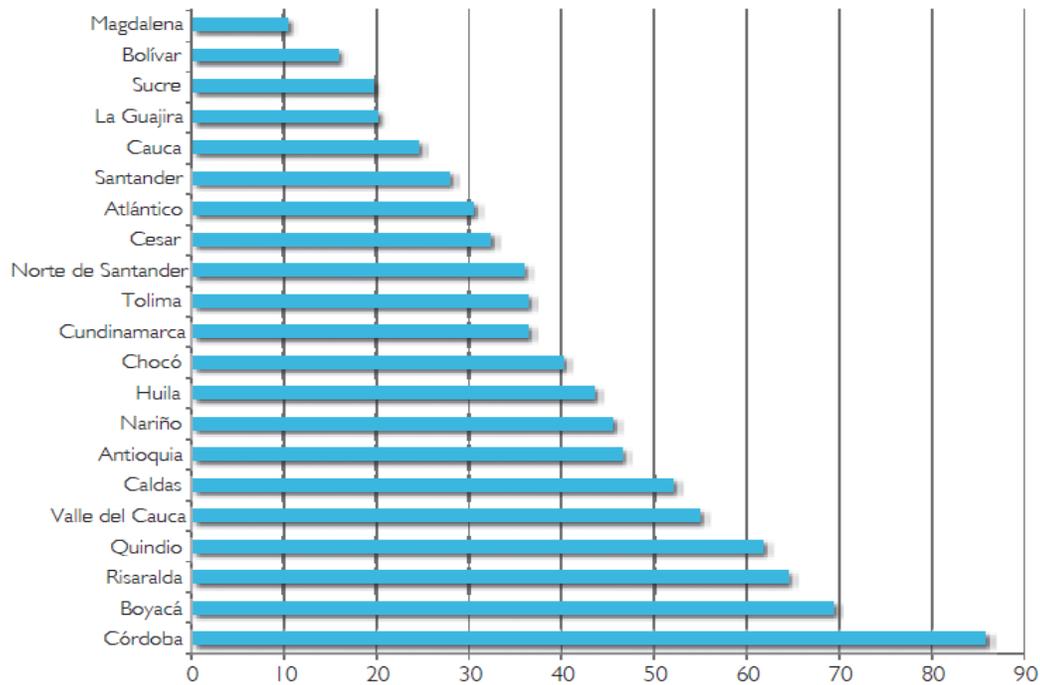


Figura 1. Porcentaje de municipios por departamento que tienen minería de hecho

En el sector aurífero, según las autoridades mineras, la mayor parte de la producción nacional proviene de la pequeña y mediana minería, que en un buen porcentaje es ilegal o de hecho (Min. Medio Ambiente 2002), lo cual demuestra la importancia de este tipo de productores en el total de la producción nacional y, al mismo tiempo, pone en evidencia la magnitud del efecto ambiental que se está generando en un sector de la producción de gran importancia que carece de adecuada planeación, estructura y legalización para controlar o contrarrestar los efectos nocivos que puede tener sobre el medio ambiente. (Min. Medio Ambiente 2002)

⁶ De los 28 municipios del departamento de Córdoba, solo cuatro (Cereté, Cotorra, Las Córdobas y Momil) reportan no tener minería de hecho en el área de sus jurisdicciones.

⁷ Se excluyeron los departamentos de Boyacá y Sucre, entre otros, por no contar con suficiente información para relacionarlas.

Entre los impactos ambientales más relevantes provocados por la pequeña minería encontramos la contaminación con mercurio, la contaminación con cianuro, la eliminación directa de relaves y efluentes en los ríos, el daño en los ríos en áreas aluviales, los ríos convertidos en cienos, el daño por erosión y deforestación, y la destrucción del paisaje, sin dejar de lado la salud humana.

Esta situación se ve agravada porque, en el caso colombiano, las autoridades no controlan estas actividades, que están fuera del marco regulador, o carecen de la capacidad para fiscalizarlas o controlarlas, ya que normalmente ocurren en lugares remotos e inaccesibles.

Casos como el del nordeste Antioqueño⁸ y otros estudios científicos realizados en el país demuestran que los mineros en pequeña escala, en condiciones de ilegalidad minera y ambiental, tienden a provocar más daño al ambiente que los que trabajan en empresas mineras modernas, con un costo ambiental mayor por unidad de producción (Wotruba, 1998).

Contribuye a agravar este problema la falta de conciencia, especialmente con respecto a los impactos ambientales menos visibles o a largo plazo que provocan estas actividades, vinculada a la falta de información sobre los métodos disponibles para reducir los impactos y una falta de incentivos obvios para efectuar cambios.

Dado que las operaciones son a menudo actividades de subsistencia, los mineros en pequeña escala tienden a concentrarse más en las preocupaciones inmediatas que en las consecuencias a largo plazo de sus actividades.

⁸ Que es denominado el lugar más contaminado en el mundo por mercurio, producto de la minería aurífera. Según: Marcello, VEIGA. PhD., Op, cit

La minería tiene un reto frente al desarrollo sostenible y es el de asegurar que las implicaciones de su actividad sobre las comunidades y el ambiente sean netamente positivas y contribuyan a la sostenibilidad del bienestar de la sociedad y de los ecosistemas. Los proyectos mineros, para servir al desarrollo sostenible, deben realizarse de forma tal que sirvan para construir capacidades laborales de largo plazo, para consolidar comunidades locales y preservar o rehabilitar ecosistemas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Implementar alternativas de tratamiento que disminuyan el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido producto de la actividad minera en el municipio de Marmato.

1.3.2 Objetivos Específicos

Realizar la caracterización fisicoquímica a nivel de laboratorio de las aguas superficiales generadas en la Mina Cascabel en el municipio de Marmato.

Establecer alternativas de tratamiento biológico y químico como son los sistemas reductores de sulfato y productores de alcalinidad que permitan mitigar el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido de la Mina Cascabel.

Seleccionar el sistema reductor de sulfatos y productor de alcalinidad como alternativa de tratamiento biológico y/o químico más adecuada técnica y económicamente para mitigar el impacto ambiental ocasionado por el drenaje ácido de la Mina Cascabel, de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización.

Aplicar en prueba piloto el tratamiento seleccionado a las aguas del drenaje ácido de la Mina Cascabel.

Proponer un tratamiento de las aguas que se ven afectadas por el drenaje ácido de la mina Cascabel de acuerdo a los resultados de la prueba piloto.

CAPÍTULO 2. HISTORIA DE LA MINERÍA

INGEOMINAS⁹ define la minería como: Ciencia, técnicas y actividades que tienen que ver con el descubrimiento y la explotación de yacimientos minerales. Estrictamente hablando, el término se relaciona con los trabajos subterráneos encaminados al arranque y al tratamiento de una mena o la roca asociada. En la práctica, el término incluye las operaciones a cielo abierto, canteras, dragado aluvial y operaciones combinadas que incluyen el tratamiento y la transformación bajo tierra o en superficie. La minería es una de las actividades más antiguas de la humanidad, consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales a partir de la corteza terrestre. Casi desde el principio de la Edad de Piedra, hace 2,5 millones de años o más, viene siendo la principal fuente de materiales para la fabricación de herramientas. Se puede decir que la minería surgió cuando los predecesores del Homo sapiens empezaron a recuperar determinados tipos de rocas para tallarlas y fabricar herramientas. Al principio, implicaba simplemente la actividad, muy rudimentaria, de desenterrar el sílex u otras rocas. A medida que se vaciaban los yacimientos de la superficie, las excavaciones se hacían más profundas, hasta que empezó la minería subterránea. La minería de superficie se remonta a épocas mucho más antiguas que la agricultura.

2.1 Actividad Minera en América

La minería en la América española se centró en la extracción de metales preciosos, es decir, plata y, en menor medida, oro. Los minerales de baja ley (cobre, estaño, plomo, etc.)

No cabe duda que el oro y plata fueron los incentivos principales para la mayoría de los europeos que marcharon al Nuevo Mundo. Para conseguir las preciadas riquezas los conquistadores no escatimaron esfuerzo alguno y se

⁹ El Decreto 919 de 1989, INGEOMINAS es la autoridad máxima en amenazas geológicas

disputaron todo vestigio aurífero, importantes yacimientos fueron hallados a partir de la segunda mitad del siglo XVI.

La fuerza de trabajo indígena fue la base de dicha actividad, mientras blancos y mestizos por lo general eran supervisores y propietarios.

Las condiciones de trabajo en los socavones americanos eran inhumanas. La mortandad de los aborígenes y su desmembramiento social se relacionan en importante medida con los sistemas laborales aplicados y lo inhóspito e inaccesible de los lugares donde se ubicaban los principales yacimientos mineros.

Sin embargo, también existió el trabajo voluntario y asalariado, ideal perseguido desde los comienzos de la era colonial. Esta forma de trabajo tardó en extenderse debido a la falta de hábito de los indígenas en los trabajos mineros, al desconocimiento de la moneda como salario y al natural anhelo de rehuir las pesadas tareas que se les confiaban.

La minería permitió a muchas personas amasar grandes fortunas, otorgándoles el reconocimiento social y político. No obstante, con la misma rapidez que se ascendía, cualquier imprevisto provocaba la ruina inmediata.

Para la población nativa los efectos sociales de la explotación minera fueron extraordinariamente perjudiciales. Los desplazamientos forzados desarticularon la organización de las comunidades indígenas, alteraron sus jerarquías tradicionales y acabaron con innumerables vidas humanas.

Para comprender el significado de la actividad minera colonial, creemos que basta citar las palabras del periodista y escritor uruguayo Eduardo Galeano: *"En Potosí la plata levantó templos y palacios, monasterios y garitos, ofreció motivo a la tragedia y a la fiesta, derramó la sangre y el vino, encendió la codicia y desató el despilfarro y la aventura"*

2.2 Actividad Minera en Colombia

2.2 1 Antecedentes históricos:

Para poder analizar en perspectiva el desempeño de la minería en Colombia y su aporte al desarrollo económico nacional, es preciso evaluar el contexto histórico en que se ha desenvuelto la actividad. Como veremos en los párrafos siguientes, la minería ha jugado un papel fundamental en el proceso de desarrollo económico y regional del país, lo que hace aún más paradójica la situación de subexplotación relativa en la que se encuentra en el presente.

La minería ha sido una actividad económica central en Colombia desde la época Precolombina. Las diferentes culturas indígenas desarrollaban trabajos de cerámica y orfebrería altamente valorados. En un comienzo, la actividad minera dio origen al comercio regional caracterizado por el trueque de varios minerales. Posteriormente, durante la época de la Colonia la minería creció en grandes proporciones y con ello se abrió paso al comercio de esclavos africanos. Los más favorecidos con el régimen colonial fueron quizás los comerciantes antioqueños, quienes transportaban el oro en polvo a otras regiones de la Nueva Granada y al exterior, con el objetivo de intercambiarlo por otras mercancías como textiles y alimentos (Sierra 1989). Así mismo, la población de zonas deshabitadas en esta región se debió en gran medida a la búsqueda de oro.

Para el periodo de la República, la actividad minera, representada casi en su totalidad por la explotación de oro y piedras preciosas, ya gozaba de una posición aventajada frente a otros sectores básicos como la agricultura. El avanzado comercio de la región antioqueña produjo importantes excedentes que, al ser acumulados por la clase comerciante, permitieron la creación de la Sociedad Minera en Antioquia.

La evolución favorable de la minería en el pasado ha llevado a que la explotación, la producción y la exportación de oro hayan sido catalogadas como

las actividades económicas más antiguas y unas de las de mayor importancia para el país.¹⁰ Durante buena parte del siglo XIX la exportación de este metal, acompañada de las de la plata y el platino, permitieron equilibrar la balanza comercial y se convirtieron en una importante fuente de atracción de inversión extranjera. Hasta los últimos años de este siglo, los metales preciosos permanecieron como los únicos productos significativos de la minería colombiana.

Durante los primeros años del siglo XX otros minerales empiezan a ganar importancia en la actividad minera en Colombia. Para 1910, con la llegada de las primeras máquinas de vapor se empieza a explotar carbón en pequeñas cantidades, destinado básicamente a la industria manufacturera y al funcionamiento de las locomotoras. En los primeros años de la década de los 1930 surgen algunas explotaciones de materiales de construcción como calizas, yesos, arcillas y gravas, empleados en la naciente industria de la construcción. Así mismo, empezaron a explotarse en mayor medida otros minerales que son insumo en la producción de fertilizantes, vidrio y plásticos.

La Gran Depresión internacional de los años treinta se extendió sobre los precios de algunos productos básicos, como el café y otras materias primas que constituían una importante proporción de las exportaciones colombianas. Fue entonces cuando la importancia de la minería, representada esencialmente en oro, se hizo más evidente para compensar la caída que experimentaban los demás productos.

La crisis internacional de finales de los años treinta representó un profundo quiebre en la historia económica de Colombia. La industria empezó a fortalecerse con tasas anuales de crecimiento de 9% y se destacó la producción de cemento en 1939 que fue 17 veces superior a lo registrado 10 años antes. (Echavarría 1999).

¹⁰Banco de la República. Grupo de Estudios del Crecimiento Económico. (2002). "El crecimiento económico colombiano del siglo XX".

En la década de 1950 se generan importantes encadenamientos productivos de la minería con el resto de la economía. En esos años se empieza a hacer evidente la integración vertical del carbón como insumo para la producción industrias en desarrollo, como es el caso del cemento, el papel y, en mayor medida, las primeras termoeléctricas.¹¹

En 1982 se inició la producción de ferroníquel en el país, tras el hallazgo de un pequeño depósito de hierro en Córdoba que, tras haber sido estudiado de forma detenida, se llegó a la conclusión de que contenía altos niveles de níquel. Hoy en día, el ferroníquel producido en Colombia se reconoce en el ámbito mundial como el de mejor calidad en el mercado.

El sector minero con el perfil que conocemos hoy, y cuyo aporte se ha convertido en fundamental para la economía colombiana, se consolida en los años ochenta con la entrada en operación de grandes explotaciones carboníferas en La Guajira y Cesar, así como la instalación de la planta de Cerro Matoso en Monte Líbano, proyectos caracterizados por grandes inversiones en tecnología y un creciente aporte a la economía colombiana.¹²

2.2.2 Desempeño reciente de la minería:

Después de haber tenido un desempeño modesto en los años noventa, desde comienzos de esta década la minería colombiana registró un dinamismo importante. Este hecho se manifiesta en que el sector ha tenido tasas de crecimiento superiores a las presentadas por otros segmentos productivos como manufacturas, energía, servicios personales, agropecuario, silvicultura y pesca. (UMPE 2006)

En el año 2006 la minería sin hidrocarburos aportó aproximadamente 2.8% del PIB en Colombia, lo que representa 70.8 miles de millones de pesos constantes de 2004.

¹¹DANE. Censo Nacional Minero 1988.

¹² FEDEDESARROLLO. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal

Ese dinamismo relativo coincide con el auge que han tenido la minería y los productos básicos en general en el mundo, y se refleja en otras variables económicas. Aunque la minería es una actividad intensiva en el uso de capital físico y tecnológico, la generación de empleo por parte del sector registró un incremento de 120.000 puestos de trabajo en 2001 a 180.000 en 2004. Por otra parte, las exportaciones mineras ascendieron a 5.000 millones de dólares para el año 2006, lo que implica una contribución de 21% a las exportaciones totales. Entre tanto, la inversión extranjera directa en el sector se calculó en 2.157 millones de dólares para el año 2005, cuando presentó el valor más alto registrado en los últimos once años.

A pesar del evidente dinamismo registrado por la minería colombiana desde comienzos de la década, a partir del año 2005 se observa un estancamiento relativo de las variables analizadas. Tan solo las exportaciones mineras presentan un leve incremento luego del máximo de 22% en participación alcanzado en 2003 y posterior caída a 19%, lo que sugiere que las políticas sectoriales no están teniendo el efecto deseado para dinamizarla minería en el país. Sin embargo, detrás del menor dinamismo relativo de las demás variables hay una gran actividad de las empresas haciendo significativas inversiones que permitan aumentar los volúmenes de producción, así como desarrollos de infraestructura de gran importancia para el sector, y un gran interés de nuevas empresas inversionistas de talla mundial del sector minero en acometer nuevas actividades exploratorias.¹³

2.2.3 Ingresos de la Nación

El sector de la minería juega un papel significativo por sus aportes a los ingresos corrientes de la Nación y de algunas regiones del país. Específicamente, la minería contribuye a las finanzas públicas con impuestos de renta, patrimonio e IVA, como el resto de las actividades productivas, así como con un aporte específico del sector constituido por las regalías.

¹³ FEDEDESARROLLO. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal

La minería contribuye con 2.3% de los ingresos corrientes de la Nación, según datos de recaudo de la DIAN¹⁴ para el año 2006. La Tabla siguiente muestra que la participación del sector ha crecido de forma sostenida desde el año 2002 y presenta su nivel máximo en 2006 con un aporte de 1.17 billones de pesos. Cabe anotar que 91% de los aportes del sector a los ingresos de la nación corresponden a impuestos de renta, mientras el 9% restante está distribuido entre el IVA y en una menor proporción en impuesto al patrimonio, que se recauda tan solo desde 2004.¹⁵

Tributación del sector minero

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
INGRESOS CORRIENTES DE LA NACIÓN	20,126,537	25,177,166	27,393,539	31,578,625	36,937,140	42,517,876	51,475,000
SECTOR MINERO SIN HIDROCARBUROS	162,072	193,391	143,132	430,699	786,370	833,086	1,176,034
PARTICIPACIÓN SECTOR	0.81	0.77	0.52	1.36	2.13	1.96	2.28

Tabla 1. Tributación minera

2.2.4 Composición de la minería en Colombia

Como ya se mencionó, Colombia posee un enorme potencial minero aún subexplorado y subexplotado. La gran minería, representada principalmente en reservas y producción de carbón, níquel y metales preciosos, presenta una destacada proyección internacional.

Así mismo, la minería en mediana y pequeña escala exhibe gran potencial, que de ser aprovechado puede convertirse en una importante fuente de ingresos y empleo para el país.

¹⁴ DIAN: Dirección de Impuesto y Aduanas Nacionales. Garantiza el cumplimiento de las obligaciones tributarias aduaneras y cambiarias y facilita las operaciones de comercio internacional

¹⁵ FEDEDESARROLLO. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal

A continuación se presenta un análisis de la composición de la minería en el país (excluyendo, como en el resto de este trabajo, los hidrocarburos), haciendo especial énfasis en los subsectores productores de carbón, níquel, oro y materiales de construcción, dado su gran importancia relativa dentro del sector.

El grueso de la producción minera en Colombia corre por cuenta de los subsectores de carbón (51.8% de la producción minera), níquel (21.2%), oro (14.6%) y materiales de construcción (5.3%)¹⁶. Buena parte del aumento de la contribución de la minería al PIB nacional en los últimos años se atribuye al crecimiento del carbón.

Los flujos de inversión extranjera directa de los últimos tres años revelan que aproximadamente 86% del monto registrado para el sector minero en Colombia corresponde a la inversión en proyectos carboníferos. La proporción restante está dividida en proyectos de exploración y explotación de metales preciosos y otros minerales.

Como se mencionó anteriormente, el recaudo por concepto de regalías mineras se ha aumentado durante los últimos años. Durante 2006 las regalías distribuidas se estimaron en \$733 mil millones, 77% de los cuales corresponde a los aportes del sector carbón, 18% del sector níquel y 3.6% de metales preciosos.¹⁷

2.3 Actividad Minera en el municipio de Marmato

2.3 1 Su ubicación

Marmato es el primer productor de oro en el departamento de Caldas y el más antiguo del país. Históricamente el municipio de Marmato ha sustentado su economía en la explotación minera, constituyéndose esta actividad en la principal fuente de ingresos y empleo para sus habitantes.

¹⁶Todas las cifras reportadas corresponden al año 2005.

¹⁷ FEDEDESARROLLO. La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal

En el municipio se encuentran las famosas minas de oro de Marmato y Echandía, en explotación desde 1537, las cuales constituyen un distrito minero de aproximadamente 25 Km².

A la cabecera municipal se llega por una carretera de 7 Km. Que se desprende de la Troncal de Occidente, entre La Felisa, (Caldas), y La Pintada, (Antioquia), en el sitio conocido como “La Garrucha del Rayo”. También se llega a Marmato, por un carretable de 19 Km. que lo une con el municipio de Supía, pasando por el corregimiento de San Juan. La cabecera municipal dista de Manizales 142 Km.; por la vía a la Felisa.

El municipio tiene una extensión de 4.081,29 has, 4.063,38 (99.51%) corresponden al área rural y el resto 17,9 (0.49%), al área urbana. El sector rural lo conforman el corregimiento de San Juan, Las Veredas La Miel, La Cuchilla, El Vergel, Guadalejo, Cabras, La Loma, Echandía, El Volante y El Llano, y los parajes Concharí, Bellavista, El Chocho, Guayabito, El tejar, La Quebrada, Llano Grande, La Portada, Buena Vista, Boquerón, Monterredondo, La Reja, Loaiza, El Polvero, La Planta, Los Indios, Los Novios, La Candelaria, Jiménez Alto y Bajo, Ladrillera, San Lorenzo (o travesías), La republicana, San Ignacio y San Jorge.¹⁸

El Municipio de Marmato se localiza al noroccidente del Departamento de Caldas, sobre el flanco oriental de la cordillera occidental y sobre la vertiente occidental de la hoya del Río Cauca.

Su Localización con coordenadas es:

5° 29” de latitud norte y 75° 36” de longitud oeste

Sus Límites geográficos son:

Norte: Municipio de Caramanta y Valparaíso Antioquia

Sur: Municipios de La Merced y Pácora Caldas

Occidente: Municipio de Supía Caldas

Oriente: Municipio de Valparaiso Antioquia

¹⁸ Caracterización del municipio de Marmato 2008

Tiene una Extensión de:

Área total: 40.08 kms², Área urbana: 17.9 has, Área Rural: 4.063 has

Su relieve en general es Quebrado y escarpado

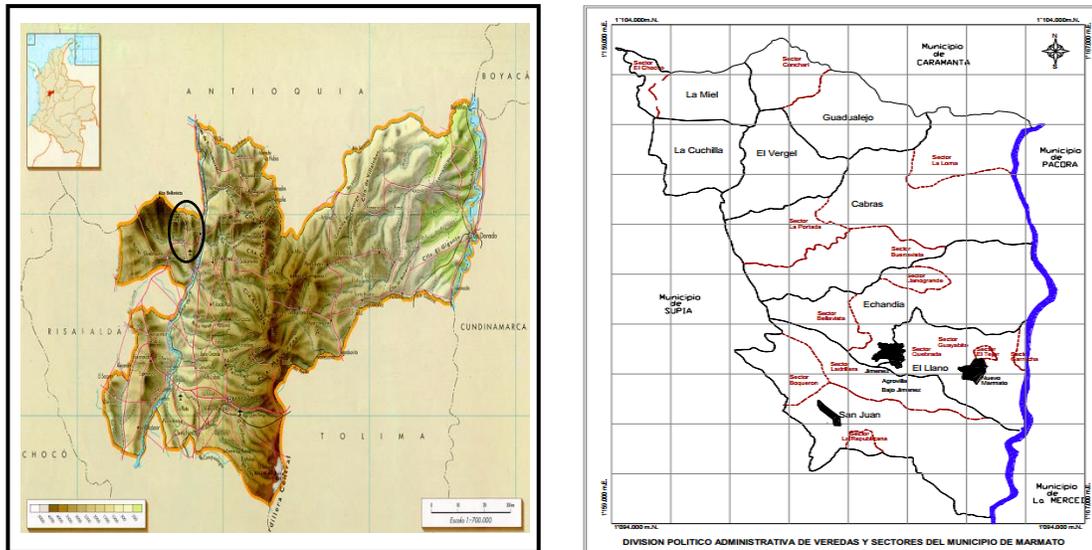


Figura 2. Mapa de la geografía de Marmato

Su Hidrografía principal consta de:

Río Cauca, Río Arquía, Micro cuenca Chaburquía, Quebrada San José, Quebrada Los Indios, Quebrada Cascabel, Quebrada El Volante, Quebrada La Cidrera, Quebrada La Plata.

2.3.2 Su conformación geológica

El Municipio de Marmato se encuentra conformado geológicamente por dos tipos de litologías, las rocas sedimentarias y las rocas ígneas, las cuales se describen a continuación con sus respectivos cortes geológicos:

Rocas Sedimentarias:

Formación Amagá. Consisten en una secuencia de areniscas bien cementadas de color café a rojizo y arcillositas pizarrosas de color ocre. En sitios muy puntuales presenta delgados bancos de conglomerado y de carbón. Los conglomerados son matriz soportados, con clastos¹⁹ y cuarzo; los clastos son

¹⁹ Fragmento de roca que ha sido transportado, por procesos volcánicos o sedimentarios.

mal seleccionados, con fábrica aleatoria. Los bancos de carbón no sobrepasan los 0.70 m de espesor.

Esta unidad se presenta como retazos irregulares de pequeñas dimensiones; generalmente como techos colgantes producto del emplazamiento de pórfido dacítico y de las fallas del sector. Las rocas sedimentarias afloran en casi toda la totalidad de la vereda del Llano, y la quebrada El Salado.

Rocas Ígneas:

Intrusivo sub volcánico: Producto de la actividad piroclástica y lávica de la cordillera occidental, se compone principalmente de un pórfido dacítico y andesítico que se encuentra intruyendo rocas sedimentarias correspondientes a la formación Amagá. Estas rocas sub volcánicas constituyen el 85% de la zona de estudio y económicamente reviste la mayor importancia, dado que es la roca caja de la mineralización aurífera. Macroscópicamente son rocas de color verde a gris claro en muestra fresca y amarillas cuando están meteorizadas.²⁰

En general la textura se puede clasificar como limo – arenosa, con predominio de la textura arenosa. Estos suelos son ligeramente ácidos 5.1 de acuerdo con el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)²¹

2.3.3 Sus zonas mineras

En la zona alta existe alrededor de 200 minas y 550 personas trabajando en la extracción del mineral aurífero, la producción es de 60.500 gramos mensuales en los molinos de esta área. Incluyendo molinos particulares, la producción es de alrededor de 104.510 grs.

Las tecnologías aplicadas en el beneficio mineral en la denominada Zona Alta de Marmato han evolucionado a partir de un esquema tecnológico obsoleto, de molienda en molinos de pisones y cianuración por percolación; basado en las

²⁰ Caracterización del municipio de Marmato 2008

²¹ El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, es la entidad encargada de producir el mapa oficial y la cartografía básica de Colombia.

tecnologías aplicadas en el siglo antepasado la minería aurífera mundial, hacia la molienda en molinos de bolas, cianuración por agitación y recuperación de valores por el sistema Merrill Crowe²², durante las dos últimas décadas.

En la zona baja el método de explotación minera es el de almacenamiento temporal. La mina está tecnificada, cuenta con energía eléctrica, túneles amplios y sistemas de transporte en vagonetas. Actualmente cuenta con 350 empleados.

Cuenta con una planta de beneficio grande y tecnificada con capacidad hasta de 200 t/día. El proceso incluye flotación (en la que se pierde hasta el 10% de oro), Separación gravimétrica en ciclones, cianuración por agitación, precipitación por zinc en vacío (proceso Merrill Crowe) y fusión en horno.²³

2.3.4 Su explotación minera

En general la actividad minera en Marmato, se realiza de manera indiscriminada y con sistemas artesanales y obsoletos, conformado por 230 minas en actividad y más de 20 molinos de beneficio. (Alcaldía de Marmato)²⁴.

2.3.4.1. Extracción y Explotación de Minerales

El oro de Marmato se encuentra en dos formas fundamentales: oro libre, o sea aquel que puede obtenerse directamente por la trituración y concentración física del mineral, y el oro combinado, que es el que se encuentra como finas inclusiones en la pirita (y otros sulfuros) y que requiere de procesos químicos (cianuración) para su extracción.

²²Proceso de recuperación de oro y plata consiste en la remoción de estos metales preciosos de una solución cianurada por precipitación con zinc en polvo.

²³ Caracterización del municipio de Marmato 2008

²⁴“Marmato hacia la prosperidad integral” todos por un Marmato anhelado.

- Método de extracción

El método de trabajo dentro de la mina es sumamente rudimentario, las perforaciones se hacen con taladros accionados manualmente, y sin plan definido de voladura, también se hacen huecos con martillos (barrenos), en los cuales es colocada la dinamita cuando la roca es compacta o muy dura; cuando no se utiliza diamantina, los huecos se hacen con piezas o barras para la extracción del mineral.

Los mineros fortifican las minas, colocando maderas en forma de puertas, con cortes especiales que ellos llaman platillos y vacilonas. También colocan maderas que denominan atices, en las paredes de las minas.

- Transporte del material

Una vez que los efectos de la explosión han pasado, el mineral es transportado en coches o carretas de madera que empujados por hombres, se deslizan por rieles hasta la plataforma ubicada en la bocamina, donde esperan el turno para la trituración.

Si la mina se encuentra lejos del molino, sin ser posible la utilización del cable por su ubicación, el material se transportara en volquetas o a lomo de mula. En caso contrario, se emplea el cable aéreo y tarros (brekes), estos tarros poseen una capacidad de 4 a 6 arrobas de material, y mientras que el peso de una de ellas, llena de material, la arrastra hacia abajo por gravedad, la otra sube ya vaciada.

2.3.4.2 Sistema de beneficio

Una planta de beneficio consta de una serie de máquinas e instrumentos dispuestos en un orden establecido para que material que pasa por ellos se divida en varios productos, unos útiles y otros desechables.

- Separación Mecánica

El mineral que se ha sacado de las minas pasa a la tolva, la que posee una compuerta, que da paso al mineral, cayendo ya sea a los coches o las volquetas, los cuales determinan por su capacidad las toneladas de mineral que se va a moler. El mineral es conducido a la trituradora donde es procesado hasta alcanzar la finura debida, pasa al molino, luego es llevado a una mesa de rayo, donde el oro queda libre así como la parte pesada del mineral; el resto de material cae en forma de pulpa a la mesa Wilfley donde es sometido a un movimiento de vaivén y a un arrastre con agua que separa el material en varias bandas de distinta gravedad específica.

- Separación Química

Las arenas, los concentrados privados de oro libre y parte de los recortes que los mineros llaman “jaguas” se reúnen a la salida del molino y se llevan a los tanques de cianuración para someterlos por percolación a la acción de una solución de cianuro, la cual disuelve el oro; antes se agrega cal a las soluciones para neutralizar su acidez y evitar el consumo innecesario de cianuro.

2.3.4.3 Barequeo

Aproximadamente desde 1799 y paralelamente a la extracción de la veta, se realiza el “barequeo”, en las quebradas o en los caños formados por las aguas residuales de los molinos. Se despoja de la capa vegetal el área de trabajo, se retiran las rocas acumulándolas para formar canales por donde se conduce el agua; en la parte baja se coloca un cajón rectangular protegidos por estopas y una rejilla metálica fina, donde se acumula el material con contenido de oro. Al terminar este proceso, se lavan en las bateas de madera hasta quitarles todas las arenas y tierra acumulada.

2.3.4.4 Sistemas de procesos de Explotación de Minerales.

En el municipio de Marmato, actualmente se practican dos tipos de extracción de minerales, artesanal y minería a pequeña escala en la extracción de yacimientos secundarios o placeres (lechos de las quebradas, lavaderos auríferos, o bien en otros terrenos), dichos lechos que vale mencionarlos, se originan por la desintegración de las rocas con la ayuda de agentes de meteorización (lluvia, viento y otros).

- Minería artesanal

Según la FUNEY (2002), consiste en el trabajo individual o familiar, el proceso de explotación es netamente físico y en él se integra grupos de 2, 3 y hasta 5 personas. Está actividad se utiliza como un medio de sustento; por lo general, se los ubica en las quebradas, en donde las actividades y sistemas de explotación se los realiza de manera rudimentaria con la generación de alta contaminación.



Figura 3. Explotación del Oro Tecnificada y Artesanal

- Minería a Pequeña Escala

La FUNEY (2002) la describe como un sistema más tecnificado que para realizarlo se necesita de una inversión más fuerte en equipos tecnológicos y

maquinaria pesada. Actualmente se encuentra un registro más o menos de este tipo de minería. (Tapia 2010).

2.3.5 Su impacto económico en el país

El sector minero representa un componente fundamental de las exportaciones colombianas. Las cifras más recientes señalan que 21.3% de las exportaciones totales se atribuyen a la minería.²⁵

A diferencia de lo que sucede con el PIB y el empleo del sector, el crecimiento sostenido del valor de las exportaciones sí ha contribuido al incremento de su participación en las ventas totales del país, al pasar de 13% en 1999 a 21.3% en el año 2006. No obstante, hay que subrayar que las exportaciones mineras alcanzaron su máxima participación en las ventas externas en 2003, registrando un relativo estancamiento a partir de ese año.

La inversión extranjera directa en el sector minero colombiano tuvo un desempeño discreto hasta fines de los años noventa. Aunque desde comienzos de este siglo las inversiones foráneas en el sector empezaron a registrar un mayor crecimiento, sólo a partir de 2003 han tenido una dinámica significativa. En el año 1998 se dio la menor inversión extranjera en el sector en los últimos quince años, lo que coincide con una caída generalizada de los flujos de capital foráneo al país como resultado de la crisis financiera internacional del momento. Sin embargo, en los años posteriores a la crisis se observa una tendencia creciente de la IED, con un máximo alcanzado en 2005.

La minería ha jugado un papel fundamental en el flujo de IED hacia Colombia en los últimos años. A pesar de haber registrado un comportamiento volátil antes de 1999, en los últimos años su participación en la inversión foránea directa ha sido creciente y en 2004 alcanza su máximo con una contribución de 41% y 2.157 millones de dólares. Los datos revelan un descenso en esa participación durante los últimos dos años. Para 2006 se estimó que la minería

²⁵En el momento en que se estaba desarrollando este informe, las cifras de los dos últimos años son proyecciones presentadas por el DANE.

sin hidrocarburos abarcaba un 28% del total de la inversión extranjera directa y, al igual que en las demás variables, hay evidencia de estancamiento para los últimos años. Cabe anotar que estos flujos de capitales recientes corresponden en su mayoría a proyectos que están siendo desarrollados desde hace algunos años por parte de grandes firmas mineras y, como tales, no significan necesariamente la llegada de inversionistas con nuevos proyectos de exploración.

2.3.6 Bases para el ordenamiento geoambiental área minera de Marmato²⁶

2.3.6.1 *Convergencia entre lo local y lo global: El caso de Marmato, Caldas. (Sandoval y Lasso)*

En Marmato es frecuente escuchar entre los mineros frases alusivas al abandono, la desinformación y la irresponsabilidad estatales, argumentando que desde que el Ministerio de Minas y Energía en el año 1990 dejó de administrar la zona alta y abandonó las tres plantas de beneficio que operaban (Cien Pesos, Santa Cruz y El Colombiano), se generó incertidumbre y desorden en el desarrollo de la actividad.²⁷

A lo largo de toda su historia, Marmato se configura como un municipio de vocación minera, con unas dinámicas sociales y culturales arraigadas en esta actividad y con una dinámica productiva muy poco diversificada y, por lo tanto, dependiente casi exclusivamente de la explotación aurífera, salvo por alguna actividad agrícola poco representativa. Actualmente Marmato es el principal municipio aurífero de Caldas, con una producción del 41% del oro del departamento y una importante proyección nacional e internacional, en un

²⁶ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Instituto Colombiano de Geología y Minería Servicio Geológico – INGEOMINAS. Bases para el ordenamiento geoambiental del área minera de Marmato (Caldas) Proyecto “Evaluación integral del geopotencial para fines de ordenamiento territorial”

²⁷ Diagnóstico de la minería en Marmato, elaborado por la ONG CENSAT Agua Viva en conjunto con la Cooperativa de Mineros de Marmato, en el marco del Taller de Evaluación Participativa de los Programas de Formalización de la MPE (Minería en Pequeña Escala) en Colombia, realizado por esta ONG en Medellín del 10 al 12 de Mayo de 2005; entrevistas estructuradas y semi estructuradas realizadas durante el trabajo de campo (Junio-Septiembre de 2010; Mayo-Junio de 2011).

atractivo para la inversión extranjera, particularmente después de la reforma al código minero que beneficia claramente los intereses de las compañías mineras multinacionales.

Con la promulgación del Nuevo Código de minas en 2001, el Ministerio delega la administración del recurso minero a 6 gobernaciones que actúan sobre su jurisdicción territorial como autoridad minera a partir del año 2002, incluyendo la Gobernación de Caldas, que a través de su Unidad de Delegación Minera, empieza a desarrollar el proceso de otorgamiento de títulos, surge la superposición entre distintas concesiones y la denuncia por parte de mineros usuarios de la politización de la entidad, además de las múltiples dificultades en el proceso de solicitud de títulos por la actitud de funcionarios públicos que exigían el pago de dinero a cambio del otorgamiento de licencias de explotación²⁸.

El Ministerio de Minas, bajo mandato del Código de Minas (Ley 685 de 2001) inicia en 2004 un proceso de legalización de la zona alta de Marmato, a través de INGEOMINAS y de la Unidad de delegación Minera de Caldas, otorgando 73 títulos mineros y tramitando 150 solicitudes. Pero el tiempo límite señalado por la Ley 685 es el año 2005, de tal manera que el proceso se desarrolla acelerada y desordenadamente y a la fecha, luego del vencimiento de los términos legales, aún hay solicitudes sin respuesta, según lo indican los mineros marmateños en entrevistas, foros y reuniones.

En el 2005 la Compañía canadiense “Colombia Goldfields” compra varias minas en la zona alta; algunos mineros que habían vendido sus derechos a la anterior compañía y que habían vuelto a tomar posesión ante la ausencia de la misma, vuelven a vender sus títulos. En diciembre de ese mismo año, el periódico El Colombiano de Medellín Germán Jiménez Morales, publica el artículo “El Cerrejón del oro”, en el cual se informa sobre una rueda de prensa

²⁸Unidad minera de Caldas, en la mira de las autoridades. Publicado en Diario La Patria el 3 de Marzo de 2010. “Entrevista realizada de 2011 a Ramón Lemus, Presidente de la Cooperativa Multiactiva de Mineros de Marmato

realizada el día anterior con Ian Park, presidente de la Cía. Minera de Caldas, recién adquirida por la empresa canadiense, el alto consejero de la presidencia para la productividad Fabio Valencia Cossio y Julián Villaruel, Director de INGEOMINAS, en la que se anuncia un proyecto de minería aurífera a cielo abierto que requeriría el desplazamiento del pueblo:

“Marmato, el municipio de Caldas conocido históricamente como ‘El cerro de oro’ o ‘El pesebre de oro de Colombia’, podría convertirse en la versión aurífera de la explotación carbonífera de El Cerrejón, si prospera la iniciativa de inversionistas internacionales que están listos para comprar las pequeñas minas y para reubicar a sus pobladores...El empresario [Ian M. Park] agrega que “estamos dispuestos a hacer una ayuda grande para la comunidad, pero en conjunto con el Gobierno, porque yo no me voy a tomar toda la responsabilidad social...La comunidad decidió el sitio del traslado (...) La mayoría de la gente quiere mudarse, porque la inestabilidad de los terrenos es fuente de desastres” .

El Estado anunciaba su apoyo a un proyecto a cielo abierto, declarando el inminente traslado del pueblo, sin la aprobación por parte de la comunidad que sería la directamente afectada. La comunidad marmateña que hasta entonces ignoraba los planes de la empresa para desarrollar minería a cielo abierto, se entera a través de la prensa, del apoyo que el Estado da a esta iniciativa.

Bajo estas circunstancias, los pequeños empresarios mineros locales, empiezan a ver alterada su posición de poder y sus intereses a causa de los cambios económicos que supone la entrada de la multinacional en el nivel local. Mineros artesanales, obreros, barequeros, comerciantes, intermediarios, joyeros, empresarios y políticos locales serán afectados por el nuevo ordenamiento jurídico que producirá cambios en las relaciones productivas a nivel nacional.

Con el nuevo Código de Minas, la actividad del minero artesanal pasa a ser considerada ilegal, los políticos locales buscan una buena posición en las nuevas relaciones de poder con los ejecutivos de la compañía, los comerciantes e intermediarios tejen nuevas redes con la minería ilegal, ya que, la compañía monopoliza todo el ciclo de la extracción a la exportación.

2.3.6.2 EL RIESGO: un argumento en disputa²⁹

Más de 450 años de explotación tradicional de oro en el cerro de Marmato se aprecian a lo largo y ancho de sus laderas, por donde se desparraman las rocas estériles acumuladas que se desechan de las minas sin ningún control o precaución. La falta de planificación y presencia de la autoridad ambiental estatal ha ocasionado una crisis ambiental que va desde la apertura descontrolada y caótica de bocaminas en todo el cerro, hasta la superposición de títulos y la vulnerabilidad de algunas zonas como consecuencia de la disposición inadecuada de escombros. El proceso de urbanización del municipio de Marmato se ha realizado de manera espontánea e incontrolada; el Estado no ha orientado racionalmente este proceso, sino que se ha limitado a observar, sin ejercer ningún control o fiscalización. Desde la época de la colonización, el poblamiento del territorio ha seguido la dinámica de la exploración minera, de tal forma que las casas se construyeron cerca de la boca mina, con lo que en el municipio es frecuente encontrar casas sobre los predios mineros, con los consecuentes riesgos que ello implica.

Un estudio, realizado en 1989 para INGEOMINAS por Humberto Caballero e Isabel Mejía, “Consideraciones preliminares acerca de los problemas de inestabilidad en Marmato-Caldas” (Informe interno inédito), concluye que es necesario adelantar una serie de acciones técnicas de planificación, adecuación y capacitación que contribuyan a disminuir los efectos de las amenazas naturales y antrópicas existentes. Los resultados arrojados por tal

²⁹ Revistas científicas: riesgo: teoría y realidad. El caso de Marmato Caldas

estudio motivan la realización de un proyecto de relocalización de la población de Marmato presentado por la gobernadora de Caldas en 1992.

En 1993 se lleva a cabo un nuevo estudio, “Reconocimiento Preliminar de los procesos Geoquímicos e Impacto Ambiental de la Minería del Oro en algunas Regiones de Colombia”, realizado por Luz Myriam González y Gloria Prieto, quienes recomiendan desarrollar actividades de exploración en la zona baja para lograr una mejor evaluación de las reservas existentes; y para la zona alta la recomendación consistente en efectuar el traslado de las casas a la parte baja por los problemas de contaminación identificados.

En el año 2003, aparece un nuevo estudio denominado “Evaluación Fenómeno de Subsistencia en el casco urbano del municipio de Marmato, departamento de Caldas” realizado por Ricardo Arturo Méndez Fajury, cuyas conclusiones se asemejan en buena medida a las planteadas por estudios anteriores, la actividad minera ha generado la problemática de inestabilidad en las edificaciones del casco urbano, representa un riesgo para los habitantes por los agrietamientos y pérdida de soportes llamándose la atención sobre el estado interno de las minas debido al colapso de algunos techos de las mismas que han cobrado la vida de algunas personas.

Finalmente, en el año 2004, Corpocaldas realiza el estudio “Caracterización Geológica–Geotécnica y Evaluación de Riesgos para el municipio de Marmato departamento de Caldas”, en el que recomienda concertar con la comunidad el tratamiento y disposición de los materiales estériles, su aprovechamiento en el mejoramiento de la red vial del municipio, así como la realización de obras civiles y de bioingeniería en las zonas con inestabilidad geológica, para canalizar las aguas ácidas provenientes de la actividad minera. En suma, se recomienda: “Evacuación de la zona antigua de Marmato por el alto riesgo que presenta debido a los procesos erosivos y la contaminación” (Guzmán, 2009).

Todos los estudios señalan los riesgos generados por la actividad minera sobre las laderas de Marmato y la vulnerabilidad que generan para las construcciones urbanas. Aunque ninguno de ellos señala que la totalidad del municipio se encuentre en alto riesgo de fenómenos de remoción de escombros o deslizamiento, si se afirma la necesidad de trasladar las viviendas y edificaciones institucionales localizadas en la parte alta del cerro, en donde se presentan los más preocupantes casos de inestabilidad como consecuencia de la confluencia del uso del suelo urbano con el uso del suelo industrial dedicado a la minería.

La solución propuesta por el Estado es el traslado del casco urbano. En los documentos institucionales como en ruedas de prensa se defiende el traslado y la viabilidad de la minería a cielo abierto, sin tener en cuenta los procedimientos estipulados por la reglamentación internacional (Manual para la preparación de un Plan de Acción para un reasentamiento. Corporación Financiera Internacional del Banco Mundial y Convenio 169 de la OIT)³⁰, como por la normativa nacional, que exigen informar y consultar para obtener el consentimiento de las comunidades afectadas por un desplazamiento o reubicación forzosa³¹, en particular al tratarse de un territorio con presencia de población afro descendiente e indígena en un 56,5% y en un 17,6%, respectivamente, tal como lo establece el Censo del Departamento Nacional de Estadística DANE de 2005³².

En el trabajo de campo se identificó la baja percepción del riesgo por parte de los mineros de Marmato, consideran que el tema del riesgo constituye una maquinación del Estado y la multinacional para poder realizar el traslado y preparar el territorio para la gran minería a cielo abierto:

³⁰Este manual estipula los procedimientos mediante los cuales se debe realizar un reasentamiento involuntario de la población cuando es motivado por algún proyecto de importancia económica. Corporación Financiera Internacional. Manual para la preparación de un plan de acción para el reasentamiento. Pág. 2.

³¹Este mecanismo se denomina “consulta previa libre e informada” para los casos de lugares donde vivan comunidades indígenas y afrodescendientes; este mecanismo no es suficiente per se se requiere además el “consentimiento previo, libre e informado”.

³²DANE. Boletín del Censo General 2005-2008. Perfil Marmato, Caldas.

La percepción del riesgo que tienen los habitantes de Marmato se relaciona con las aspiraciones de la multinacional de realizar minería a cielo abierto más que con la inestabilidad geológica de la montaña. El riesgo, para ellos, no es el deslizamiento sino el traslado por intereses económicos, lo que se corrobora en los resultados de la prueba piloto de instrumento cuantitativo desarrollado para esta investigación y aplicada en junio de 2011.

El riesgo se convierte en una disputa entre todos los agentes del campo minero local y es manipulado políticamente para imponer el punto de vista dominante al respecto. El Estado realiza estudios a causa de algunos deslizamientos en épocas de invierno, pero no acata sus propias recomendaciones, no se realizan las obras y acciones de mitigación indicadas en los documentos; únicamente se desarrollan labores de reubicación interrumpidas, acciones institucionales asistenciales de emergencia en condiciones límite, pero no se da una solución estructural al conflicto socio ambiental de prevención mediante obras de infraestructura y capacitación a los mineros. Éstos por su parte no aceptan que exista tal riesgo y lo ven como el principal argumento a favor de los intereses de la multinacional.

A partir de los deslizamientos ocurridos entre mayo y junio de 2006, la incertidumbre y la conjunción de diferentes opiniones, como percepciones del problema se generalizan en la cotidianidad del municipio. La empresa Colombia Goldfields (Cía. minera de Caldas) empieza a hablar con mayor seguridad de los resultados de la exploración y del método a emplear para extraer el oro: minería superficial o de cielo abierto. A sólo 4 meses de la ocurrencia de los fenómenos de deslizamiento en la zona alta del Cerro, en donde se ubicaban viviendas y toda la infraestructura institucional (Banco, Hospital, Alcaldía, Registraduría).

Capítulo 3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan algunos conceptos básicos para el desarrollo de este trabajo como son, primero, las concepciones sobre drenaje ácido de mina (DAM), su problemática y las formas existentes de control, segundo el impacto de metales sobre el medio ambiente y la salud humana y por último una revisión de antecedentes sobre tratamientos de DAM.

3.1. Drenaje ácido

3.1.1 Definición:

Drenaje ácido de mina (DAM) es el agua contaminada originada de la explotación minera, ya sea superficial o profunda, típicamente de alta acidez, rica en sulfato y con niveles elevados de metales pesados, principalmente hierro, manganeso y aluminio. Debido a la alta cantidad de hierro oxidado, el drenaje ácido de la mina es a menudo rojizo coloreado.

El drenaje ácido de la mina ocurre cuando los minerales del sulfuro se ponen en contacto con el oxígeno y el agua, condiciones favorables para su oxidación química o a la oxidación rápida por bacterias tales como *Thiobacillus ferrooxidans*. Algunos autótrofos de hierros oxidados tales como *Leptospirillum ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus brierleyii* se pueden asociar también a la oxidación mineral biológica. (Gamonal, 2004).

Como resultado de esa oxidación, el ácido sulfúrico se genera dando condiciones ácidas a los efluentes de la mina. La pirita es comúnmente asociada tanto con las situaciones de minas de carbón como las minas de metal, "pero el drenaje ácido de minas de metal presenta un problema más severo que la mayoría de drenajes de mina de carbón porque los agentes prioritarios de contaminación tal como AS, Cd, Pb, Hg, Cu y Zn pueden estar presentes en peligrosas concentraciones" (Wildeman y Laudon, 1989).



Figura 4. Forma natural de la pirita

Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, lo siguiente:

pH, acidez, alcalinidad;

Sulfatos

Nutrientes

Metales (disueltos o totales)

Nucleídos radiactivos

Sólidos disueltos totales (SDT)

Sólidos suspendidos totales (SST)

Generalmente el drenaje ácido se caracteriza por valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5, alcalinidad decreciente y acidez creciente, concentraciones elevadas de sulfato, concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales), concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales.³³

3.1.2 Problemática de los drenajes ácidos de minas

En relación a estos drenajes ácidos existen informes sobre la mortandad de peces y crustáceos de ríos, afecciones al ganado, y destrucción de cultivos y riberas; siempre asociado a una coloración ocre-amarillenta de los lechos de ríos y lagos afectados, y un incremento de la turbiedad de las aguas. La contaminación que producen los drenajes ácidos de mina ha sido profusamente descrita por numerosos investigadores (Nordstrom y Alpers, 1999; Morin y Hutt, 2001; Mills, 1995).

³³ Normas Técnicas para Diseño Ambiental (Guías)

La preocupación ambiental con respecto al drenaje ácido generalmente, es el impacto adverso de los contaminantes, particularmente los metales disueltos, en la vida acuática del medio receptor y en la calidad del agua para beber³⁴.

El alcance y la magnitud de estos fenómenos también han sido objeto de atención por parte de diversos organismos y autores. En 1985 la USEPA (United States Environmental Protection Agency) estimó que en Estados Unidos existían cerca de 5×10^{10} toneladas de residuos mineros con altos contenidos de metales pesados con riesgo de producir drenajes ácidos, y que cada año se venían generando más de 10^9 toneladas de estériles de mina y residuos de plantas de beneficio que deberían ser tratados para que no generen aguas ácidas. (López 2002)

De igual forma, en 1994, la USEPA en el Documento Técnico *Acid Mine Drainage Prediction*, incluye información del U.S. Forest Service (1993) en donde se estimaba que en el Oeste de Estados Unidos existían entre 20.000 y 50.000 minas que estaban generando drenajes ácidos que afectaban y contaminaban de 8.000 a 16.000 km de riberas de ríos con metales como cadmio, cobre, plata, cinc y arsénico. Este documento también hace referencia a un informe de Kim et al. (1982) donde se describe que en el Este de los Estados Unidos existen más de 7.000 km de cursos de aguas superficiales afectados por drenajes ácidos de minas de carbón, cuyo tratamiento es muy costoso y de gran dificultad. (López 2002).

En la última conferencia internacional sobre Drenaje Acido de Roca (*International Conference on Acid Rock Drainage*) (ICARD 2000), el Departamento del Interior de EEUU informó que en su Programa de Clausura de Minas tienen localizadas más de 100.000 zonas mineras en estado de abandono con problemas de aguas ácidas, en el mismo evento Canty informa que existen cerca de 16.000 km de ríos y 117 km² de embalses afectados por drenajes ácidos. En el año 2000 la USEPA llega a estimar la existencia de más

³⁴ Normas Técnicas Para Diseño Ambiental (Guías)

de 4.400 km² de zonas abandonadas por minas de carbón, 15.625 km de cauces de ríos contaminados por drenajes ácidos, 66 km² de escombreras peligrosas y 3,5 km² de presas inestables.

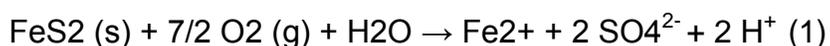
Este panorama de las aguas ácidas descrito para Norteamérica es extrapolable al resto de países con cierta actividad minera (Reino Unido (Younger, 1997), Canadá (Morin y Hutt, 2001), Australia (Environment Australia, 1997), etc.), de ahí la necesidad de buscar soluciones de fácil aplicación y de bajo coste para reducir esta contaminación, con el fin de salvaguardar el recurso hídrico y el medio físico en el que habitamos.

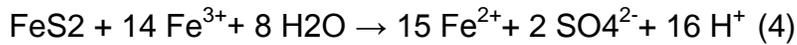
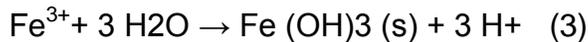
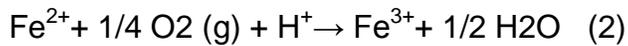
Como referencia, podemos decir que en el sur de la península Ibérica disponemos de la mayor reserva de piritas del mundo. Su oxidación genera auténticos ríos de aguas ácidas como el Tinto y el Odiel (Huelva), cuya aportación representa el 10% de la masa mundial de metales descargados a los océanos.

3.1.3 Generación de aguas ácidas

Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; esta oxidación se ve favorecida en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras de acceso y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos así como al incremento de la superficie de contacto de las partículas. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

Las reacciones que intervienen en la oxidación de la pirita pueden ser representadas por las siguientes cuatro ecuaciones (Skousen et al., 1998; Nordstrom y Alpers, 1999; Mills, 1999; USEPA, 1996 y 2000; entre otros).





En la reacción de oxidación de la pirita (1) se produce Fe^{2+} , SO_4^{2-} e H^+ . Esta reacción provoca un incremento en el total de sólidos disueltos y un aumento de la acidez, que irá asociado a una disminución del pH. Si el ambiente circundante es lo suficientemente oxidante, entonces muchos iones ferrosos se oxidarán a iones férricos (etapa 2). Por lo general, por encima de un pH alrededor de 3,5, el ion férrico formado precipita mediante hidrólisis como hidróxido (3), disminuyendo por tanto el (Fe^{3+}) en solución, mientras que el pH baja simultáneamente. Por último, algunos cationes férricos (Fe^{3+}) que se mantienen en solución, pueden seguir oxidando adicionalmente a la pirita y formar Fe^{2+} , SO_4^{2-} y H^+ (4).

Cinéticamente, la oxidación del Fe^{2+} a Fe^{3+} es la reacción más lenta a pH ácido. A pH por encima de 4 la velocidad de la reacción aumenta drásticamente, casi todo el Fe está en forma de Fe^{3+} y precipita como hidróxido (3). A pH por debajo de 4, sin embargo, la mayoría del Fe en solución es Fe^{2+} , aunque la acción bacteriana (*Thiobacillus ferrooxidans*) consigue acelerar el proceso y que progresivamente el Fe^{2+} pase a Fe^{3+} . Parte del Fe^{3+} se emplea en oxidar más pirita (4) y parte precipita como hidroxisulfatos (schwerimannita a pH entre 3 y 3,5).

La geoquímica de las aguas ácidas de mina es un fenómeno complejo al haber diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción, liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes. En el trabajo de Nordstrom y Alpers (1999) se presenta una relación exhaustiva de procesos específicos que se han estudiado, y se ha comprobado que contribuyen en su conjunto en la geoquímica de las aguas ácidas de mina.

Estos procesos son los siguientes:

- La oxidación de la pirita.
- La oxidación de otros sulfuros.
- La oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales.
- La capacidad neutralizadora de la ganga mineral y roca encajante.
- La capacidad neutralizadora de las aguas bicarbonatadas.
- La disponibilidad de oxígeno.
- La disponibilidad de agua líquida o en forma de vapor.
- La localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo.
- Las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas).
- La formación de eflorescencias y su redisolución.
- El calentamiento por conducción y radiación del calor generado en diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado).
- La temperatura.
- La acción de catálisis de las bacterias.
- La adsorción microbiana de metales.
- La precipitación y disolución de minerales durante el transporte.
- Adsorción y desorción de metales durante el transporte.
- Fotoreducción del hierro.
- La formación de complejos orgánicos.
- Los procesos microambientales sobre superficies o entorno a organismos.

Las reacciones ocurridas en el DAM generan como producto soluciones ácidas, las cuales se van acumulando, y dan como resultado una disminución considerable del pH en el microambiente de los minerales, estabilizándose en valores típicos de 2.5 - 30. Es importante destacar que una tonelada de pirita puede producir cerca de una tonelada y media de ácido sulfúrico. El resultado

son soluciones fuertemente corrosivas, que lixivian e incorporan metales pesados desde la roca.

El vertido de estas soluciones afecta la química de las aguas superficiales y subterráneas, planteando problemas ambientales de diversa índole:³⁵

- Contaminación de los cuerpos de agua cercanos.
- Degradación de los ecosistemas acuáticos.
- Impacto sobre la flora y fauna del lugar.
- Imposibilita el uso agrícola y para consumo humano.
- Daño a estructuras metálicas y de hormigón.
- Problemas en la restauración de terrenos al fin de la vida útil de la mina.
- Impacto paisajístico.

La importancia que tiene el problema de la formación de aguas ácidas ha llevado a desarrollar y establecer una serie de ensayos capaces de determinar el potencial generador de acidez de los residuos mineros. La USEPA (1994) en un documento técnico sobre predicción de drenajes ácidos de mina hace un análisis de cada uno de los tipos de ensayos empleados en la predicción del potencial generador de ácido: estáticos, cinéticos y modelos matemáticos. Los ensayos estáticos predicen la calidad de los drenajes mediante la comparación entre la capacidad de neutralización y el potencial de generación ácida. Los ensayos cinéticos se basan en reproducir en el laboratorio los procesos y las condiciones de los lugares de mina que pueden generar acidez, dando información sobre el rango de producción ácida; estos ensayos conducen a confirmar los resultados de los ensayos estáticos, los cuales requieren de mayor tiempo y son más costosos que éstos.

Por último, la modelización matemática permite predecir la calidad de las aguas y la generación ácida de los drenajes, mediante la simulación para largos

³⁵ Área minera. El sitio de la minería. Artículos de interés

períodos de tiempo de todas las variables y condiciones que afectan a la formación de aguas ácidas.

3.1.4 Control del DAM

Los métodos de tratamiento convencionales o activos de aguas ácidas tienen un coste elevado, por lo que no pueden ser mantenidos por un período prolongado una vez finalizada la vida de la mina. Máxime teniendo en cuenta que el problema de las aguas ácidas pueden perdurar, según las estimaciones de Younger (1997), varios cientos de años. En la última década se han investigado diversos métodos de tratamiento pasivo y se ha comprobado que dan buenos rendimientos en la neutralización del pH y en la eliminación de metales pesados. Además, requieren poco mantenimiento y su bajo coste puede ser asumido durante largos períodos de tiempo (de 20 a 40 años) una vez clausurada la instalación minera (Watzlaf, 1997b).

Los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, en donde se modifican favorablemente ciertas características de las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH.

Entre los métodos pasivos que más se han utilizado destacan los humedales aerobios, los humedales anaerobios o balsas orgánicas, los drenajes anóxicos calizos (ALD, Anoxic Limestone Drains), los sistemas reductores de sulfato y producción de alcalinidad (RAPS, Reducing Alkalinity Producing Systems) y las barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (PRB, Permeable Reactive Barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo del tipo de drenaje ácido y de los requerimientos del tratamiento. (López 2002)

El control de la generación de ácido se puede hacer a través de la remoción de uno o más de los componentes esenciales: azufre, aire, agua. Algunas formas de control son:

- Separación de los desechos y mezcla. Se trata de mezclar la roca generadora de ácido con otro tipo de roca, cuya composición sea neutralizadora, creando un pH neutro.
- Aditivos base. Material alcalino, tales como caliza, cal, ceniza de soda pueden ser agregados a la roca sulfurosa con el fin de amortiguar las reacciones productoras de ácido.
- Cubrimientos. Tierra, arcilla y coberturas sintéticas pueden ser puestas sobre la roca generadora de ácido, con el fin de minimizar la infiltración de agua y aire.
- Bactericidas. La introducción de ciertos químicos que reducen la bacteria (*Thiobacillus ferrooxidans*) que cataliza las reacciones de la generación de ácido ha resultado bastante efectiva.

La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* se emplea en procesos de lixiviación bacteriana, también conocida como biolixiviación de minerales, un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias con habilidad de oxidar minerales sulfurados, permitiendo la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos.(Guerrero 1998)

En términos más globales se puede señalar que la biolixiviación es una tecnología que emplea bacterias específicas para lixiviar o extraer un metal de valor como uranio, cobre, zinc, níquel y cobalto presente en un concentrado de mineral. El producto final de este proceso es una solución ácida que contiene el metal en su forma soluble.

- Colección y tratamiento de los contaminantes. Se trata de captar el drenaje ácido y someterlo a tratamiento, a través de métodos pasivos o activos.
- Balsas anaerobias, en las que se pretende que se invierta el proceso de la oxidación de sulfuros. Para ello se crean condiciones reductoras, de tal

forma que se produzca la reducción de los sulfatos que, en presencia de Fe^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , etc. precipitarían en forma de sulfuros.

Esta reacción además contribuye a neutralizar la acidez, no obstante estos suelen incluir capas calizas para aumentarla alcalinidad del agua.

- Sistemas reductores y productores de alcalinidad, que se basan en conseguir condiciones reductoras para impedir que el hierro disuelto en el agua pase a Fe^{2+} y posteriormente se añade calcita para aumentar la alcalinidad del agua. El primer paso para conseguir condiciones reductoras es necesario pues en condiciones oxidantes el Fe^{3+} en contacto con la calcita precipita recubriéndola completamente impidiendo que continúe su disolución.
- Utilización de cenizas volantes, residuo alcalino que se obtiene en las centrales térmicas de carbón, para el tratamiento de las escombreras mineras. Experiencias llevadas a cabo en laboratorio han puesto de manifiesto que cuando los sulfuros entran en contacto con las cenizas volantes se produce una capa endurecida que impediría la entrada de agua y oxígeno en el interior de la escombrera, de forma que disminuiría la generación de lixiviados ácidos.
- Humedales aerobios, (aunque sólo son de aplicación en aguas ligeramente ácidas), el recubrimiento de las escombreras con materiales impermeables (geotextiles o arcillas), la utilización de bactericidas, barreras permeables reactivas, etc.

Sin embargo, si los caudales son muy elevados y los niveles de contaminación de los lixiviados producidos son muy altos, muchas de estas medidas son difícilmente aplicables.

3.2. Impacto de metales sobre el medio ambiente y la salud humana.

- Contaminación por aluminio:

El aluminio es uno de los metales más ampliamente usados y también uno de los más frecuentemente encontrados en los compuestos de la corteza terrestre. Debido a este hecho, el aluminio es comúnmente conocido como un compuesto inocente. Pero cuando es expuesto a altas concentraciones, puede causar problemas de salud. La toma de aluminio puede tener lugar a través de la comida, al respirarlo y por contacto en la piel. La toma de concentraciones significantes de aluminio puede causar un efecto serio en la salud como daños al sistema nervioso central, demencia, pérdida de la memoria, apatía, temblores severos.

El aluminio es un riesgo para ciertos ambientes de trabajo, como son las minas, donde se puede encontrar en el agua, el aluminio se encuentra en altas concentraciones en lagos ácidos, en el aire, en aguas subterráneas y suelos ácidos como los causados por el drenaje ácido de mina. (Bianchini 2006)

- Contaminación por manganeso:

Los compuestos del manganeso existen de forma natural en el ambiente como sólidos en el suelo y pequeñas partículas en el agua. Las partículas de manganeso en el aire están presentes en las partículas de polvo. Estas usualmente se depositan en la tierra en unos pocos días.

Para algunos animales la dosis letal es bastante baja, lo cual significa que tiene pocas posibilidades de supervivencia incluso a pequeñas dosis de manganeso cuando este excede la dosis esencial. El manganeso puede causar disturbancias en los pulmones, hígado y vasculares, decremento de la presión sanguínea, fallos en el desarrollo de fetos de animales y daños cerebrales.

Cuando los hombres se exponen al manganeso por un largo periodo de tiempo el daño puede llegar a ser importante, un síndrome que es causado por el manganeso tiene los siguientes síntomas: esquizofrenia, depresión, debilidad de músculos, dolor de cabeza e insomnio. (Lenntech 1993) ³⁶

- Contaminación por hierro

El hierro en altas concentraciones, puede ser peligroso para el medio ambiente. Este puede ser encontrado en carne, productos integrales, patatas y vegetales. El cuerpo humano absorbe hierro de animales más rápido que el hierro en las plantas. El hierro es una parte esencial de la hemoglobina; el agente colorante rojo de la sangre que transporta el oxígeno a través de nuestros cuerpos. Pero en altas dosis puede provocar conjuntivitis, corioretinitis y retinitis si contacta con los tejidos y permanecen en ellos. La inhalación crónica de concentraciones excesivas de vapores o polvos de óxido de hierro puede resultar en el desarrollo de una neumoconiosis benigna, llamada siderosis. Ningún daño físico de la función pulmonar se ha asociado con la siderosis. La inhalación de concentraciones excesivas de óxido de hierro puede incrementar el riesgo de desarrollar cáncer de pulmón en trabajadores expuestos a carcinógenos pulmonares. (Bianchini 2006)

- Contaminación por arsénico:

Puede haber efectos a la salud a corto y largo plazos como resultado de la exposición de los seres humanos al arsénico. La exposición a corto plazo a altas dosis de arsénico puede tener efectos adversos, pero la exposición a largo plazo o crónica ha sido ligada al cáncer de la vejiga, pulmonar, de la piel, renal, de las vías nasales, del hígado y de la próstata. (Tischler, 2007)

³⁶ Lenntech fue creado en 1993 por alumnos de la universidad técnica de Delft, en los Países Bajos. Todavía se encuentra dentro del campus de la universidad. Su principal objetivo es desarrollar, diseñar, fabricar e instalar sistemas de purificación de aire y de agua no dañinas con el medioambiente para la industria - por todo el mundo.

- Contaminación por cadmio

El cadmio es un metal pesado que produce efectos tóxicos en los organismos vivos, aun en concentraciones muy pequeñas.

El cadmio puede ser encontrado mayoritariamente en la corteza terrestre. Este siempre ocurre en combinación con el zinc. El cadmio también se consigue en las industrias como inevitable subproducto de extracciones de zinc, plomo y cobre. La toma por los humanos de cadmio tiene lugar mayormente a través de la comida.

Cuando la gente respira el cadmio, éste puede dañar severamente los pulmones. Esto puede incluso causar la muerte. Otros efectos sobre la salud que pueden ser causados por el cadmio son: diarreas, dolor de estómago y vómitos severos, debilitamiento óseo, fallos en la reproducción y posibilidad incluso de infertilidad, daño al sistema nervioso central, daño al sistema inmune, desórdenes psicológicos, posible daño en el ADN o desarrollo de cáncer.

- Contaminación por mercurio:

El mercurio es un metal pesado que puede trasladarse grandes distancias una vez que es emitido a la atmósfera, que al asentarse en medios acuáticos se transforma en metilmercurio. Esta potente neurotóxica se asienta en peces y otros animales, y luego en los humanos al pasar a formar parte de su dieta. Afecta el sistema nervioso, riñones e hígado. Ocasiona trastornos mentales y daños en el sistema motor, sistema reproductor, en el habla, la visión y el oído. También es posible su contaminación por contacto con la piel e inhalaciones de gases producto de su uso en procesos industriales. Hay casos en varias partes del mundo de comunidades gravemente dañadas, con casos de muerte, por contaminación con mercurio. Para completar el mercurio no desaparece del ambiente, permanece donde sea depositado, aumentando el nivel de contaminación con el paso del tiempo.

- Contaminación por zinc:

El Zinc ocurre de forma natural en el aire, agua y suelo, pero las concentraciones están aumentando por causas no naturales, debido a la adición de Zinc a través de las actividades humanas. La mayoría del Zinc es adicionado durante actividades industriales, como es la minería, la combustión de carbón y residuos y el procesado del acero. La producción mundial de Zinc está todavía creciendo. Esto significa básicamente que más y más Zinc termina en el ambiente.

El zinc puede también incrementar la acidez de las aguas. Algunos peces pueden acumular Zinc en sus cuerpos, cuando viven en cursos de aguas contaminadas con Zinc, cuando el Zinc entra en los cuerpos de estos peces este es capaz de biomagnificarse en la cadena alimentaria.

Grandes cantidades de Zinc pueden ser encontradas en los suelos. Cuando los suelos son granjas y están contaminados con Zinc, los animales absorben concentraciones que son dañas para su salud. El Zinc soluble en agua que está localizado en el suelo puede contaminar el agua subterránea.

El Zinc no sólo puede ser una amenaza para el ganado, pero también para las plantas. Las plantas a menudo tienen una toma de Zinc que sus sistemas no puede manejar, debido a la acumulación de Zinc en el suelo. En suelos ricos en Zinc sólo un número limitado de plantas tiene la capacidad de sobrevivir.

Finalmente, el Zinc puede interrumpir la actividad en los suelos, con influencias negativas en la actividad de microorganismos y lombrices. La descomposición de la materia orgánica posiblemente sea más lenta debido a esto. (Lenntech 1993)

- Contaminación por sulfatos:

Los sulfatos constituyen un peligro serio para la salud, habiéndose demostrado que concentraciones muy bajas de ellos ejercen efectos adversos sobre los asmáticos, los ancianos y otras personas susceptibles con problemas respiratorios crónicos.os

De todos los contaminantes de los cursos de agua, quizás el drenaje ácido de mina (en inglés Acid Mine Drainage o AMD) sea uno de los más graves, por su naturaleza, extensión y dificultad de resolución. Los ríos y acuíferos afectados por este tipo de contaminación se caracterizan por su acidez, así como por el alto contenido en sulfatos y metales pesados de sus aguas y por el contenido metálico de sus sedimentos.

La complejidad de extraer el mineral y sus subproductos desde las rocas mineralizadas no sólo radica en la gran variedad de procesos que requiere, sino también en que esta actividad genera un residual sólido, emisiones gaseosas y efluentes líquidos que contienen especies metálicas y otros contaminantes.

Los efluentes líquidos más importantes en minería corresponden a drenajes ácidos de mina, aguas de escorrentía e infiltración que atraviesan la roca mineralizada, relaves provenientes de los procesos de concentración, soluciones gastadas utilizadas en los procesos de lixiviación, extracción por solvente y electro obtención, y aguas provenientes del lavado de gases en fundiciones y plantas de ácido.

Independiente de la actividad o proceso que genera el efluente, los contaminantes asociados a estos procesos frecuentemente corresponden a metales, sulfatos y otros componentes inorgánicos.

Los principales focos productores de AMD en las explotaciones mineras son los drenajes de las minas subterráneas, por bombeo en las minas activas y por gravedad en las abandonadas, las escorrentías en la minería a cielo abierto y los lixiviados de las escombreras y residuos mineros. (Sainz, 2005)

El drenaje ácido de la mina puede emanar desde diferentes actividades y lugares. Entre ellos:

- Trabajos en la superficie y subterráneos.
- Desechos rocosos (provenientes de la planta chancadora).
- Sitios de acopio de estériles provenientes de la molienda u otro.

- Desechos provenientes de embalses de relave, flotación, entre otros.

3.3. Antecedentes de tratamientos del DAM

En Estados Unidos desde hace más de 15 años muchos investigadores y organismos oficiales vienen desarrollando con buenos resultados el empleo de sistemas de tratamiento pasivo para drenajes ácidos de mina. Entre 1984 y 1993 el U.S. Bureau of Mines estudió 13 humedales destinados al tratamiento de drenajes ácidos de minas de carbón, alcanzándose eliminación es superiores al 85% de los metales (López, 2002). En 1985 junto con la Tennessee Valley Authority construyeron 14 humedales para tratar drenajes ácidos procedentes de plantas mineras de carbón, consiguiendo incrementar el pH de 3,1 a 6,7 y una reducción para el Fe de 69 a 0,9mg/l y para Mn de 9,3 a 1,8 mg/l (USEPA, 1996).

De igual forma entre 1987 y 1990 la USEPA encargó a la Colorado School of Mines realizar unos estudios teóricos para el diseño de humedales dedicados a la eliminación de metales de aguas ácidas de mina. Una vez concluido este proyecto se publica un manual: *Hand book for Constructed Wetlands Receiving Acid Mine Drainage* (Wildeman et al., 1993), en el que se describen numerosos casos de laboratorio y de campo, la filosofía de funcionamientos alcanzados en el tratamiento de aguas ácidas con elevados contenidos metálicos, así como los costes de construcción y operación de estos sistemas.

El nivel alcanzado con este tipo de tratamientos es tal que en la guía *Best Management Practices* elaborada por el Departamento del Agua de la USEPA, en la que se hace un inventario exhaustivo de áreas afectadas por drenajes ácidos de minas de carbón y que requieren su remediación, se recomienda el uso de tecnologías de tratamientos pasivos (humedales, RAPS, ALD y otros) por su reducido coste y gran eficacia, y llegan a proponer la incorporación de estos sistemas en los planes de restauración y clausura de las minas en operación (USEPA, 2000).

En Canadá también se vienen aplicando sistemas pasivos en el tratamiento de drenajes ácidos. Entre 1990 y 1993 se construyeron dos humedales anaerobios experimentales para tratar las aguas ácidas de la mina de cobre *Bell Copper* (British Columbia). En los dos sistemas se incrementó el pH desde 3 hasta 6-8 y se lograron reducciones del 40 % y del 80 % de Cu con un tiempo de retención de 12 y 23 días, respectivamente. El rendimiento mejoraba al incrementarse el tiempo de retención y disminuía al descender la temperatura como reflejo de una menor actividad biológica (Sobolewski, 1996).

En el norte de Australia (Darwin, Adelaide y Katherine) a inicios de los 90 se estudian las mejoras en la calidad de los drenajes ácidos provenientes de minas de oro, uranio y polimetálicas, con humedales construidos por diferentes empresas mineras. Aunque en la mayoría de los casos no superan los 10 años, se ha demostrado la viabilidad de la aplicación de estos sistemas en climas de marcados contrastes térmicos. En la mina de oro Tom's Gullyse ha logrado reducir en más del 90 % las concentraciones de As, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb y U, y cerca del 75 % la del Mn (Noller, 1994)

También en 1995 se construyeron humedales a escala piloto para tratar los drenajes ácidos de la mina de carbón Gregory, en Queensland. En esta región de moderada pluviometría (<650 mm) y alta evaporación (>2000 mm) se han conseguido bajar los niveles de sulfato e incrementar el pH de 3,3 a 5,4-6,7, existiendo la necesidad de diseñar humedales de flujos subsuperficiales o sistemas RAPS para maximizarla eliminación del sulfato y minimizar la evaporación (Tyrrell et al., 1997).

En Europa también se ha empezado a experimentar con estos sistemas. Así en el Reino Unido existen más de 14 humedales operando con sistemas de producción de alcalinidad, procesos aerobios y anaerobios, o una combinación de éstos. Están dedicados al tratamiento de aguas ácidas de minas de carbón, donde se ha llegado a eliminar más del 50 % de Fe. En febrero de 1995 se construyó en Quaking Houses de Durham (Inglaterra) el primer humedal anaerobio de Europa, consiguiéndose reducir en un 70 % la acidez del agua

(9,6 g/m²día) y en un 62% su contenido en Fe. De igual forma en abril de 1998 se construyó el primer RAPS³⁷ en Pelenna (Gales), en el que se logró eliminar entre un 72-99 % de Fe con un tiempo de retención del agua en el sistema de 14 horas (Younger, 1997 y 1998).

En junio de 1998, en el sur de Noruega, se construyó a escala piloto un sistema de humedales aerobios y anaerobios para tratar los drenajes ácidos de presas de residuos de la mina de níquel Storgangen. Para un caudal de 35 l/min y un tiempo de retención de 10 horas se eliminaba cerca del 98 % de Ni, observándose en invierno una disminución en la reducción de Ni de 35 a 71 % y en verano un incremento de 64 a 99 %. También se consiguieron buenos resultados en la eliminación de Al (96 %), Cu (98 %), Cd (98 %), Zn (99 %) y Cr (64 %) (Ettner, 1999).

También en España en los últimos años se vienen realizando ensayos con este tipo de tratamientos. Así, para tratar el agua de mina que empezó a surgir en 1995 por una galería de acceso de la mina Troya, cerrada antes de lo previsto en 1993, se viene utilizando la balsa de decantación de estériles a modo de humedal aeróbico. Las aguas de mina se conducen mediante un canal a la antigua balsa de decantación, aún con capacidad por el cierre prematuro, donde los metales disueltos se oxidan e hidrolizan, precipitando como oxihidróxidos en el pH neutro de esta agua (Iribar et al., 1999).

En la Universidad de Oviedo se experimentó a escala de laboratorio con un sistema combinado de RAPS y un humedal con caliza, compost y plantas (*Tipha latifolia*), en el que se lograron reducciones de cerca del 65 % para la acidez, 100% de Al 27 % de Mn y 99,5 % de Fe. El RAPS fue ineficaz en la retención del sulfato obteniéndose un 32 % exclusivamente en el humedal. El pH a través de este sistema se incrementó de 3 a 7 (Ordóñez et al., 1999).

En los últimos años (desde 1998) se viene experimentando en la mina de lignito de Meirama (La Coruña) con dos líneas de tratamiento. La primera es de flujo

³⁷ RAPS: Sistemas reductores y productores de alcalinidad

horizontal, compuesta por balsa orgánica y ALD, en la que se consigue eliminar un 82 % de Fe y cerca del 89 % de Al, y llevar el pH a neutralidad. La segunda línea es de flujo vertical y está formada por un RAPS y humedal aerobio, en donde se logra incrementar el pH hasta 5,4 y unas eliminaciones del 57% de Fe y 50 % de Al (Mataix, 1999).

Un trabajo importante realizado en el tratamiento del DAM es del grupo Minero San Quintín, este grupo está situado dentro del término municipal de Almodóvar del Campo en la ciudad de España.

La investigación realizada consistía en la recopilación de información de la zona; en un trabajo de campo de varios días donde se tomaron diferentes muestras de agua en charcos cerca de las escombreras y en arroyos, con el fin de determinar si el agua contenía elementos contaminantes, se tomaron varias mediciones in situ del pH y de la temperatura distribuidas por toda la zona, y por último a nivel de laboratorio se determinaron contenido en metales, pH y conductividad.

Los resultados revelan indicios de contaminación de las aguas por presencia de metales, (Hg, As, Cd, Cu, Pb, Zn) en concentraciones altas (ppm), evidenciando la acidez de estas (pH más bajos) especialmente en las aguas procedentes de las escombreras.

Comparando los valores de pH y de conductividad, se determina que generalmente las aguas más ácidas presentan mayor conductividad y por tanto mayor contenido de sales.

En nuestro país se han adoptado soluciones por parte de empresas mineras, entre las que destacan el aumento de la capacidad de los canales de captación y desvío dispuestos para que el agua, producto del derretimiento de las nieves, no entre en contacto con el depósito de estériles; una barrera impermeable como sistema secundario de seguridad aguas abajo del depósito de estériles en conjunto con una batería de pozos que asegure una intercepción total de

drenaje ácido potencial; la inclusión de estaciones con registro continuo de la acidez y conductividad presentes en el agua para permitir su eventual tratamiento en caso de ser necesario. Además, contar con varios puntos de monitoreo dan una mejor y más amplia cobertura en tiempo real al seguimiento.

En el año 2002 la entidad Corpocaldas presentó un proyecto “Mejoramiento de las condiciones de la minería aurífera en el municipio de Marmato Caldas, a través de obras de estabilización de taludes y reforestación de microcuencas”, (Arango y Giraldo 2002), donde se trabajaron temas como manejo de estériles, manejo de aguas residuales y el componente social.

En cuanto al manejo de aguas residuales se exponen las principales fuentes de contaminación y los impactos que genera sobre el recurso hídrico, proponiendo alternativas que formen parte de una estrategia integral, para la protección de éste recurso en la zona minera.

De igual forma a las aguas residuales a nivel de laboratorio se determinan las propiedades físicas (color, turbidez), el pH, la temperatura, la conductividad, los niveles de metales pesados contaminantes, y de otros compuestos inorgánicos.

Por otra parte se plantea un sistema de tratamiento fisicoquímico teniendo en cuenta la gran cantidad de sólidos en el efluente a tratar, así como la gran cantidad de material inerte y metales pesados, los cuales al entrar en contacto con algún tipo de sustancia química se precipitarán, permitiendo la remoción de por lo menos el 40% de la carga contaminante presente, para ello se propone diseñar una planta piloto de tratamiento, donde se almacenan las aguas residuales, este a su vez alimenta un desarenador que separa los sedimentos.

Otra propuesta es anular las arenas de las plantas de beneficio en el proceso de la cianuración por percolación o agitación, las cuales pueden ser manejadas más fácilmente como productos sólidos en un relleno, donde se hará un seguimiento sobre los lixiviados y los vapores generados por la evaporación-transpiración del terreno.

En cuestión, son pocas las empresas en el municipio que se acogieron a la propuesta anterior. La Empresa Minero Nacionales S.A³⁸ ubicada en la zona minera baja es quien en este momento implementa un sistema de tratamiento de lodos procedentes de la planta de beneficio, los cuales son dispuestos en una represa o relleno, esto con el fin de evitar que estos lleguen al lecho de la quebrada Marmato y finalmente al río Cauca.

³⁸ Empresa minera con sede principal en Medellín Antioquia, desarrolla actividades de extracción y beneficio de minerales en el municipio de Marmato Caldas, es la empresa más grande del municipio y del occidente caldense.

CAPITULO 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1. Ubicación del muestreo

Para este estudio se seleccionó un punto para el muestreo de agua superficial, que corresponde a la Mina Cascabel (la cual no se encuentra en funcionamiento actualmente) del Municipio de Marmato Caldas, esta mina fue escogida puesto que es una de las minas con el más alto drenaje ácido según estudios previos de la empresa MEDORO RESOURCES LTDA³⁹ o MINERALES ANDINOS DE OCCIDENTE⁴⁰, la cual es la propietaria de la mina y a su vez es la encargada de su administración.

El lugar de estudio se encuentra en la zona alta de Marmato más o menos sobre los 1.300 m.s.n.m., en la vía de acceso principal a la zona urbana del municipio, al nivel de la quebrada Cascabel a 7 kilómetros de la troncal del occidente en el sitio conocido como “La Garrucha”.

La mina Cascabel con su alto grado de acidez, es una de las 27 minas que drenan sus aguas a la quebrada Cascabel, la cual se ha convertido en un vertedero de residuos, con alta contaminación química.

Los impactos ambientales ocasionados en esta quebrada se evidencian en el deterioro de la zona, en cuanto al paisaje, suelo, hidrografía, aire, vegetación y en el componente socioeconómico, por lo que se puede predecir que la influencia de esta mina y de la actividad minera sobre esta afecta enormemente a toda una comunidad; se hace necesario tomar las medidas para recuperar de alguna manera esta zona.

³⁹ Medoro Resources es una compañía canadiense de exploración de oro y la adquisición de minas.

⁴⁰ Empresa privada del sector minero con su sede en Medellín, subsidiaria de Medoro Resources

4.2. Metodología

Esta investigación es de tipo cuantitativo e incluye una fase descriptiva. Las variables que se estudian son las propiedades del agua las cuales son medibles, evaluables, observables y cambiantes tales como: concentración de metales, temperatura, demanda de oxígeno, pH, propiedades organolépticas, sólidos suspendidos y disueltos y sulfatos. Los indicadores seguidos son fundamentalmente: la variación de las propiedades antes mencionadas en función del tratamiento empleado y su comportamiento comparado con los parámetros establecidos por ley.

El mecanismo utilizado para el desarrollo del siguiente trabajo se basó en el análisis de muestras de agua las cuales fueron enviadas al laboratorio Ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana en la ciudad de Medellín Antioquia. Este Laboratorio está acreditado por el IDEAM para los parámetros alcalinidad, cloruros, sulfatos, conductividad eléctrica, nitratos, fósforo total, fenoles totales, DQO, DBO5, cobre, aluminio, plomo, níquel, sodio, potasio, cobalto, zinc, manganeso, cadmio, plata, pH, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables, sólidos volátiles, sólidos suspendidos totales, sólidos totales, oxígeno disuelto, turbiedad, grasas y aceites, detergentes, sulfuro, nitrógeno amoniacal, ortofosfatos y cianuro total. Así como en muestreo simple con variables de campo pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, caudal compuesto e integrado, muestreo compuesto con variables de campo pH, temperatura y caudal y muestreo integrado con variables de campo pH, temperatura, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, caudal.⁴¹

De acuerdo con los resultados obtenidos en los análisis de aguas, con el estudio realizado de las diferentes alternativas de tratamiento existentes y en función de los recursos existentes, se seleccionó la opción de tratamiento más adecuada, tanto técnica como económicamente.

⁴¹ Según Resolución 0026 del 31 de Enero de 2012.



Figura 5. Ubicación de la mina cascabel



Figura 6. Vertimiento de drenaje y deterioro ambiental

Las actividades que se llevaron a cabo para el logro de los objetivos propuestos son las siguientes:

4.2.1 Caracterización fisicoquímica del agua

Se tomaron en una semana durante 3 días diferentes, 3 muestras puntuales preliminares de drenaje de la mina cascabel, las cuales se enviaron al laboratorio con el fin de conocer el estado del agua, su pH, temperatura, DOB5 (demanda bioquímica de oxígeno), DQO (demanda química de oxígeno), SST (sólidos suspendidos totales), SDT (sólidos disueltos totales), Sulfatos, Hierro, Aluminio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, manganeso,

mercurio, plomo y zinc. La caracterización físico-química del drenaje de la Mina Cascabel se realizó en el laboratorio ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín Antioquia.

- Parámetros medidos

Para realizar el estudio se hizo necesario comenzar a caracterizar el agua haciendo un análisis fisicoquímico en laboratorio, donde se deben tener en cuenta algunos parámetros como los que se mencionan a continuación y que permitirán tener una clara idea de cómo se podría implementar diferentes tratamiento que ayudara a disminuir el impacto ambiental que estos ocasionan al agua y demás ecosistemas.

En situ:

- pH
- Temperatura
- Olor
- Color
- Turbiedad

En laboratorio:

- pH
- DOB5 (demanda bioquímica de oxígeno)
- DQO (demanda química de oxígeno)
- SST (sólidos suspendidos totales)
- SDT (sólidos disueltos totales)
- Sulfatos
- Hierro
- Aluminio
- Arsénico
- Cadmio
- Cromo
- Cobre

- Manganeso
- Mercurio
- Plomo
- Zinc

Parámetros de ley: Para realizar la interpretación de los resultados de los análisis físico-químicos de las muestras de agua superficial en la mina Cascabel, se hizo necesario utilizar parámetros establecidos por las normas y leyes nacionales, debido a la preocupación existente por las descargas, lixiviación e infiltración del agua ácida de la actividad minera. En la Tabla No 2 se muestran estos parámetros de ley. (Álvarez y Gómez 2012)

4.2.2 Selección de una alternativa de tratamiento

Una vez se realizaron los análisis de los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua, se procedió a seleccionar el tratamiento e implementarlo en prueba piloto Wotruba, que además de neutralizar las aguas ácidas, perjudican la oxidación de los sulfuros, elimina los metales pesados volviéndolos insolubles.

Cuando se eleva el nivel de pH de la solución, los iones metálicos pesados se precipitan, formando un respectivo hidróxido del metal, removiendo los iones metálicos que son solubles en el agua y convirtiéndolos en compuestos insolubles precipitándolos en la solución.

Estos hidróxidos metálicos se forman gracias a un agente alcalino que logran alcanzar pH altos, que en este caso fue, el hidróxido de sodio.

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES	
		CUERPO DE AGUA SUPERFICIAL	ALCANTARILLADO PÚBLICO
Generales			
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400,0	800,0
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	200,0	400,0
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	2,0	10,0
Material Flotante	mg/L	0,5	-
Grasas y Aceites	mg/L	20,0	50,0
Fenoles	mg/L	0,2	0,1
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	5,0	8,0
Hidrocarburos			
Hidrocarburos Totales(HTP)	mg/L	5,0	10,0
Iones			
Cianuros (CN ⁻)	mg/L	1,0	1,0
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,0	500,0
Sulfuros (S ²⁻)	mg/L	2,0	5,0
Metales y Metaloides			
Aluminio (Al)	mg/L	1,5	5,0
Arsénico (As)	mg/L	0,3	0,5
Cadmio (Cd)	mg/L	0,002	0,02
Cinc (Zn)	mg/L	0,2	1,0
Cobre (Cu)	mg/L	1,5	3,0
Cromo (Cr)	mg/L	0,5	1,0
Hierro (Fe)	mg/L	3,0	3,0
Manganeso (Mn)	mg/L	2,0	2,0
Mercurio (Hg)	mg/L	0,001	0,02
Molibdeno (Mo)	mg/L	0,5	0,5
Níquel (Ni)	mg/L	0,02	2,0
Plata (Ag)	mg/L	0,05	0,1
Plomo (Pb)	mg/L	0,2	0,5

Tabla 2. Parámetros a monitorear en los vertimientos puntuales de aguas residuales.⁴²

4.2.3 Implementación del tratamiento en prueba piloto

Se toman nuevamente 3 muestras puntuales en 3 días diferentes, en cantidades suficientes y se realizó el siguiente procedimiento:

⁴² Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

- Se dividió en dos partes la muestra de agua, a una parte se le realizó análisis fisicoquímico antes del tratamiento.
- A la otra parte del agua se aplicó hidróxido de sodio 1 Molar y posteriormente se le realizó el mismo tipo de análisis fisicoquímico con el fin de comparar los resultados obtenidos antes y después de dicho tratamiento.
- El análisis del agua después de ser tratada se realizó en dos momentos, uno el mismo día del tratamiento y 3 días después se vuelve a analizar esa misma muestra, con el fin de verificar la eficiencia del procedimiento.
- Todas estas muestras se enviaron al laboratorio y posteriormente se realizó el análisis de los resultados para poder concluir acerca de la efectividad del tratamiento escogido.

4.2.4 Planteamiento de una propuesta concreta

De acuerdo a los resultados obtenidos, se elaboró una propuesta del tratamiento que debe emplearse en las aguas afectadas por el drenaje ácido de la mina Cascabel posterior al tratamiento preliminar realizado, la cual se describirá en el capítulo de resultados.

Con esta propuesta se pretende sugerir otras alternativas de tratamiento que complementen el método aplicado, para garantizar una eficacia al final del proceso empleado; y así pensar en la posibilidad de implementar esta propuesta en la minería del municipio de Marmato y porque no, en otras zonas mineras que aun no cuentan con planes de sostenibilidad en la actividad minera que vayan en busca de conservar y preservar los recursos naturales.

CAPITULO 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultado se presentarán en tres partes: primero los resultados de las pruebas preliminares que fueron el punto de partida para proponer el tratamiento a emplear; segundo los resultados antes y después del tratamiento que permiten establecer la eficacia del mismo; tercero, el planteamiento de la propuesta del tratamiento que, se sugiere, debería seguirse para lograr una calidad óptima del agua.

5.1. Caracterización fisicoquímica del agua. Prueba preliminar

Con el fin de encontrar un tratamiento adecuado para disminuir el impacto ambiental del drenaje de mina fueron realizados estudios preliminares en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana. En el mes de noviembre se hizo la recolección de las primeras muestras de agua de la mina cascabel, durante tres días consecutivos.

Inicialmente se realizó un análisis físico del agua in situ para los tres días, se encontró un agua sin olor, sin color y con baja turbiedad. Estos parámetros de aspecto físico no mostraron mayor variación en cada toma.

Los análisis de laboratorio de esta tres muestras se presentan en la Tabla No 3 junto con una columna de los parámetros de ley de la Tabla N° 2, con el fin de establecer una comparación entre los mismos.

		MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	LIMITES PERMITIDOS
		PRELIMINAR			
	T°C	22°C	22°C	25°C	< 40°C
ANÁLISIS	UNIDADES	DMC	DMC	DMC	
DBO ₅	SM-5210-B		4.22	3.87	250
DQO	mg O ₂ /l	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	400
PH	Unidades de ph	3.779	3.774	3.914	6 - 8,5
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg SS/L	3.30	4.50	6.70	200
SOLIDOS DISUELTOS	mg SD/L	1710.0	1636.7	1618.3	1000
SULFATOS	mg SO ₄ -2 /L	756.60	756.60	844.36	500
ALUMINIO	mg Al/L	14.118	13.173	12.199	1.5
ANTIMONIO	mg Sb /L	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	
ARSENICO	mg As /L	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	0.3
CADMIO	mg Cd/L	1.189	1.123	0.980	0.002
COBRE	mg Cu/L	0.134	0.125	0.111	1.5
CROMO	mg Cr/L	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	0.5
HIERRO	mg Fe/L	1.224	1.276	1.327	3.0
MANGANESO	mg Mn/L	14.003	13.687	13.630	2.0
MERCURIO	µg Hg/L	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488	0.001
PLOMO	mg Pb/L	0.089	0.080	0.073	0.2
ZINC	mg Zn/L	72.333	70.200	67.117	0.2

Tabla 3. Comparación de los resultados de los análisis y los límites permitidos.

Los resultados obtenidos en la medición del potencial de hidrogeno o pH en el drenaje de agua de la mina muestran características acidas con unos valores que oscilan entre 3 – 4, lo cual no es adecuado para la naturaleza, debido a que puede alterar, perturbar o inhibir los procesos biológicos y químicos que normalmente se llevan a cabo, trayendo consigo consecuencias adversas, como lo es la degradación del ecosistema, contaminación de aguas impidiendo la vida acuática en ellas debido a procesos de desnaturalización de las proteínas, entre otras.

Se encuentra además que hay un alto contenido de sulfatos, condición tampoco deseable ya que con ello se evidencia la presencia de minerales sulfurados, responsable del drenaje ácido cuando estos se exponen con el agua y el oxígeno del aire del ambiente.

Los valores de DBO y DQO son bajos, lo cual garantiza una mínima cantidad de materia orgánica biodegradable y de oxígeno presentes en el agua residual, por lo tanto los niveles de contaminación por efecto de estos componentes son relativamente bajos.

En cuanto a los sólidos suspendidos, permite establecer que el material sólido en el agua en forma de partículas muy finas es bajo, estableciendo así el color y la poca turbidez del agua.

Los sólidos disueltos determinan la salinidad del medio, y en consecuencia la conductividad del mismo, los sólidos disueltos se encuentran en forma de cationes y aniones, por lo que éstos como partículas con carga pueden conducir la corriente eléctrica, estos son un indicativo del drenaje ácido.

En cuanto a los metales se puede decir que el agua utilizada en dichos ensayos presenta elevadas concentraciones de: Aluminio (Al), Arsénico (As), Cadmio (Cd), Manganeso (Mn), Mercurio (Hg) y Zinc (Zn).

Estos metales considerados pesados son los más importantes contaminantes ambientales, estos no se degradan química ni biológicamente, por lo que una vez emitidos permanecen en el ambiente y duran cientos de años, ocasionando daños a la salud de las personas y demás seres vivos.

Los demás metales: Antimonio (Sb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Hierro (Fe), Plomo (Pb), están por debajo de los límites de ley, por lo tanto el análisis se centrará en los metales que sobrepasan los valores de ley y que son perjudiciales para el ambiente y los demás seres vivos.

5.2. Implementación del tratamiento

En el mes de febrero, 3 meses después del análisis preliminar, se realizó la segunda parte del proyecto. Se tomaron nuevamente 3 muestras puntuales en 3 días diferentes, en cantidades suficientes y se realizó el procedimiento indicado en la metodología.

En la Tabla N° 4 se aprecian los resultados de los análisis realizados a las tres muestras los cuales se muestran en las columnas designadas como: Toma 1, Toma 2 y Toma 3. Para cada Toma se presentan tres columnas de resultados: en la primera, los análisis del agua el mismo día de la toma sin ningún tratamiento, la segunda, los análisis de agua de la toma el mismo día que fue tratada con el procedimiento seleccionado (Se le adicionó por cada litro de muestra de agua, 0,6 ml de solución 1 Molar de Hidróxido de sodio) y la tercera columna corresponde a los análisis realizados al agua tratada tres días después de dicho tratamiento.

La adición de un agente alcalino como lo es el hidróxido de sodio (soda cáustica NaOH), precipita los iones metálicos solubles en agua en forma de hidróxidos, (Kemmer y McCallion 1997), ya que la mayoría de los iones de metales pesados solubles precipitan fácilmente al elevar el nivel de pH de la solución

Por esto, la adición del hidróxido garantizará elevar el pH del agua drenada de la mina que están en promedio en 3,82, y por lo tanto se tendrá una reducción de las concentraciones de los metales pesados.

ANÁLISIS	UNIDADES	TOMA 1			TOMA 2			TOMA 3		
		21,51°C			21,1°C			21,2°C		
		DMC	DMC - NaOH	DMC - NaOH - 3+	DMC	DMC - NaOH	DMC - NaOH - 3+	DMC	DMC - NaOH	DMC - NaOH - 3+
DBO ₅	SM-5210-B	10,16	9.97	12.71	14.98	12.88	12.23	14.08	12.71	12.95
DQO	mg O2/l	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43
PH	Unidades de ph	4.597	6.943	7.580	6.744	7.679	7.633	6.844	7.580	7.718
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg SS/L	14,3	70.20	43.20	10.40	41.80	37.50	10.40	43.20	44.20
SOLIDOS DISUELTOS	mg SD/L	952.0	1105.0	750.0	669.0	654.0	660.0	747.0	750.0	748.0
SULFATOS	mg SO4 -2 /L	693.02	706.98	393.02	451.16	316.28	379.07	375.58	393.02	432.56
ALUMINIO	mg Al/L	4.397	Menor de 0.550	Menor de 0.550	1.256	Menor de 0.550	Menor de 0.550	1.506	Menor de 0.550	Menor de 0.550
ANTIMONIO	mg Sb /L	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521
ARSENICO	mg As /L	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552
CADMIO	mg Cd/L	0.657	0.517	0.142	0.208	0.128	0.147	0.238	0.142	0.166
COBRE	mg Cu/L	0.109	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033	Menor de 0.033
CROMO	mg Cr/L	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088
HIERRO	mg Fe/L	0.231	Menor de 0.199	Menor de 0.199	0.572	Menor de 0.199	Menor de 0.199	0.629	Menor de 0.199	Menor de 0.199
MAGNANESO	mg Mn/L	9.487	8.333	4.234	4.177	3.598	3.890	4.940	4.234	4.324
MERCURIO	µg Hg/L	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488	0.566	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488
PLOMO	mg Pb/L	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031	Menor de 0.031
ZINC	mg Zn/L	32.113	11.313	2.048	12.137	2.396	3.046	17.077	2.048	3.313

Tabla 4. Resultados de análisis de aguas de la mina Cascabel después de la prueba piloto.

5.3. Interpretación y discusión de resultados

Comparando estos últimos resultados de los análisis del agua sin el tratamiento con los realizados en la prueba preliminar se observaron algunos cambios en los cuales se evidencia la disminución de casi todos los valores tanto en los metales como en los compuestos inorgánicos y demás parámetros. Es claro que los puntos de toma de la muestra afectan la medida como se observa en estos análisis, por ello se hicieron tomas en tres puntos distintos. En la Tabla N°5 se muestran los valores promedios de las medidas realizadas tanto en el análisis preliminar como en el posterior, para tener así mejores parámetros de comparación con los resultados después del tratamiento.

		LIMITES PERMITIDOS	MUESTRA PRELIMINAR	MUESTRA PILOTO		
	T°C	< 40°C	23°C	21.2°C		
ANÁLISIS			DMC	DMC	DMC-NaOH	DMC-NaOH+3
DBO ₅	SM-5210-B	250	4.043	13,07	11,85	12,63
DQO	mg O ₂ /l	400	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43	Menor de 43
PH	Uni de ph	6 - 8,5	3,82	6,06	7,40	7,64
SOLIDOS SUSPENDIDOS	mg SS/L	200	4,83	11,7	51,73	41,63
SOLIDOS DISUELTOS	mg SD/L	1000	1655	789,33	836,3	719,33
SULFATOS	mg SO ₄ -2 /L	500	785,85	506,58	472,09	401,55
ALUMINIO	mg Al/L	1.5	13,16	2,38	Menor 0,555	Menor 0,555
ANTIMONIO	mg Sb /L		Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521	Menor de 0.521
ARSENICO	mg As /L	0.3	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552	Menor de 0.552
CADMIO	mg Cd/L	0.002	1,097	0,367	0,262	0,151
COBRE	mg Cu/L	1.5	0,123	Menor de 0,033	Menor de 0,033	Menor de 0,033
CROMO	mg Cr/L	0.5	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088	Menor de 0.088
HIERRO	mg Fe/L	3.0	1,275	0,477	Menor de 0,199	Menor de 0,199
MANGANESO	mg Mn/L	2.0	13,773	6,20	5,388	4,149
MERCURIO	µg Hg/L	0.001	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488	Menor de 0.488
PLOMO	mg Pb/L	0.2	0,080	Menor de 0,031	Menor de 0,031	Menor de 0,031
ZINC	mg Zn/L	0.2	69,88	20,44	5,252	2,802

Tabla 5. Promedio pruebas preliminares y promedio de pruebas pilotos de análisis de aguas de la mina Cascabel

Es posible que esta variación en las medidas de las muestras se deba a factores como:

1. Se debe tener en cuenta es que la mina no ha estado en funcionamiento durante más o menos 6 años (según la empresa MEDORO RESOURCES LTD). No hay una actividad minera (extracción, transporte, detonaciones, uso de combustibles, etc.) que posiblemente contribuya directa e indirectamente a bajar los factores de contaminación que genera el drenaje ácido.
2. La presencia de carbonatos en la mina, los cuales son consumidores de ácido, y además tienen la propiedad de precipitar los metales pesados, y con ello permitir el aumento en el pH.

En la Tabla N°5 se encuentra que los valores promedios del pH están por debajo (por fuera) de los límites permitidos (son inferiores a 6), al adicionarle el hidróxido el pH aumentó notablemente (entre 6 -8). Pasados tres días se puede comprobar la eficacia del tratamiento, puesto que su pH se mantiene dentro del rango permitido el cual es deseable porque así se garantiza la reducción en la concentración de sulfatos, y de metales pesados responsables del drenaje ácido; proporcionando un mejor ambiente que permita el desarrollo de la vida acuática, terrestre y demás, que contribuya a la conservación y preservación de los ecosistemas.

En los resultados de los análisis en la prueba piloto se puede observar que la concentración de sulfatos que se encontraba en 506.58 mg/L se redujo después de tres días a una concentración de 401.55 mg/L. Se observa además la reducción en la concentración de metales (cobre: paso de 0.123 a un valor menor a 0.033 mg/L, hierro: paso de 1.275 a 0.199 mg /L, cadmio: pasó de 0.367 a 0.151 mg/L, manganeso: pasó de 6.20 a 4.149 mg/L; zinc: bajo la concentración de 20.44 a 2.802 mg/L y el aluminio redujo su concentración de 2,38mg/L a una concentración inferior de 0.555 mg/L) estos valores que se

redujeron fueron medidos después de tres días de realizar el tratamiento y mantuvieron sus valores, con lo que se garantiza la eficiencia del proceso.

Con el tratamiento empleado se encuentra que el sulfato y el aluminio redujeron su concentración y se encuentran ahora por debajo de los límites permitidos, lo que indica que en este sentido el tratamiento es adecuado.

El cadmio, manganeso y zinc después del tratamiento bajaron su concentración en el agua, pero siguen por encima de los límites permitidos, pero podría pensarse que con la adición de una concentración más alta de hidróxido se pueden reducir las concentraciones de estos metales a valores más cercanos a los deseados.

El arsénico y mercurio presentan inconvenientes en su determinación y además sus valores permitidos son bastante bajos. No se puede decir que este tratamiento seleccionado no infiere en la presencia de estos metales pero muy posiblemente aún se encuentran por encima de los valores permitidos. Estos metales requieren un tratamiento y unas técnicas de análisis más sofisticadas y específicas ya que son los que mayores problemas de contaminación ocasionan por su alto grado de toxicidad en la salud llegando a causar la muerte; y en los ecosistemas por contaminación de aguas, suelo y aire.

Actualmente se realizan trabajos en busca de técnicas de remoción de arsénico como por ejemplo el empleo de nano hilos de $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ depositados sobre diatomita como absorbedores de alta eficiencia (Yucheng, 2013).

La concentración de los demás metales encontrados en el análisis de las muestras como: Antimonio (Sb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Hierro (Fe), Plomo (Pb), están por debajo de los límites permitidos, por lo que se podría decir que no causan un daño tan severo al ambiente.

5.4. Propuesta concreta

Teniendo en cuenta los resultados proporcionados en este estudio, podemos sugerir otras alternativas que complementen el tratamiento aplicado, que garanticen una mejor efectividad, teniendo en cuenta que esta puede ser un base para que la minería de Marmato y de otras zonas mineras implementen tratamientos que ayuden a una minería sostenible y que vaya en dirección a conservar y preservar los recursos naturales indispensables para la vida.

Una buena alternativa es:

- La construcción de una laguna o piscina que recoja las aguas provenientes de las minas, las cuales contienen sedimentos. Estas piscinas de sedimentación actúan como filtros en los cuales los sedimentos se decantan y el agua sale por reboce, las arenas asentadas contendrán parte de los metales pesados que acidifican el agua, con esto se garantizaría la reducción de metales pesados en el agua.
- El agua residual procedente de la piscina se le aplica un tratamiento reductor de sulfatos y productor de alcalinidad, (como el empleado en este trabajo) que además de neutralizar las aguas acidas, perjudican la oxidación de los sulfuros, elimina los metales pesados volviéndolos insolubles
- Por último la construcción de un lecho filtrante con materiales que ayuden también a esta proceso, como puede ser la antracita (carbón) que es utilizada en la filtración del agua potable y agua residual.

Con la utilización de estas tres alternativas se garantiza: el aumento de pH en el rango entre 6 - 8, de las aguas residuales que son vertidas a la quebrada Marmato y finalmente al río Cauca; la reducción de sulfatos y de la concentración de metales como aluminio, cobre y hierro, lo cual se verificó en el presente trabajo. Se garantiza además la reducción en las concentraciones

de metales pesados como el cadmio, magnesio y zinc que a pesar de bajar con la aplicación del hidróxido hasta valores de 0.151 mg/L, 4.149 mg/L y 2.802 mg/L respectivamente, no lograron los límites permitidos (0.002, 2.0 y 0.2 mg/L) no cumpliendo con los estándares de descarga a ríos y quebradas establecidos por ley; y se espera la disminución de la concentración de metales que son más contaminantes y difíciles de reducir como el arsénico y el mercurio.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

De la realización del presente trabajo se pueden plantear las siguientes conclusiones:

1. Los resultados de los análisis de las aguas de la mina cascabel en la zona de Marmato demuestran que existe presencia de metales como aluminio, arsénico, cadmio, manganeso, mercurio y zinc, que sobrepasan los límites permitidos por las normas establecidas por el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, los cuales están siendo liberados a las aguas de la quebrada cascabel.
2. De acuerdo a los niveles encontrados de pH, metales y sulfatos que en ciertas cantidades actúan como contaminantes, se puede concluir que el agua de la mina Cascabel está generando contaminantes al ambiente, al suelo y a las aguas.
3. Aun sin estar en funcionamiento, esta mina presenta un riesgo elevado de contaminación ya que sus aguas no han sido tratadas antes de realizar el vertimiento.
4. Un tratamiento reductor y productor de alcalinidad como el empleado en este trabajo es una buena alternativa para reducir el nivel de contaminación de estas las aguas residuales, ya que se logra el aumento de pH, la disminución de oxígeno disuelto, la disminución de sulfatos y la reducción en la concentración de metales como: aluminio, cobre, hierro. Se encontró que todos estos parámetros lograron los valores establecidos en la reglamentación del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible con el tratamiento empleado en prueba piloto.
5. Las técnicas de análisis empleadas no permitieron la determinación precisa de la concentración de arsénico y mercurio, se deben emplear

técnicas más precisas, máxime cuando estos metales son muy contaminantes y sus concentraciones límites permitidas esta ente los más bajas comparadas con los demás metales. Se cree que las concentraciones están aún por encima de los rangos permitidos.

6. Para estos metales (arsénico y mercurio) y para el cadmio, el manganeso y el zinc (para los que se encontró que aunque disminuyeron su concentración no alcanzaron los valores establecidos) se sugiere implementar otro tipo de tratamiento como son las lagunas sedimentadoras y lo lechos filtrantes con lo cual se espera la reducción de sus concentraciones en el agua.

6.2 Recomendaciones

Por la importancia que tiene para el país y sobre todo para el municipio de Marmato un verdadero desarrollo sustentable que no vaya en deterioro de sus recursos naturales, se recomienda:

- Incentivar el tratamiento de las aguas residuales de las minas en el municipio de Marmato antes de ser vertidas a los efluentes. Tratamientos como los reductores de sulfatos y productores de alcalinidad que son de bajo costo y alta efectividad, tal como encontró en este trabajo, podrían ser empleados en primera instancia.
- Incentivar el desarrollo de tratamientos más sofisticados que generan resultados a largo plazo como la construcción de lagunas de sedimentación y lechos filtrantes por parte de los dueños de las minas, pero apoyados por entes gubernamentales.
- Ahondar más en los aspectos tecnológicos empleados en la mitigación del drenaje ácido de la minería subterránea para así poder aplicarlos en la solución de los problemas de las minas en Colombia.
- Una buena e importante contribución podría ser una comprensión mejor de los procesos naturales del ambiente y de los métodos utilizados para imitar estos procesos y condiciones que proporcionan las mejores circunstancias para el tratamiento del drenaje ácido de la mina.
- Exigir, mediante leyes y reglamentos, que la minería de forma artesanal que se realiza en el municipio de Marmato y en las zonas donde se practica sea limitada, tecnificada y regulada por entes encargados de la protección del medio ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcaldía de Marmato – Caldas - actualización del documento diagnóstico revisión y ajuste del Esquema de Ordenamiento Territorial. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. www.marmato-caldas.gov.co/apc-aa.../actualizacion-diagnostico-eot.pdf Consultado Mayo de 2013
- Alcaldía de Marmato (2009). Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Marmato. Documento de Resumen. Consultado Febrero de 2013
- Alcaldía de Marmato – Caldas: “Marmato hacia la prosperidad integral” todos por un Marmato anhelado. Consultado Febrero de 2013
http://marmato-caldas.gov.co/informacion_general.shtml
- Alcaldía de Marmato (2008). Plan de Desarrollo Municipal 2008-2011 “Hagamos de Marmato un municipio mejor” Alcalde Uriel Ortiz Castro. Consultado Febrero de 2013
- Álvarez, Carlos Arturo. Gómez, Martha Liliana. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Normatividad sobre vertimientos. Abril 2012. Consultado Junio de 2012
- Arango Gartner, Juan David y Giraldo Hernández, Jaime. Proyecto de mejoramiento de las condiciones de la minería aurífera en el municipio de Marmato, Caldas, a través de obras de estabilización de taludes y reforestación de microcuencas. Manejo de aguas residuales. Convenio Minercol–Corpocaldas Manizales, abril de 2002. Consultado Julio de 2013

- Arango Gartner, Juan David. (2006). Estudio de riesgo por procesos de inestabilidad. Sector Cerro El Burro y Plaza Principal. Municipio de Marmato. Junio de 2006. CORPOCALDAS. Consultado Marzo de 2013
- Bianchini, Flaviano. Estudio Técnico: Calidad del agua del Rio Tzalá (municipio de Sipakapa; departamento de San Marcos). 2006. Consultado Febrero de 2013.
- Caballero, Humberto. Mejía, Isabel. “Consideraciones preliminares acerca de los problemas de inestabilidad en Marmato-Caldas” 1989 INGEOMINAS. Consultado Marzo de 2013
- Caracterización del municipio de Marmato Caldas. Pesebre de oro de Colombia. Perfil epidemiológico 2008, Marmato Caldas. Consultado Marzo de 2011
- Cárdenas, Mauricio y Valerie Mercer-Blackman. (2007). Análisis del sistema tributario colombiano y su impacto sobre la competitividad, Cuadernos de Fedesarrollo No 19, Bogotá
- Corpocaldas. Estudio “Caracterización Geológica–Geotécnica y Evaluación de Riesgos para el municipio de Marmato departamento de Caldas”, 2004. Consultado Marzo de 2013
- Defensoría del Pueblo, Colombia. Minería de hecho en Colombia. Defensoría Delegada para los Derechos Colectivos y del Ambiente. Diciembre de 2010. Imprenta Nacional de Colombia. Consultada Septiembre 2013.
- Drenaje Acido de Mina | Ionic Water Technologies. En: www.iwtechnologies.com/spanish/aplica. Consultado Febrero de 2011

- DRENAJE ÁCIDO DE SAN QUINTÍN: ESTUDIO Y ALTERNATIVAS DE REMEDIACIÓN. En: www.ucm.es/info/crismine/San_Quintin_. Consultado Febrero de 2011
- Efluentes líquidos mineros. En: http://www.uclm.es/users/higueras/mga/Tema05/Tema05_Res_Min_2.htm Consultado Febrero de 2011
- El caso de Marmato. En: <http://www.minesandcommunities.org/article.php?a=2172>. Consultado Marzo de 2013
- Espinosa Rodríguez, Miguel Ángel. Diseño de una planta de tratamiento para el drenaje ácido de una mina en el estado de México. Universidad Autónoma de Nuevo León. Octubre, 1997. Consultado Febrero de 2011
- FEDESARROLLO. La minería en Colombia: Impacto socioeconómico y fiscal. Bogotá (2008). Disponible en: <http://www.fedesarrollo.org.co/wp-content/uploads/2011/08/La-miner%C3%ADa-en-Colombia-Informe-de-Fedesarrollo-2008.pdf>. Consultado Marzo de 2013
- Echavarría, Juan José. Crisis e industrialización. Las lecciones de los treinta. Banco de la República en coedición con Fedesarrollo y tercer Mundo Editores. Santa Fe de Bogotá, 1999
- Gamonal Pajares, Priscila. 2004 Tratamiento de drenaje ácido de minas en humedales construidos, pag1-14. biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/.../DAMhumedales.pdf. Consultado Febrero de 2011
- Guerrero Rojas, José J. Biotecnología en la disolución y recuperación de metales. Congreso peruano de Biotecnología y bioingeniería, Trujillo, Perú, Noviembre 1998. Consultado Marzo de 2013

- Impactos Ambientales y Actividades Productivas - Minería Subterránea
La minería subterránea abarca todas las labores destinadas a explotar materias primas por medios técnicos.
www.estrucplan.com.ar/producciones. Consultado Marzo de 2011
- Industria Minera, puntal de desarrollo y Crecimiento. Enero 2013.
[http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Industria_minera_puntual_de_desarrollo_y_crecimiento/\\$FILE/CAMIMEX_Mineria_Desarrollo_y_crecimiento_econ%C3%B3mico_21Mar2013.pdf](http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/Industria_minera_puntual_de_desarrollo_y_crecimiento/$FILE/CAMIMEX_Mineria_Desarrollo_y_crecimiento_econ%C3%B3mico_21Mar2013.pdf). Consultada Septiembre 2013.
- INGEOMINAS y Ministerio de Minas y Energía. Bases para el ordenamiento geoambiental del área minera de Marmato-Caldas. Bogotá. 2002. Consultado: Junio de 2011. Recuperado de:
http://www.1.ingehominas.gov.co/component/option.com_docman/task.doc_download/gid.4610/Itemid.87/
- Instituto Oficial Marmato.2000. Plan de manejo ambiental. Minería de hecho Marmato
- Jiménez, M. Germán. El cerrejón de oro. 12 de diciembre 2005
www.elcolombiano.com/.../E/el_cerrejon...oro/el_cerrejon_del_oro. Consultado Marzo de 2013
- Kemmer Frank, y McCallion John 1997. Minería. En: Manual del Agua (The Nalco Water Handbook), Tomo II, McGraw-Hill Book Co., U.S.A., Capítulo 29.
- LA MINERÍA EN EL MUNDO, Actividad minera. Actividades Primarias Mundiales: La minería . Consultada Septiembre 2013
http://www.portalplanetasedna.com.ar/actividad_minera.htm

- La Responsabilidad Social: Una prioridad de Cemex
En:<http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=702> Cemex (2007).
- López Pamo, E. et al. 2002. Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-21. Consultado Abril de 2011
- Marmato/CulturadeCaldas
www.culturadecaldas.gov.co/?q=content/marmato. Consultado febrero 2011.
- Marmato caldas. En:
<http://www.dane.gov.co/files/censo2005/perfiles/caldas/marmato.pdf>.
Consultado Marzo de 2013
- Méndez Fajury, Ricardo Arturo. Evaluación Fenómeno de Subsistencia en el casco urbano del municipio de Marmato, Departamento de Caldas” 2003. Consultado Marzo 2013
- Minas de Colombia. En: <http://www.colombiapuntomedio.org>.
Consultado Marzo 2013
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Dirección General Ambiental Sectorial. Diagnóstico y Proyecciones de la Gestión Minero Ambiental para las regiones Auríferas de Colombia. Bogotá, D. C. Febrero de 2002. Consultada Septiembre 2013.
- Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética. (2006) “Colombia País Minero. Plan Nacional para el Desarrollo Minero visión al 2019”. Bogotá. Consultado Marzo 2013
- Morin, K.A. and Hutt, N.M. (2001), Description and assessment of drainage geochemistry. En: MDAG Publishing (ed.), Environmental

geochemistry of minesite drainage: practical theory and case studies. Vancouver, British Columbia, Canadá. Capítulo 4, 63-138. Consultado Abril 2011

- Noller, B., Woods, P. y Ross, B. 1994. Case studies of wetland filtration of mine waste water in constructed and naturally occurring systems in northern Australia. *Water, Science and Technology*, 29, (4), 257-265. Consultado Abril de 2011
- Normas Técnicas para diseño ambiental - fuente: DGAAM. Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas Agosto 2009. Ministerio de Minas y Energía. República de Perú. Consultado Febrero de 2011
- Nordstrom D.K. and Alpers C.N. (1999), *Geochemistry of acid mine waters*. En: Plumlee, G.S., Logsdon, M.J. (eds), *The environmental geochemistry of mineral deposits*. Reviews in Economic. Consultado Abril 2011
- Ordóñez Alonso, María Almudena. Tesis Doctoral. Sistema de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina. Experiencias de laboratorio, diseño y ejecución. Oviedo 1999. Consultado Febrero de 2011
- Pontificia Universidad Católica de Chile. La minería en la América española www.uc.cl/sw_educ/historia/america/ht. Consultado Febrero de 2011
- Sandoval Robayo, Mary Luz. Y Melina Lasso, Rosa. *Revistas científicas Luna Azul. Riesgo: Teoría y realidad*. En: <http://www.censat.org/biblioteca/download/fileid/348>. Consultado Marzo de 2013

- Sainz Silván, Alfredo. AMD un problema mundial. Junta de Andalucía. Consejo de Medio Ambiente. Sevilla 2005. Consultado Marzo 2013
- Tapia Tinizaray, Rodrigo Yamil. Tesis: Efecto de la actividad sobre los recursos naturales y su impacto socio-ambiental en el Cantón Yacuambi. Junio 2010. Consultado abril de 2013
- Tischler, Spephen. (2007). El análisis del Arsénico. Nivel II. Agua Latinoamérica. Volumen 7, numero 2.
- Triana Sandoval, Alonso. Ley 685. Nuevo Código de Minas (2001). Editorial Leyer. Bogotá. Séptima Edición. Pág. 105.
- Tyrrell, W., Mulligan, D., Sly, L. y Clive Bell, L. 1997. Trialing wetlands to treat coal mining wastewaters in a low rainfall, high evaporation environment. *Water, Science and Technology*, 35, (5), 293-299. Consultado Marzo 2013
- USEPA 1994. Acid mine drainage prediction. Thechnical Document. Consultado Abril 2013
- Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Competitividad del Sector Minero Colombiano. Bogotá. 2001. Consultado Marzo de 2013
- Unidad minera de Caldas, en la mira de las autoridades. (2010). Publicado en Diario La Patria el 3 de Marzo de 2010. Consultado en Marzo 2013. Recuperado de <http://www.lapatria.com/story/unidad-minera-de-caldas-en-la-mira-de-las-autoridades>
- Veiga, Marcello. PhD. Tesis: Antioquia, Colombia: the world's most polluted place by mercury: impressions from two field trips. Febrero 2010. Consultado Septiembre 2013

- Villa Becerra, Hugo. Proyecto “Fortalecimiento de la gestión ambiental para la lucha contra la contaminación en la zona alta y media de la cuenca del río Mantaro – Junín”. Consultado Septiembre 2013.
- Wildeman, TR y LS Laudon. 1989. La utilización de los humedales para el tratamiento de los problemas ambientales de la minería: las aplicaciones de minería no de carbón, p. 221 231. En Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales, DA Hammer, ed. Lewis Publishers, Ann Arbor, MI.
- Younger, P.L. 1998. Design, construction and initial operation of full-scale compost-based passive systems for treatment of coal mine drainage and spoil leachate in the UK. IMWA Symposium, Johannesburg, 413-424. Consultado Marzo 2013
- Watzlaf, G. 1997b. Passive treatment acid mine drainage indown- flow limestone systems. U.S. Department of Energy Tecnology Center, Pittsburgh, 233-244. Consultado Marzo 2013
- Wotruba, H, Hrushka, F, Preister, M, and Hentschel, T (1998) Manejo Ambiental en la Pequeña Minería. COSUDE, MEDMIN, La Paz, Bolivia.