

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

**Medición del Potencial de Generación de Agua Ácida para un  
Relave en la Zona Central del Perú y sus Necesidades de  
Neutralización**

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO DE MINAS

Presentado por el Bachiller:

**SERGIO LI LIN**

Asesor:

**DR. EDMUNDO ALFARO DELGADO**

**Lima, Setiembre 2013**

## RESUMEN

El presente trabajo trata de hallar un método para la medición del potencial de generación ácida de un relave minero en la zona central del Perú, mediante muestras recolectadas de la zona y análisis de laboratorio a escala. Se trata además de encontrar una metodología que simplifique el proceso de medición de potencial de generación ácida y aumente la confiabilidad de los resultados obtenidos a comparación de los métodos que actualmente se utilizan. Se complementará el trabajo tratando de hallar posibles métodos de solución y neutralización a la problemática producto de la generación de acidez de estos relaves.

El primer capítulo describirá las características del fenómeno de formación de aguas ácidas explicando: las reacciones, la influencia de los factores que apoyan, los métodos de transporte y migración y la metodología actual de estimación. Se complementará explicando los ensayos utilizados para la predicción del DAM, ensayos estáticos y cinéticos.

En el segundo capítulo se describirá la metodología de trabajo a utilizar, describiendo detalladamente los trabajos a realizar. También se hará la descripción de las muestras de relave recolectadas del centro del Perú, estas incluyen las zonas de: San Miguel, Mar Túnel, Yanacancha, Chaupimarca, Quilacocha y Yauli.

El tercer capítulo se centrará en el análisis y en los resultados obtenidos producto de los ensayos realizados. Se mostrará el desarrollo experimental y la presentación y discusión que se llevó a cabo a partir de los valores hallados. La presentación de cada muestra de relave a tratar incluirá los resultados de los ensayos por análisis químico, la difracción de rayos X y la evaluación por microscopio petrográfico mientras que en la discusión de resultados se definirán los contenidos de: especies neutras, especies generadoras de ácido y las especies de tipo básico; además del análisis de la influencia de estas en los resultados finales a mostrar comparando estos con la

legislación peruana vigente. Se encontrará que las muestras tienen un mayor contenido de especies neutras, entre 50 e incluso 97% de peso, mientras que las especies de tipo básico y las de tipo ácido están presentes en menor cantidad, entre 0 y 33% las básicas y entre 2.7 y 17% las ácidas.

Según los análisis químicos se encontró además que las muestras de relave contienen valores de elementos que pueden presentar algún potencial de contaminación (As, Fe, Mn, Pb, Sb, etc.).

En el cuarto capítulo se tratarán los métodos propuestos para la neutralización y/o control del potencial ácido en las muestras seleccionadas describiendo los métodos potencialmente aplicables y luego eligiendo las opciones de tratamiento a través de la adición de sustancias básicas sobre las muestras de relave durante la operación minera. Para el proceso por adición química se describirá el procedimiento realizado a partir de muestras de material neutralizante recolectadas en zonas aledañas a los puntos de medición de relaves, realizando los cálculos para encontrar la cantidad necesaria de carbonatos para neutralizar una tonelada de relave.

En el quinto y último capítulo se analizará todo el proyecto en conjunto. Una vez que se obtuvieron todos los resultados, tanto teóricos como prácticos, y los cálculos necesarios producto de los ensayos realizados a las muestras de relave, se podrán trabajar las conclusiones finales.

En conclusión, el siguiente trabajo determina el potencial que podrían tener diferentes tipos de relave de generar contaminantes ácidos sobre las aguas aledañas a las operaciones mineras en la zona central del Perú (antiguas y/o en actividad), realizando varios ensayos de laboratorio y tratando de encontrar una metodología que brinde mayor confiabilidad a los resultados tradicionales.

## Dedicatoria

A Dios, la luz y guía en mi camino,  
A mis padres por el apoyo incondicional,  
A Bernardo, mi gran amigo, por su ayuda desinteresada.

## Agradecimientos

Se agradece a la Pontificia Universidad Católica del Perú por el apoyo brindado, a la Dirección General de Investigación (DGI) de esta casa de estudios quienes facilitaron la investigación, al Dr. Edmundo Alfaro, asesor de este trabajo de tesis, quien prestó su desinteresado apoyo, al Ing. Enrique Guadalupe por sus prácticos consejos y guía en este trabajo, a los profesores de la sección ingeniería de minas, al Colegio de Ingenieros del Perú (capítulos de ingeniería de minas y de metalurgia) y a todos aquellos que apoyaron y dieron su ayuda para este proyecto.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>2</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES</b>	
1.1. Etapas del proceso minero en donde se produce el Drenaje Ácido de Mina (DAM)	4
1.1.1. Exploración y Modelamiento	5
1.1.2. Extracción o Explotación	5
1.1.3. Concentración y Cierre	6
1.2. La problemática del DAM en las minas del Perú	7
1.3. Aguas Ácidas y Drenaje Ácido de mina	10
1.3.1. Reacción general para la formación de drenaje ácido de mina (DAM)	11
1.3.2. Influencia de factores biológicos en la formación de drenaje ácido	14
1.3.3. Otros factores que influyen en el proceso de formación de Aguas Ácidas	17
1.3.4. Transporte de drenajes ácidos	19
1.4. Predicción de la generación del potencial ácido	22
1.4.1. Metodología para predecir la generación ácida	24
1.4.2. Ensayos estáticos y cinéticos para la predicción de la generación	

Ácida	27
1.4.2.1. Ensayos Estáticos	27
1.4.2.2. Ensayos Cinéticos	29
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO Y DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE RELAVE</b>	
2.1. Metodología de Trabajo	32
2.2. Descripción de Muestras de Relave	34
<b>CAPÍTULO III</b>	
<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL, PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	
3.1. Desarrollo Experimental y Discusión de Resultados	36
3.1.1. Presentación de Resultados de Análisis	39
3.1.2. Discusión de Resultados de Análisis	52
<b>CAPÍTULO IV</b>	
<b>MÉTODOS PROPUESTOS PARA LA NEUTRALIZACIÓN Y/O CONTROL DEL POTENCIAL ÁCIDO DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS</b>	
4.1. Control de los Drenaje Ácidos	65
4.1.1. Prevención y control del proceso de generación de aguas ácidas	66
4.1.1.1. Métodos de Barrera	68
4.1.1.2. Métodos Químicos	68

4.1.1.3. Métodos de Inhibición Bacteriana	71
4.1.2. Control de la Migración de las Aguas Ácidas	72
4.2. Aplicación de Métodos Seleccionados a las Muestras de Relave	
Analizadas	72
4.2.1. Método químico adicionando materiales alcalinos	73
4.2.1.1. Presentación y muestreo de muestras de material	
Neutralizante	73
4.2.1.2. Análisis en laboratorio de muestras de material	
Neutralizante	76
4.2.1.3. Interpretación de Resultados	78
4.2.1.4. Cálculos	79
4.3. Análisis Económico	85
4.3.1. Costos Comunes	86
4.3.2. Costo utilizando materiales neutralizadores de la zona	89
4.3.3. Costo utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos	92
4.3.4. Discusión de resultados y comentarios	96
<b>CAPÍTULO V</b>	
<b>CONCLUSIONES</b>	
5.1. Conclusiones	98
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	102

## PRÓLOGO

Desde sus inicios, la humanidad ha tenido la necesidad de utilizar metales y siempre ha buscado métodos para minarlos y extraerlos. Desde esas remotas épocas existe la minería y con esta todos los efectos contaminantes que pueden existir; estos pueden ser combatidos y eliminados siguiendo métodos seguros de trabajo y estándares ambientales mandatorios. Un caso muy particular es el de la generación de aguas ácidas a partir de las actividades mineras y extractivas. Este fenómeno se da por la liberación de los agentes sulfurosos minerales al agua y en combinación con el aire (oxidación) y otros factores alteran las condiciones iniciales del agua.

Los ríos afectados por el tipo de contaminación ácida se caracterizan por presentar valores de pH menores que 7, así como por el alto contenido de sulfatos, sólidos disueltos en sus aguas y sedimentos. Esta contaminación viene alterando los ecosistemas fluviales con el riesgo de la desaparición del hábitat natural. Estas aguas también pueden contener contaminantes tóxicos como metales pesados, entre ellos Zn, Mn, Mg, Cu, Cd, Pb y As provienen de la disolución de sulfuros y otros minerales asociados.

Dado que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años, de finalizada la vida de la explotación de una mina, es conveniente estudiar la generación ácida y realizar un inventario de los puntos de descarga de estos efluentes. Así como determinar sus características principales.

Lo que se busca en este trabajo es hallar un método adicional y confiable que permita determinar el potencial de generación ácida de una muestra de relave. Esta muestra debe ser de operaciones abiertas ó cerradas de la zona centro del Perú. De esta manera, el nuevo método puede ayudarnos a determinar los procedimientos a seguir para la neutralización de agentes contaminantes. Para este trabajo se tomará en cuenta la legislación actual vigente (límites máximos permisibles).

## INTRODUCCIÓN

La consecuencia directa de la actividad minera al llevar a cabo la explotación de un yacimiento es la geodisponibilidad de los minerales para su procesamiento y consecuente exposición al medio ambiente; con ello se dejan expuestos ciertos elementos que antes no lo estaban, o lo estaban de forma mucho más limitada. Cabe destacar, no obstante, que muchos yacimientos minerales, particularmente los menos sulfurados, son en sí, fuentes naturales de contaminación ambiental. Esto depende en gran medida de si son o no aflorantes, de su ubicación respecto al nivel freático, de los factores climáticos y de otros aspectos que van a producir la alteración y disolución de estos materiales.

La interacción entre los sulfuros minerales con el agua y el aire inicia un complejo mecanismo de reacción química entre estos, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana, dando como resultado la generación de drenajes ácidos en mina, (DAM). En esta nueva situación, los minerales primarios, especialmente sulfuros, se alteran o disuelven y modifican el pH y las características de las aguas, dando origen a la formación de otros minerales llamados secundarios (neoformismo), que se forman por la oxidación de los sulfuros.

En la actualidad se utilizan diversos métodos para predecir el potencial de generación de aguas ácidas de un relave; muchos de ellos aplican ensayos estáticos y cinéticos para determinar, a pequeña escala, cuál va a ser este potencial. Lo que se pretende en esta tesis es implementar el uso de los ensayos estáticos y/o cinéticos en conjunto con los análisis químicos, difracción de rayos X y microscopía electrónica para aumentar el grado de certeza y confiabilidad de los resultados para predecir el potencial ácido.

Se trabaja con muestras de relave recolectadas en la zona de estudio, con ensayos y resultados reales sobre estas muestras.

## OBJETIVOS

### Objetivo Principal:

Determinar la capacidad que tiene un relave depositado en la zona del centro del Perú para generar agua ácida a través de ensayos a escala y las formas de neutralización posibles de este relave dependiendo de los resultados obtenidos.

### Objetivos Secundarios:

- Tomar muestras representativas de relave de las zonas designadas y realizar pruebas y ensayos a escala en laboratorio, para determinar la mineralogía y la cantidad de acidez que podría generar a escala real.
- Estudiar los efectos ambientales del agua ácida a largo plazo generados sobre el terreno, tomando en cuenta el potencial contaminante del relave.
- Analizar las soluciones más adecuadas para la neutralización y remediación de los impactos ambientales del relave considerado, tomando en cuenta costos y cantidades necesarias de los insumos.

## CAPÍTULO I

### MARCO TEÓRICO Y GENERALIDADES

#### 1.1. Etapas del proceso minero en donde se produce el Drenaje Ácido de Mina (DAM):

La actividad minera en el Perú es de trascendental importancia, básicamente porque la economía del país tiene alta dependencia en ella. Sin embargo, como cualquier actividad productiva, influye en alguna medida con alteraciones al medio ambiente. Un efecto ambiental importante de esta actividad económica, es la gran generación de desechos, constituidos por los relaves de procesamiento de minerales, que además de ocupar grandes espacios geográficos, presentan el riesgo potencial de generación de ácido. El ácido que se pueda generar, ingresa en un ciclo de disolución de elementos químicos que significarían la contaminación de efluentes acuosos especialmente.

En la actualidad, para la extracción y aprovechamiento de minerales, la minería hace uso de diversas etapas: exploración, modelamiento, extracción o explotación, concentración (incluido el proceso de desecho de residuos), cierre, etc., todas estas etapas modifican de alguna forma la disposición natural de los minerales en el ecosistema. Al ser extraídos, principalmente los sulfuros, son liberados al medio ambiente y dispuestos a las reacciones de oxidación junto al agua y al oxígeno, factores que aceleran la generación de drenaje ácido de mina (DAM) o aguas ácidas.

### 1.1.1. Exploración y Modelamiento:

En la etapa de exploración y modelamiento, en donde se realizan perforaciones diamantinas y sondeos superficiales, se modifican algunas partes para la toma de muestras sistematizada de los posibles yacimientos; este proceso podría provocar que algunos minerales sean liberados hacia la superficie y se mezclen con las aguas adyacentes provocando ligera variación en el pH y en la acidez de las fuentes acuosas.

### 1.1.2. Extracción o Explotación:

En la fase de extracción o explotación, la roca perforada y volada es extraída para su aprovechamiento, dependiendo del grado de ley que tenga; para realizar esto se utilizan diversos procedimientos de perforación y voladura controlada en zonas ricas; posteriormente a esto, se realiza el proceso de carguío y acarreo para dejar el mineral en las zonas de concentración o chancado y el material de desmonte en los botaderos designados.

En esta fase los minerales sulfurosos son retirados de la roca encajonante natural y quedan expuestos a la meteorización hacia el medio ambiente (aire, agua, bacterias, temperatura, etc.), esto provoca que se oxiden y produzcan reacciones de acidez que modifiquen las aguas en la mina, pudiendo producir el drenaje ácido de mina (DAM), estas finalmente terminarán en las descargas y acuíferos naturales, mezclándose y contaminando las aguas utilizadas por poblados aledaños a las zonas de impacto minero.

### 1.1.3. Concentración y Cierre:

La etapa de concentración es en donde llega el material volado para ser procesado y dispuesto para aprovechar el material con ley valiosa y desechar el relave o material sin valor económico, nulo o despreciable. Al momento de desechar y depositar los residuos, estos aún contienen cierto grado de ley no aprovechable de mineral sulfuroso (productos finales no procesables con leyes mínimas).

Los relaves tienen características propias provenientes de la misma geología de los yacimientos minerales de una determinada zona de la mina. Por lo tanto presentan diversidades mineralógicas y por ende diversas respuestas a los procesos de oxidación que generarán drenajes ácidos con intensidad y velocidad variable, dependiendo de los minerales contenidos.

Los residuos dejados por las operaciones de concentración de minerales, principalmente flotación, pueden entrar en contacto con los medios naturales de agua y aire, ya sea a través de mezclas del agua usada para los procesos de concentración o a través de los relaves depositados en las canchas o relaveras de las minas en operación o ya cerradas / abandonadas. Estos residuos o relaves al reaccionar con el medio ambiente natural desencadenarán reacciones de oxidación y producirán también el fenómeno de drenaje ácido de mina (DAM), contaminando las aguas próximas a estos botaderos.

Los depósitos de relave dejados por una mina antigua en su etapa de cierre influirán también en la formación de DAM, ya que las estructuras antiguas podrían ceder (casos ya conocidos) y las responsabilidades por estos daños ambientales terminarían siendo no asumidos por los responsables. Al mezclarse el relave con las aguas cercanas a estas presas cerradas, se

produce la aparición de aguas ácidas que terminan contaminando las descargas aledañas.

## 1.2. La problemática del DAM en las minas del Perú:

Los drenajes ácidos de la minería metálica son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el Perú y el mundo, debido a que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizado el ciclo productivo.

La minería es una de las actividades industriales en las que se utiliza el agua de manera racional. Por un lado emplea el agua en sus operaciones y asimismo, en sus excavaciones genera ciertos volúmenes de agua fundamentalmente por infiltración de los acuíferos interceptados y de las aguas superficiales.

Los drenajes ácidos son tóxicos en diverso grado para el hombre, la fauna y la vegetación, contienen metales disueltos y constituyentes orgánicos solubles e insolubles, que generalmente proceden de antiguas labores mineras, procesos de concentración de minerales, presas de residuos y relaveras de mina. En el Perú existen reportes de la muerte de miles de peces y crustáceos de ríos, afecciones a ganado y destrucción de cultivos y riveras, así como la introducción de una coloración y turbiedad en las aguas de ríos y lagos.

La problemática del DAM en las minas del Perú radica en el impacto social que tiene la actividad minera en el país. El problema se encuentra en que muchas operaciones y minas antiguas, anteriores a los años 2000, han venido dejando grandes pasivos ambientales que poco a poco han ido contaminando las aguas y los medios en los que se encuentran y sus alrededores. Ante este contexto resulta muy importante que las empresas apliquen una adecuada responsabilidad social y un manejo responsable de sus desechos y sus cierres de operaciones.

Antiguamente, las minas al terminar su ciclo de explotación, dejaban desechos y residuos mineros sin una adecuada precaución. Actualmente, las empresas mineras cumplen con las regulaciones medioambientales. Aun así, ciertos residuos, comúnmente llamados relaves, se encuentran a la intemperie (mezclándose con las aguas) o en el mejor de los casos en unas canchas dispuestas para la recepción de estos materiales. Estos depósitos antiguos, a lo largo de los años, terminan cediendo por su pobre o mal diseño y de igual manera terminan contaminando las aguas y los suelos de la zona de impacto aledaña a estos botaderos. Las aguas contaminadas vienen cargadas de una elevada acidez, metales pesados, sustancias tóxicas y múltiples bacterias y organismos que hacen que las fuentes acuosas resultantes no sean aptas para el uso en la ganadería o agricultura (principales fuentes económicas de los poblados en estas zonas de impacto) y mucho menos para el consumo humano.

Al entrar, los relaves sulfurosos, en contacto con las fuentes acuosas del medio, se producen reacciones de oxidación rápidas que aumentan la acidez del agua y provocan una contaminación fuerte. La problemática actual del DAM se concentra principalmente en las minas que ya cerraron operación (clausuradas), las cuales dejaron grandes cantidades de relaveras y desechos mezclados con el medio ambiente; estas relaveras dañan el sistema natural de aguas de los puntos cercanos y presentan una problemática actual significativa debido a que la designación de responsables es muy ambigua e incierta, esto se da en incontables casos en minas antiguas del centro del país (Cerro de Pasco y Junín).

En lo referente a las mineras actualmente en operación y con posibles situaciones de generación de DAM, la problemática se centra en encontrar métodos de remediación y atenuación de los impactos en toda la cadena productiva en donde se pueda generar este fenómeno. La remediación debe ser sostenible, viable y económica en el tiempo para que se pueda también manejar una vez que la minera haya cerrado sus operaciones.

En la actualidad existen innumerables denuncias y casos de conflictos entre empresas mineras, comunidades y el estado peruano por problemas ambientales evidentes en casos de empresas que actualmente se encuentran en operación, minas ya cerradas y operaciones abandonadas en las regiones de Ayacucho, Apurímac, Huancavelica, Cusco, Puno, Pasco, Arequipa, Moquegua, Tacna, etc. La gran mayoría de estas denuncias apuntan hacia un mal manejo de recursos o a una clara contaminación de los recursos naturales por parte de la actividad minera. Existen muchos casos de canchas de relave abandonadas en la región de Cerro de Pasco debido a una mala regulación de la actividad minera ambiental en el país en la década de los 70's y 80's.

La ley vigente establece que para cada nuevo proyecto minero debe establecerse un Estudio de Impacto Ambiental (EIA), este debe ser aprobado y saneado por la legislación peruana, los organismos reguladores y las comunidades dentro del área de influencia. Para el caso de las operaciones mineras en actividad al momento de promulgada la ley, estas debieron implementar un Plan de Adecuación Medio Ambiental (PAMA) que incluía el correcto manejo de sus desechos y emisiones al medio ambiente. Todo esto fue posible gracias al marco actual vigente:

- Ley N° 28611, ley general del ambiente (LGA, 15 de Octubre de 2005).
- Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM, política nacional del ambiente (Mayo 2009).
- Ley N° 27474, ley de fiscalización de actividades mineras.
- Ley N° 27446, ley del sistema de evaluación de impacto ambiental.
- Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, reglamento de estándares nacionales de calidad ambiental.
- Decreto Ley N° 17752, Ley general de aguas.
- Ley N° 29338, Ley de recursos hídricos (31 de Marzo de 2009).

### 1.3. Aguas Ácidas y Drenaje Ácido de Mina:

Los efluentes líquidos más importantes en minería corresponden a drenajes ácidos de mina, aguas de bajo pH, que atraviesan la roca mineralizada. Entre ellos se encuentran los producidos por relaves provenientes de los procesos de procesamiento de minerales. El drenaje ácido de mina es una condición contaminante grave debido a su naturaleza, extensión y dificultad de solución. Las aguas contaminadas se caracterizan por su alto contenido de acidez (bajo rango de pH), sulfatos y metales pesados.

Uno de los principales focos de producción de agua ácida en una explotación minera son los desechos provenientes de acumulación de relave (relaveras).

Las aguas ácidas producidas por el drenaje ácido son altamente contaminantes para el ambiente debido a su acidez y a la carga de metales. La acidez se produce como resultado de la reacción del agua y del oxígeno con los minerales que contienen azufre, la pirita es la que produce la oxidación de estos sulfuros formando ácido sulfúrico y el ion ferroso.

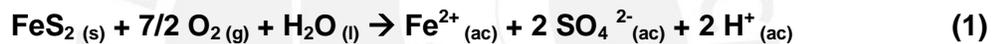
Los sulfuros se presentan en las rocas en forma natural en asociación a diversos metales. Siempre se producirá la oxidación de estos minerales y formarán ácido sulfúrico, pero en una forma muy reducida cuando hay ausencia de oxígeno en el subsuelo. La actividad minera hace que estas reacciones químicas aumenten de grado e incrementen su velocidad, debido a las grandes cantidades de masa rocosa que se remueven y por aumentar el área de exposición de las rocas a condiciones favorables para la formación de estas aguas.

La generación ácida y su neutralización, son el resultado de un gran número de reacciones químicas interrelacionadas. Los elementos y factores fundamentales que participan en la generación de agua ácida en estas reacciones son los siguientes:

- Minerales sulfurosos.
- Bacterias y temperatura.
- Agua o humedad de la atmósfera.
- Un oxidante, particularmente oxígeno proveniente del aire o de procedencia química.

### 1.3.1. Reacción general para la formación de Drenaje Ácido de mina (DAM):

La reacción general que controla el proceso de formación de drenaje ácido es la siguiente (1)\*:



En presencia de oxígeno, el hierro ferroso sufre la reacción:



Esta reacción tiene una cinética muy lenta y es la que controla la velocidad de todo el proceso.

El hierro férrico que se produce en la Rx (2) contribuye a oxidar cantidades adicionales de pirita (Rx 3) o bien puede precipitar como hidróxido férrico (Rx 4).



(1)\* Tomado de artículo "Minería y Medio Ambiente, Drenaje Ácido de Mina" Econoamérica, Mayo 2007.



Como se puede observar, estas reacciones generan acidez y liberan grandes cantidades de sulfatos, hierro y otros metales que contienen los sulfuros. Este lixiviado reacciona con las rocas del medio provocando reacciones con otros minerales haciendo que se disuelvan otros elementos y dando origen a la formación de otros minerales llamados secundarios (neoformismo), que se forman por la oxidación de los sulfuros.

Consecuentemente, la evaluación de las especies minerales que constituyen las muestras de relave es de vital importancia. Así por ejemplo, especies minerales como la pirita,  $\text{FeS}_2$ , galena,  $\text{PbS}$ , arsenopirita,  $\text{FeAsS}$ , enargita,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ , esfalerita (con inclusiones de hierro o cadmio),  $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$ , pueden reaccionar al ser expuestos a agentes atmosféricos.

Estas reacciones se producen con efectos concatenados, dando origen a iones o especies solubles en agua. Evidentemente, la incorporación de estas sustancias disueltas a las fuentes acuosas naturales, representa un serio problema que se podría ocasionar a partir de la presencia de aquellas especies mineralógicas.

Entre los principales productos contaminantes disueltos en las fuentes acuosas (ríos y aguas subterráneas) como resultado de los elementos contaminantes en los relaves mineros podemos identificar los siguientes:

- Sulfato de Cobre ( $\text{CuSO}_4$ ): Es un compuesto tóxico por ingestión, induce el vómito y resulta irritante ante un contacto prolongado con la piel. Tiene varios usos industriales: como alguicida, en la fabricación de concentrados alimenticios para animales, abonos, pesticidas, industria del cuero, pigmentos,

baterías eléctricas, recubrimientos galvanizados (recubrimientos de cobre ácido por electroposición), sales de cobre, preservantes de la madera, procesos de grabado y litografía, reactivo para la flotación de menas que contienen Zinc, industria del petróleo, caucho sintético, industria del acero, tratamiento del asfalto natural, colorante cerámico, entre otros.

- Ácido Arsénico ( $H_3AsO_4$ ): sus usos industriales se ven reducidos por su alta toxicidad, entre los pocos encontramos: como preservante de maderas, como biocidas, agentes para dar acabados en vidrio y metal, etc.
- Sulfato de Plomo ( $PbSO_4$ ): este producto es tóxico ante la inhalación, ingesta o inclusive al contacto con la piel, se le describe como un “veneno acumulativo” y su exposición prolongada podría conllevar a casos de anemia, daño al riñón, daño a la vista y al sistema nervioso central (en especial en niños). También puede ocasionar defectos reproductivos y problemas cardiovasculares. Es corrosivo y al contacto con los ojos puede causar irritación y quemaduras severas.
- Sulfato Ferroso (II) ( $FeSO_4$ ): entre los principales usos industriales se encuentran: como agente reductor del cromato en el cemento, colorante de tintas, horticultura, etc.
- Sulfato Férrico (III) ( $Fe_2(SO_4)_3$ ): se usa como coagulante para desechos industriales y en pigmentos. Además actúa como agente oxidante en contacto con los minerales.
- Ion ( $H^+$ ): Principal ion que genera la acidez en la fuente de agua (drenaje ácido).

- Ácido Sulfúrico ( $H_2SO_4$ ): La industria que más utiliza el ácido sulfúrico es la de los fertilizantes. Otras aplicaciones importantes se encuentran en la refinación del petróleo, producción de pigmentos, tratamiento del acero, extracción de metales no ferrosos, manufactura de explosivos, detergentes, plásticos y fibras inorgánicas.
- Iones Metálicos ( $Fe^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ , etc.): Estos iones metálicos pueden acarrear problemas graves a la salud de los seres humanos si son consumidas directamente de las fuentes acuosas (agua contaminada), como enfermedades a los sistemas respiratorios y/o nerviosos.

Todos estos productos resultan nocivos para el hombre sea cual sea su vía de ingreso al organismo (consumo directo del agua, uso para fines agrícolas, para regadío de terrenos, para uso común, etc.) y su presencia en las muestras de relave analizadas o de sus elementos principales que podrían producirlos demuestran peligros potenciales para los efluentes líquidos con los que se podría mezclar el relave minero.

### **1.3.2. Influencia de Factores Biológicos en la Formación de Drenaje Acido:**

Después de ser expuesto al aire y al agua, y de darse la oxidación del metal sulfuro (a menudo pirita, que es hierro-sulfuro) dentro de la roca circundante y el desmonte se genera acidez. Las colonias de bacterias aceleran en gran medida la descomposición de los iones del metal, aunque las reacciones también ocurren en un ambiente abiótico. Estas bacterias son llamadas extremophiles y tienen ocurrencia natural en la roca, pero las condiciones de agua y oxígeno limitadas hacen que mantengan niveles generalmente bajos.

Extremophiles especiales conocidos como los “Acidophiles” (tienden hacia condiciones ácidas) se favorecen especialmente de los niveles bajos de pH en las minas abandonadas para multiplicar su presencia. Particularmente, la “*Acidithiobacillus ferrooxidans*” es una contribuyente dominante a la oxidación de la pirita.

La cinética de las reacciones de formación de agua ácida es muy lenta, pero se acelera cuando son catalizadas por bacterias acidófilas.

Diversas bacterias actúan dependiendo del nivel de pH en la reacción, por ejemplo para valores de pH entre 3,5 a 4,5 el ion férrico es catalizado por la bacteria *Metallogenium* y a pH por debajo de 3,5 la reacción es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. Por lo general, a pH entre 2,3 a 3,5 el ion férrico por hidrólisis precipita como hidróxido  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  (sólidos de color amarillo, naranja o rojo), lo que provoca un descenso del pH.

Mientras la acidez producida sea baja en relación a la capacidad neutralizante del medio, estas bacterias no pueden desarrollarse y la producción de lixiviados ácidos no es muy elevada. Sin embargo, si las condiciones que se alcanzan son ácidas, se produce un incremento de la población de bacterias que aceleran estos procesos, lo que ocasiona que cada vez se produzca mayor nivel de ácido y el proceso se retroalimenta, generando un lixiviado con valores de pH muy bajos y altas concentraciones de metales y metaloides.

La contribución bacteriana para la oxidación de sulfuros y hierro puede ser compleja, gracias a la aportación de muchas especies. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* a menudo juega un mayor rol en las oxidaciones orgánicas intensificadas en ambientes naturales. Esto justifica la atención dada a esta

bacteria, sin embargo no siempre justifica la exclusión de otras bacterias para su consideración en estos procesos. En principio, debe considerarse que las bacterias implicadas en el proceso de formación de aguas ácidas están presentes en todos los suelos y que su mayor o menor abundancia, o su mayor o menor actividad, depende de la idoneidad o toxicidad del medio. Respecto a la actividad bacteriana y la velocidad de generación ácida están asociadas a diversos factores, como:

- Energía de activación biológica
- Densidad de población bacteriana
- Proporción de aumento de la población
- Concentración de nitratos
- Concentración de amoníaco
- Concentración de fósforo
- Concentración de CO<sub>2</sub>
- Concentración de algunas bacterias inhibidoras

Las bacterias requieren, para su crecimiento, de una serie de nutrientes imprescindibles y un pH cercano a 3,2. El más importante es el dióxido de carbono, que es su principal fuente de carbono, también requieren de nitrógeno, magnesio, azufre y fósforo. Habitualmente el *Thiobacillus ferrooxidans* toma el nitrógeno que es fijado por otras bacterias, aunque según algunos autores, concentraciones de nitrógeno inhiben el proceso, esto parece explicarse mejor por la disminución en el contenido de oxígeno y dióxido de carbono que dicho aumento lleva asociado.

De igual forma, deberían considerarse aquellas sustancias tóxicas para las bacterias. Algunos de los metales perjudiciales para el *Thiobacillus ferrooxidans* son: mercurio, cobre, níquel y uranio. También se ha observado que la estabilidad de las piritas, ante el ataque de dicha bacteria, está asociada con un contenido significativo de las mismas con titanio.

### 1.3.3. Otros Factores que Influyen en el Proceso de Formación de Aguas Ácidas:

La cantidad y calidad del drenaje ácido depende también de las características fisicoquímicas de los materiales que entran en contacto con los flujos de agua. La movilización de los metales pesados y la clase de productos generados en las reacciones están controladas principalmente por la geoquímica de los residuos y el agua intersticial.

Cuando baja el pH, la cantidad de metales disueltos suele aumentar. Sin embargo, en determinadas condiciones químicas, los metales también pueden movilizarse en pH neutros o alcalinos. Por tanto, durante la neutralización de efluentes con pH bajos se produce la precipitación de muchos de los metales solubles, pero el drenaje resultante sigue conteniendo metales residuales y productos de reacciones secundarias.

El estado de las aguas ácidas puede cambiar con el tiempo, sobre todo si la capacidad de neutralización del medio se agota. Si se activa la formación de aguas ácidas, conviene tomar ciertas medidas preventivas y de control para que los efluentes contaminantes que se generen estén por debajo de los niveles que pueda asimilar el medio natural, sin que se produzcan impactos significativos.

Los fenómenos y parámetros que afectan a la geoquímica de aguas ácidas de mina son: velocidad de reacción de la pirita y otros sulfuros, oxidación e

hidrólisis de Fe disuelto y otros elementos, capacidad de neutralización de los minerales y materiales, capacidad de neutralización de las aguas carbonatadas, transporte de oxígeno, movilidad de agua y vapor, permeabilidad del medio, clima y temperatura, evaporación e infiltración, acción catalítica de las bacterias, adsorción microbiana de metales, precipitación y disolución de los metales durante el transporte, complejos orgánicos y procesos micro ambientales.

Por lo tanto para que se formen aguas ácidas deben existir ciertas condiciones mínimas, como:

- Presencia de agua, oxígeno y hierro en cantidad suficiente.
- Presencia de cierto tipo de bacterias.
- Tiempo suficiente para que se dé la reacción.

Si se dan las condiciones anteriores, el resultado final va a depender, a su vez, de una serie de factores que son los que condicionan la cinética y el desarrollo de los procesos químicos y biológicos. Estos factores que determinan la velocidad de la generación ácida, son:

- Eh – pH
- Temperatura
- Cantidad y tamaño de los granos del mineral
- Contenido y presión parcial de oxígeno
- Composición y mineralogía del medio (actividad química del ion férrico)
- Concentración de bacterias

- Contenido de nutrientes
- Contenido en tóxicos y grado de saturación del agua
- Área de la superficie expuesta de los sulfuros metálicos
- Energía de activación química requerida para iniciar la generación ácida.

La presencia de materiales que contienen sulfuros es condición necesaria para la formación de aguas ácidas. Se ha observado que, a mayor contenido de sulfuros, mayor es el potencial de formación de aguas ácidas y, en cuanto al tamaño de las partículas, influye aumentando la velocidad de reacción a medida que disminuye el tamaño, aunque también reduce la infiltración y la entrada de aire.

Se deduce fácilmente que determinados factores, como la presencia de caliza,  $\text{CaCO}_3$ , que impide el descenso del pH y evita la formación de aguas ácidas al anular la actividad catalizadora de las bacterias, reducirán el nivel de producción de acidez. Por el contrario, un aporte continuo de aguas ácidas (por ejemplo provenientes de minas o relaveras abandonadas) acelera dicha actividad.

En cuanto a la temperatura, las bacterias que intervienen en el proceso son mesofílicas y su óptimo de desarrollo suele estar en 28 y 30 °C. Por encima de 35 °C su actividad prácticamente cesa y a temperaturas menores disminuye, salvo casos excepcionales.

#### **1.3.4. Transporte de Drenajes Ácidos:**

A lo largo de los caminos que sigue el agua ocurren una serie de reacciones que varían la cantidad y calidad de los drenajes. La movilización de los metales pesados y la clase de productos de reacción generados, está controlada

principalmente por la composición geoquímica de los materiales presentes (macizo rocoso de mina, estériles de botaderos y residuos de las presas) y el agua intersticial.

Los procesos de generación ácida cambian la composición de los drenajes, reducen el pH del agua y son capaces de disolver metales pesados contenidos en los mismos. Cuando estos drenajes migran desde los lugares de generación e ingresan al medio receptor, aportan una alta carga de metales pesados que son dañinos para el medio ambiente.

Una serie de reacciones ocurren a lo largo del curso de éstas aguas a medida que migran desde la fuente hasta el medio receptor. La clase de agua resultante será determinada por los siguientes factores:

- Naturaleza de los sulfuros
- Disponibilidad y tipo de constituyentes solubles
- Naturaleza del reactante alcalino
- Propiedades físicas del medio y de los residuos.

Las propiedades físicas, químicas y biológicas de los residuos mineros afectan a la solubilidad de los metales, así como a la migración de los contaminantes. La movilización de los metales disueltos está controlada principalmente por factores químicos, mientras que los procesos que ocurren a lo largo del camino de la migración están controlados por factores físicos, químicos y biológicos.

Por lo general, las propiedades que influyen en la solubilidad de los metales principalmente son: el tamaño y la forma de las partículas, la temperatura y la

presión de gases de los poros. Aunque, las propiedades químicas predominan sobre las propiedades físicas, en los procesos de movilización de los metales, éstas últimas tienen mayor importancia sobre la velocidad de la migración del drenaje ácido, así como en las reacciones que ocurren a lo largo del curso de migración.

Entre los principales aspectos que influyen en la migración ácida, podemos considerar a los siguientes:

- Condiciones climáticas
- Permeabilidad del medio o de los materiales
- Disponibilidad de poros de agua
- Presión del agua intersticial
- Mecánica de la evacuación, ya sea por flujos de corriente o difusión.

Estos factores controlan la velocidad de avance del frente contaminante e influyen sobre la cantidad de dilución y grado de mezcla que ocurre cuando el agua ácida se mueve desde la fuente al medio ambiente receptor. Por otro lado, las propiedades físicas del subsuelo son diferentes a las de los residuos generadores de efluentes ácidos, por tanto cada flujo contaminante desarrollará diferentes velocidades de migración.

Respecto a la migración a través de botaderos y relaveras, el flujo superficial tiene mayor movilidad que la infiltración subterránea, debido entre otros aspectos al elevado volumen de poros en los materiales depositados en estas estructuras y a la solubilidad de los metales presentes en los drenajes. En estos casos la solubilidad de los metales va a estar determinada generalmente por el pH y Eh del drenaje, la capacidad de neutralización del material alcalino del

medio, así como por las características de adsorción y la composición química del drenaje. Un cambio de estas condiciones químicas puede incrementar la movilización de los metales o la precipitación de los mismos.

La actividad biológica bacteriana que se produce durante la migración del drenaje también puede influir en la disolución de los metales. Aunque ciertas especies biológicas pueden atenuar la movilidad de metales por absorción y precipitación.

Algunas propiedades de las relaveras, tales como permeabilidad, cantidad de agua intersticial, presión de poro y mecanismos de circulación, controlan la velocidad de migración y reacción de las fuentes contaminantes, así como el grado de dilución que se produce desde la fuente originaria hasta que los drenajes alcanzan el medio receptor. La actividad biológica, distinta a la de las bacterias oxidantes, influye también en la calidad de las aguas a lo largo de las rutas de migración. Determinadas especies biológicas pueden atenuar la concentración de metales por absorción o quizás por precipitación, especialmente si las aguas ácidas circulan a través de zonas encharcadas o anaeróbicas.

#### **1.4. Predicción de la Generación del Potencial Ácido:**

Los procedimientos de predicción del potencial ácido generador en zonas mineras comprenden las siguientes acciones:

- Comparación con minas similares y vecinas
- Muestreo sistemático para recojo de muestras representativas
- Pruebas estáticas sobre las muestras

- Pruebas cinéticas basadas en la reproducción de las condiciones in situ
- Modelado y simulación de los procesos ácido generadores

La predicción de la generación ácida debe iniciarse desde la etapa de exploración del yacimiento, para ello debe realizarse la recolección de muestras en zonas mineralizadas y estériles con el fin de efectuar su correspondiente análisis ácido-base descriptivo. Estos resultados preliminares permitirán que en la fase de planeamiento de la mina se considere o no el tratamiento de los drenajes ácidos que podrían generarse en la fase de explotación y cierre de la instalación.

También debe realizarse un reconocimiento de las unidades geológicas en donde se encuentra emplazado el yacimiento y las áreas sobre las que se ubicarán los botaderos y las relaveras, esto ayudará a conocer mejor la litología, la mineralogía y la continuidad de las unidades geológicas, así como el tipo de residuo o estéril que se generará en el proceso productivo. De igual forma la comparación con minas vecinas de áreas geológicas y paleo-ambientales similares ayudarán a predecir el volumen de drenaje ácido que se va a emitir o generar.

Una vez reconocido el potencial generador de acidez neta de cada unidad geológica, en algunos casos se revisará y ajustará nuevamente el plan de minado de la explotación en el que se incluirán determinadas medidas correctoras para minimizar la generación ácida, incluso puede recurrirse al empleo de modelos matemáticos junto con los ensayos cinéticos para predecir la generación ácida en un largo período.

La predicción de la generación ácida mediante comparación aproximada con otras minas supone que todos los factores que tienen influencia en los procesos de generación ácida son casi idénticos en dichas minas. Aunque por lo general es raro el caso en que los depósitos minerales, así como la roca caja, las alteraciones y el tipo de mineralización sean iguales. A gran escala, la comparación sobre una amplia región

geográfica es probablemente insegura, dado que variarán los factores no geológicos que afectan la generación ácida, así como el clima y la fisiografía.

Todo proceso de predicción de generación ácida se inicia con la definición del volumen de muestreo en la fase de exploración (en nuestro caso en la fase de cierre), para cada una de las unidades geológicas que comprende el yacimiento a explotar. Entre los factores geológicos que regulan la generación de los drenajes ácidos podemos considerar:

- Estado de oxidación de los minerales y materiales
- Composición mineralógica de los materiales ácido generadores y sulfuros
- Textura y desarrollo cristalino en los sulfuros
- Presencia de minerales ácido consumidores
- Presencia de estructuras rocosas que influyen sobre la permeabilidad.

#### **1.4.1. Metodología para predecir la generación ácida:**

El potencial ácido generador de los residuos de mina se encuentra en función al tipo de material movido en las actividades mineras, tales como: mineral gastado de las pilas de lixiviación, residuos y rechazos de la planta de concentración, estériles de los botaderos y de las labores de desarrollo. También hay que tener en cuenta la generación ácida producida por las superficies descubiertas tanto en minería a cielo abierto (taludes, bancos, etc.) como en minados subterráneos (galerías, chimeneas, pozos, etc.). De igual forma influyen en la formación de aguas ácidas el tamaño de las partículas, la variedad mineralógica, la calidad del agua de los drenajes, ciertas características físico-químicas del entorno y las condiciones climáticas del lugar.

El objetivo de la predicción ácida es determinar, por un lado si el volumen de los residuos de mina pueden o no generar acidez mediante la aplicación de una serie de ensayos analíticos, y por otro estimar la calidad de los drenajes en función a su cinética de formación ácida aplicando el modelo más apropiado.

Ambos aspectos se ven muy influenciados por la rigurosidad de los ensayos analíticos. Por lo tanto, una vez realizado el muestreo la estrategia principal será seleccionar el método de análisis más adecuado, teniendo en cuenta ciertos factores que afectan al muestreo y al método de análisis, como el conocimiento de la geología, los costes y el tiempo de realización del ensayo.

Estos métodos de predicción de la generación ácida se basan principalmente en ensayos analíticos de tipo estático y cinético. Para evaluar el potencial generador de las aguas ácidas de mina es necesario conocer al menos lo siguiente:

A. Para estimar el máximo volumen total de aguas ácidas que se pueden generar:

- Cantidad de materiales ácidos generadores (sulfuros)
- Cantidad de materiales ácidos neutralizantes (carbonatos y otros)
- Composición del material potencialmente generador de aguas ácidas
- Aporte de agua al sistema

B. Para estimar el rendimiento de la producción de aguas ácidas (cinética):

- Medidas in situ sobre la generación actual de aguas ácidas

C. Para estimar los posibles cambios en la cinética de producción de aguas ácidas:

- Para cambios puntuales, en cortos períodos:

- + Régimen de lluvias

- + Variación de temperaturas

- Para cambios bruscos de largo alcance:

- + Capacidad amortiguadora del medio y su evolución

Además de determinados componentes que afectan al grado o la relación de generación ácida y que están caracterizados por:

- Tipo de sulfuro mineral

- Tipo de mineral carbonatado

- Área superficial del mineral disponible para la reacción:

- Ocurrencia de los granos del mineral en el residuo

- Tamaño de partículas en el residuo

- Disponibilidad de agua y oxígeno

- Presencia de bacterias

#### 1.4.2. Ensayos Estáticos y Cinéticos para la predicción de la generación ácida:

El objetivo de la predicción ácida es determinar, por un lado si un determinado volumen de materiales o residuos de mina pueden o no generar acidez, mediante la aplicación de una serie de ensayos analíticos y, por otro estimar la calidad de los drenajes en función a las condiciones medio ambientales del lugar.

Los datos obtenidos en los ensayos estáticos y cinéticos se utilizan para hacer una clasificación de los materiales y residuos de mina, también permiten determinar el potencial ácido generador de los mismos. Esta información puede ser obtenida y evaluada desde el estudio económico de la mina en su fase de exploración, durante su ciclo productivo y en la fase de cierre (nuestro caso).

##### 1.4.2.1. Ensayos Estáticos:

Los ensayos estáticos determinan la generación total ácida y la neutralización potencial del ácido en la muestra. La capacidad de generación ácida de un drenaje es calculada como la diferencia de éstos valores. Estos ensayos no predicen el rango de generación ácida, sólo indican el potencial de generación ácida. Comparado con los ensayos cinéticos, son más rápidos y menos costosos.

El objetivo de las pruebas estáticas es la de determinar si el material o residuo de la mina puede generar acidez o no y estimar la calidad de los drenajes en función a las condiciones medioambientales del lugar. Con el tiempo los minerales, al ser expuestos al agua y al aire se comportan de manera distinta, unos como productores de ácido y otros como sus

neutralizadores, con estos valores podemos predecir la calidad del agua y por ende el potencial ácido/base.

Los ensayos estáticos se basan en la evaluación del balance entre el potencial de generación ácida (oxidación de minerales sulfurosos) y la capacidad de neutralización ácida (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). En estos ensayos consideramos los siguientes factores:

- Máximo potencial de producción ácida o potencial de acidez (AP, Acid Potential).
- Máxima neutralización potencial o potencial de neutralización (NP, Neutralizing Potential).
- El potencial de neutralización neta (NNP) que mide la acidez o basicidad de una muestra y se obtiene por diferencia entre el potencial de neutralización (NP) o alcalinidad total y el potencial de acidez (AP) o acidez total ( $NNP = NP - AP$ ).
- pH en Pasta
- % de Sulfuro (%S)
- Grado de generación ácida (NP/AP)

El AP es controlado principalmente por el tipo y contenido de sulfuros, sulfatos y metales que pueden hidrolizarse como Fe, Al y Mn. Mientras que el NP se considera los carbonatos y silicatos.

Las unidades de NP, AP y NNP se suelen expresar en toneladas de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) por 1000 toneladas de material.

Como el NAPP (Potencial de Producción de Acidez Neta), no tiene en cuenta las condiciones ambientales del medio, no cuantifica la cantidad de material que reacciona en la generación ácida, solo indica la posibilidad de que un material o residuo de mina puede o no generar acidez. Pero, este ensayo es importante porque permite predecir los procesos físicos y químicos que se producirán en cada entorno.

Para drenajes ácidos de mina los ensayos estáticos sólo predicen cualitativamente la capacidad de generar acidez, es decir se trata de un dato empírico que tratará de representar a la muestra en su totalidad. Esto mediante la comparación entre la máxima producción de ácido potencial (AP) con la máxima capacidad de neutralización potencial (NP).

Cuando los resultados de los ensayos estáticos dan señales inciertas de la generación ácida, los ensayos cinéticos adquieren gran importancia en la determinación de la capacidad de producción ácida.

#### **1.4.2.2. Ensayos Cinéticos:**

Tanto los ensayos estáticos como los cinéticos incorporan el análisis químico de las muestras, por lo que la representatividad de éstas en algunos casos puede constituir un punto crítico.

En los ensayos cinéticos se trata de reproducir los procesos y las condiciones naturales de los lugares de mina que pueden generar acidez. Estos ensayos requieren de mayor tiempo y son más costosos que los estáticos.

Los ensayos cinéticos se diferencian de los estáticos en que éstos pretenden reproducir en laboratorio las condiciones naturales de las reacciones de oxidación. Frecuentemente ayudan a confirmar los resultados de los ensayos estáticos y sirven para estimar de forma rápida cuándo y cómo va a ocurrir la generación ácida.

Estos ensayos se realizan en muestreos de grandes volúmenes y en períodos muy largos y dan información sobre el rango de oxidación del sulfuro mineral, por lo tanto, indican la producción ácida y la calidad del agua del drenaje, que sirven para evaluar el tratamiento requerido y adoptar las medidas de control necesarias.

Los ensayos cinéticos pueden emplearse para estudiar el comportamiento de diferentes variables que influyen en la generación del potencial ácido, como la temperatura de la muestra, la acción de las bacterias, etc. Estos ensayos tienden a acelerar los procesos de oxidación natural observados en campo, para ello, se suele evaluar los cambios de acidez y pH, así como el contenido de sulfato y la concentración de metales formadores de acidez, todo esto bajo condiciones controladas.

La preferencia por uno u otro tipo de ensayo está en función de la necesidad y la experiencia del usuario. En la mayoría de los ensayos el tamaño de partícula requerido es de malla -200. Aunque para grandes volúmenes de muestras existen equipos que determinan el potencial ácido en partículas gruesas.

Los mecanismos de control de drenajes ácidos de mina, tal como el incremento de alcalinidad mediante la adición de caliza, pueden evaluarse usando ensayos cinéticos.

Por lo general una muestra con pH menor a 3 se considera muy ácida, con pH entre 3 a 5 es una muestra generadora de acidez y cuando el pH es mayor a 5 la muestra es alcalina o neutralizante de acidez.

Al igual que en los ensayos estáticos es importante considerar el tamaño de partículas de la muestra, sobre todo si se hace una comparación de resultados de los ensayos que reproducen a escala las condiciones reales de campo.

Los ensayos estáticos y cinéticos permiten generar un modelo predictivo para la generación de agua ácida a escala. Con esta información se puede determinar, de manera acertada, si es que un relave o drenaje va a generar a futuro un posible desencadenamiento de contaminantes ácidos a los efluentes líquidos.

Otros modelos consideran además factores como: Eh-pH, temperatura, cantidad y tamaño de los granos de mineral, presión parcial del oxígeno, composición y mineralogía del medio, concentración de bacterias, contenido de nutrientes, concentración de elementos tóxicos y otros.

También se suelen considerar el balance hídrico para determinar el movimiento del agua en función a la precipitación, escorrentía, infiltración y flujos de agua superficial y subterránea. El movimiento del agua movilizará la acidez, los sulfatos y metales disueltos y, a su vez dependerá del volumen de agua originado por las precipitaciones y la superficie expuesta, el grado de saturación del medio, así como la conductividad hidráulica y el nivel freático.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA DE TRABAJO Y DESCRIPCIÓN DE MUESTRAS DE RELAVE

#### 2.1. Metodología de Trabajo:

Para la investigación se empleó una metodología de trabajo de tipo descriptiva y experimental, la cual se detalla a continuación:

Se procede a la descripción de las muestras recolectadas a tratar, así como de las especies minerales en los depósitos de relaves o relaveras.

En la parte experimental se analizaron en laboratorio químico las muestras minerales recolectadas con los métodos de ICP (Inductively Coupled Plasma) y ABA (Acid-Base Accounting). Posteriormente se hicieron estudios minerográficos con el microscopio óptico para disponer de información complementaria de las posibilidades de drenaje ácido en función a la mineralogía de las secciones pulidas.

Las técnicas y pasos realizados fueron:

1. Se procedió al muestreo no sistemático de una parte de las relaveras de los centros mineros, en operación y abandonados, más representativos de la zona central del Perú.

2. Se enviaron las muestras a un laboratorio químico, para identificar los componentes de los elementos químicos en el relave, y sus contenidos porcentuales. También, se analizaron las muestras con el método ABA, que es un análisis estático diseñado para identificar la generación de agua ácida en minerales.
3. Se elaboraron las probetas y secciones pulidas para microscopía con las muestras de relaves obtenidos. Con ellas se efectuó el análisis minerográfico en microscopio petrográfico para identificar la mineralogía de las muestras de relave.
4. Se analizaron las muestras por Difracción de Rayos X. La técnica provee la composición mineralógica total, con la limitación de que no puede detectar especies con contenidos inferiores al 1.14 % en peso. Este paso es importante debido a que complementa el análisis químico para una mejor identificación de las especies minerales. Al cruzar la información de los análisis químicos, la difracción de rayos X y los análisis por microscopio óptico se puede tener una mejor idea de los resultados y validar nuestra data para dar mayor confiabilidad a la investigación.
5. Finalmente, se procedió a evaluar y comparar los resultados para conocer el potencial de generación de agua ácida de las muestras.
6. En función a los resultados se presentan métodos de neutralización y/o aislamiento de las relaveras o de los materiales que potencialmente podrían generar un drenaje ácido.

## 2.2. Descripción de Muestras de Relave:

Los relaves mineros que se estudian en el presente proyecto de investigación, corresponden a la cordillera central del Perú, donde confluyen diversos centros mineros. Los yacimientos minerales de donde se obtienen las muestras son de carácter polimetálico, con contenidos de especies valiosas en Plomo, Cobre, Zinc y Plata.

Siendo que el objetivo es de identificar una metodología de predicción de generación acida y el potencial generador ácido de una determinada muestra para la zona asignada para luego aplicar un método de neutralización o control, se han recolectado muestras de relaves de cuatro (04) centros mineros representativos de la minería del Centro del Perú y con ellas se desarrolla el estudio propuesto. Las muestras se identifican como M3, M4, M5 y M7, las cuales fueron el producto de selección de entre siete muestras colectadas.

A continuación se detalla el nombre de las zonas de donde se obtuvieron las muestras. Los pesos de las bolsas no eran iguales para todas las muestras variando estos entre 1 y 5 kg / bolsa.

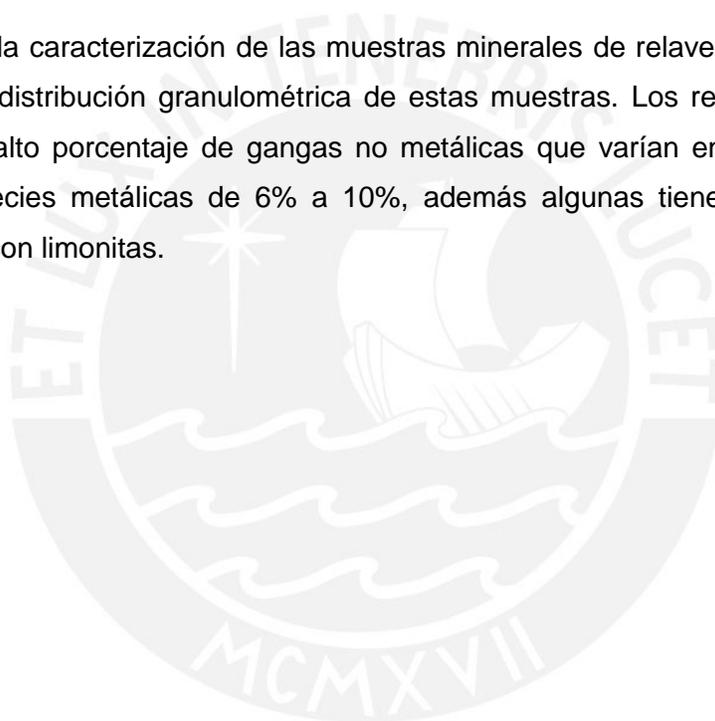
*Tabla 2.1: Detalle de nombre de las zonas de muestras.*

Muestra	Zona	Región
M3	Mar Túnel	Junín
M4	Yanacancha	Pasco
M5	Chaupimarca y Yanacancha	Pasco
M7	Yauli	Junín

Para mayor detalle, en la sección de Anexos, se pueden encontrar fotografías de la toma de muestras, así como de los diferentes relaves de cada zona. En la zona de anexos también se encuentra la ubicación geográfica de las zonas de toma de muestras ubicadas en mapas señalizados.

La selección final de muestras se hizo en base a su diversidad geológica, granulometría y a los resultados obtenidos en los análisis químicos iniciales.

Se realizó la caracterización de las muestras minerales de relaves seleccionados y se efectuó la distribución granulométrica de estas muestras. Los relaves en su mayoría tienen un alto porcentaje de gangas no metálicas que varían entre 90% a 94%, así como especies metálicas de 6% a 10%, además algunas tiene un ligero grado de oxidación con limonitas.



## CAPÍTULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL, PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 3.1. Desarrollo Experimental y Discusión de resultados:

Se describe a continuación el desarrollo experimental del estudio y las interpretaciones asociadas a las evaluaciones que se efectuaron.

Como se detalla en la metodología de trabajo realizada, el primer paso es identificar zonas de muestreo y tomar muestras de una forma no sistemática de una parte de las relaveras de diversos centros mineros, todos estos correspondientes a la cordillera central del Perú, donde confluyen diversos centros mineros representativos.

Las muestras son enviadas al laboratorio químico para identificar los componentes de los elementos químicos en el relave y sus contenidos porcentuales. Estas muestras también son sometidas a ensayos estáticos ABA para conocer su potencial de generación ácida.

Se analizó tanto su composición química como la mineralógica y se realizó un análisis ácido/base. Con todos estos estudios se buscó realizar un *Estudio de Caracterización de los Relaves* lo que nos permite saber cuáles son las características englobantes de cada material y cuánto reactivo y/o tratamiento tendrá que realizarse de manera tentativa para la remediación de estos agentes contaminantes.

La *Composición Química* de cada muestra de relave fue analizada por medio del Ensayo ICP donde se analizaron 35 elementos químicos encontrándose como elementos con mayor concentración al Arsénico, Hierro, Manganeso, Plomo, Azufre y Zinc.

En la siguiente tabla presentamos los principales elementos contenidos en las muestras analizadas, en el caso de esta tabla sólo se muestran los resultados para las muestras seleccionadas (M3, M4, M5 y M7), el detalle de todas las muestras analizadas, así como la lista completa de los elementos encontrados y los análisis de acidez se encuentran en la sección de anexos. Cabe resaltar que los análisis de fierro fueron corroborados por dos laboratorios.

Tabla Nro. 3.1: *Composición química de muestras de relaves:*

Muestra	As	Bi	Cu	Fe	Mn	Pb	Sb	Zn	S Total	S Sulfato	S=
	ppm	ppm	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	%	%	%
M3	2761.91	23.83	392.15	3.79	>10000	1090.15	45.05	1615.66	1.91	0.53	1.38
M4	368.45	137.31	579.75	11.94	1421.83	469.75	16.00	1000.00	10.75	3.58	7.17
M5	527.16	22.81	161.72	14.78	>10000	3272.94	58.12	8999.48	8.89	4.50	4.39
M7	369.15	69.66	129.02	6.71	642.72	1762.57	90.87	705.70	4.25	1.07	3.18

*\*Tomado de "Análisis Químico ICP – SGS GQ1005019-22(Pesos) – Anexos"*

De la Tabla 3.1 se puede observar la presencia de elementos como el As, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb, Zn, S, etc., que pueden representar algún potencial de contaminación. El potencial de reactividad o disolución de estos elementos está muy relacionado con las especies químicas que los constituyen.

Los elementos encontrados del análisis químico realizado podrían reaccionar y derivar en compuestos tóxicos para el medio ambiente y para el ser humano. Como ejemplo:

- Sulfato de Cobre ( $\text{CuSO}_4$ )
- Ácido Arsénico ( $\text{H}_3\text{AsO}_4$ )
- Sulfato de Plomo ( $\text{PbSO}_4$ )
- Sulfato Ferroso (II) ( $\text{FeSO}_4$ )
- Sulfato Férrico (III) ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ )
- Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
- Iones Metálicos ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , etc.)

Todas estas sustancias son nocivas para el hombre y resulta inconcebible que puedan encontrarse en relaveras cercanas y/o mezcladas a fuentes acuosas de consumo humano.

En la muestra M3 se encuentra un alto contenido de As (2761.91 ppm) y de Zn (1615.66 ppm) lo que podría derivar en problemas por envenenamiento de arsénico ya que este y sus compuestos son extremadamente tóxicos, especialmente el arsénico inorgánico. La ingestión de pequeñas cantidades de arsénico puede causar efectos crónicos por su acumulación en el organismo y hasta derivar en propiedades cancerígenas.

En las muestras M4 y M5 se encuentran altos contenidos de Cu (579.75 ppm en M4) y de Zn (1000 ppm en M4 y 9000 ppm en M5), esto es comprensible debido a que se trata de relaves mineros de minas polimetálicas antiguas.

Además de esto la muestra M4 se caracteriza por tener un alto contenido de Azufre (7.17%) lo que predispone a la muestra a ser una generadora de potencial ácido (aguas ácidas) junto con el ácido sulfúrico que se genere ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), aunque se debe

primero analizar a fondo los potenciales totales de acidez (PA) y de neutralización (PN), para obtener finalmente un potencial neto de neutralización (PNN).

### 3.1.1. Presentación de Resultados de Análisis:

Teniendo en cuenta los efectos que podría conllevar el desencadenamiento de las reacciones expuestas en la sección anterior y los efectos nocivos que se producirían al ser expuestos estos relaves a agentes atmosféricos, se realizó la evaluación mineralógica de las muestras de relaves utilizando los resultados de las siguientes evaluaciones:

- Análisis químico por ICP.
- Difractometría de Rayos X
- Evaluación con microscopio petrográfico

La combinación de estos tres métodos nos da un nivel mayor de confiabilidad a nuestros resultados ya que al tener varias fuentes de comparación nuestra incertidumbre se ve cada vez más reducida.

El análisis químico por ICP identifica elementos químicos a nivel de partes por millón (ppm, mg/L). La difractometría de Rayos X detecta las especies minerales que se encuentran con valores superiores a 1.14 % en peso. Por microscopía óptica se identifican especies minerales con tamaños de algunos pocos micrones. La microscopía óptica de luz reflejada, permite identificar minerales de mena y la de luz transmitida los minerales de ganga.

Basada en estas tres herramientas, se ha determinado las siguientes especies mineralógicas y sus valores de composición, correspondientes a las muestras de relave que se analizan en este estudio.

En las tablas 3.2 a la 3.5 y las figuras 3.1 a la 3.4 se muestran los resultados de los análisis por difracción de Rayos X y las microfotografías de las muestras M3, M4, M5 y M7 respectivamente mostrando las especies mineralógicas distinguibles en el microscopio petrográfico. Combinando y evaluando ambos métodos obtenemos la composición y la abundancia mineralógica en relaves.

Los valores reportados de análisis químico y de Difracción de Rayos X se adjuntan en anexos al presente informe.

### 3.1.1.1. Muestra M3:

Tabla 3.2: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 3.

Muestra M-3

Nombre del mineral	Fórmula	%
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	56.22
Muscovita	KAl <sub>2</sub> (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH,F) <sub>2</sub>	22.53
Ortoclasea	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	16.42
Siderita	FeCO <sub>3</sub>	2.61
Pirita	FeS <sub>2</sub>	1.70
Esfalerita	(Zn,Fe)S	< L. D.

\*Tomado de: "Informe de Ensayo: Análisis Mineralógicos por difracción de Rayos X (DRX) de Cuatro Muestras, para sección Ingeniería de Minas PUCP".

Por observación en microscopio óptico y cálculos con valores porcentuales de los elementos químicos de la muestra M-3, se encontraron las siguientes especies minerales:

- Aresenopirita,  $\text{FeAsS}$  = 0.6 %
- Calcopirita,  $\text{CuFeS}_2$  = 0.113 %
- Galena,  $\text{PbS}$  = 0.13 %
- Esfalerita,  $\text{ZnS}$  = 0.24 %

*Figura 3.1 Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 3:*

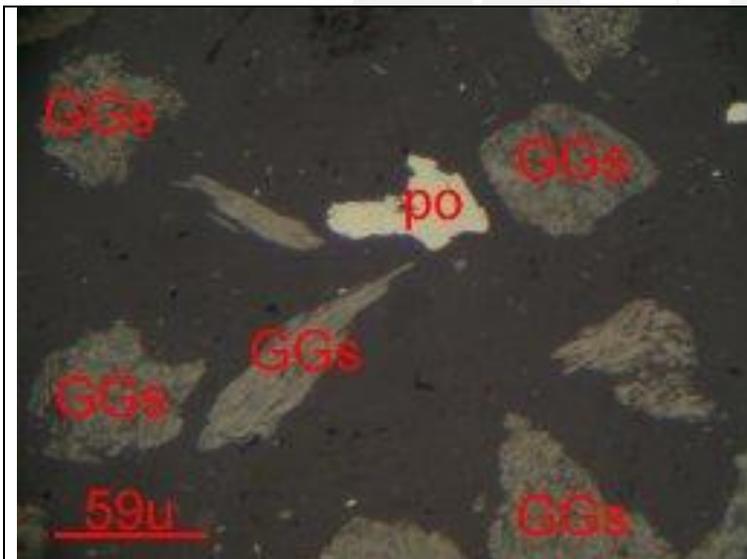


Fig. 3.1.1 Partículas libres de pirrotita (po) y de gangas (GGs), muestra M3.

Magnificación: 200X

Fig. 3.1.2 Partículas libres de pirita (py), calcopirita (cp), pirrotita (po) y de gangas (GGs), muestra M3.

Magnificación: 200X



*\*Tomado de: "Informe de Mineralurgia de la Muestra, Febrero 2011"*

Según lo que podemos apreciar en la primera imagen la pirrotita se encuentra libre y no encapsulada por gangas lo que hace suponer que tendrá una reactividad acelerada, mientras que en la segunda imagen se encuentra que las partículas de sulfuros (calcopirita, pirrotita y pirita) tienen un tamaño muy pequeño a comparación de las gangas, alrededor de 10u, lo que nos hace suponer que la velocidad de reacción para la formación ácida se verá favorecida.

Mineralogía de la muestra M3 por microscopio óptico:

- Minerales Ferríferos: como minerales Ferríferos se encuentran la pirita, la pirrotita y la arsenopirita.
- Minerales Cupríferos: como mineral de cobre encontramos a la calcopirita.
- Otros Minerales: En este grupo se encuentran las gangas, dentro de los cuales están los silicatos y carbonatos).

### Distribución Volumétrica (M3):

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal y es como sigue:

- Calcopirita: 1%
- Pirrotita: 1%
- Arsenopirita: 1%
- Pirita: 5%
- Gangas: 92%

#### 3.1.1.2. Muestra M4:

*Tabla 3.3: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 4.*

#### Muestra M-4

Nombre del mineral	Fórmula	%
Andradita	$\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$	24.00
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	21.88
Calcita	$\text{CaCO}_3$	16.76
Ortoclasa	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	11.55
Pirita	$\text{FeS}_2$	10.87
Diopsido	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$	8.94
Esfalerita	$(\text{Zn},\text{Fe})\text{S}$	3.12
Apatito	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	1.78
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	< L. D.

\*Tomado de: "Informe de Ensayo: Análisis Mineralógicos por difracción de Rayos X (DRX) de Cuatro Muestras, para sección Ingeniería de Minas PUCP".

Por observación en microscopio óptico y cálculos con valores porcentuales de los elementos químicos de la muestra M-4, se encontraron las siguientes especies minerales:

- Aresenopirita,  $\text{FeAsS}$  = 0.08 %
- Calcopirita,  $\text{CuFeS}_2$  = 0.167 %
- Galena,  $\text{PbS}$  = 0.054 %
- Esfalerita,  $\text{ZnS}$  = 0.24 %

Figura 3.2 Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 4:

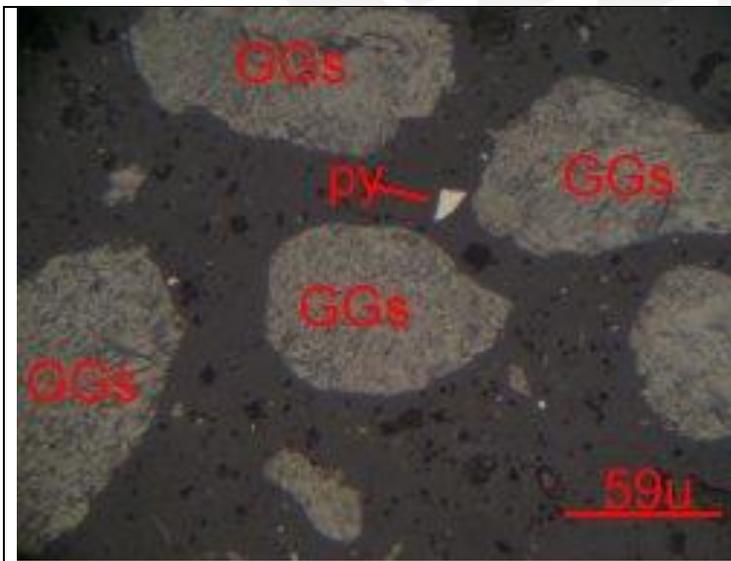
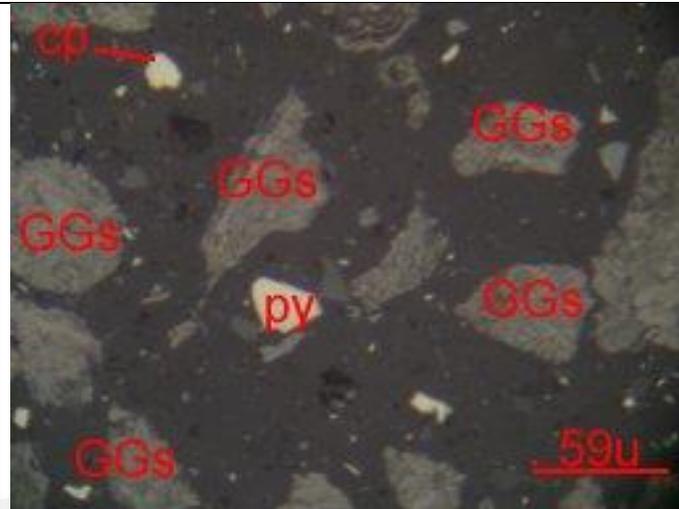


Fig. 3.2.1. Partículas libres de pirita (py) y de gangas (GGs), muestra M4.

Magnificación: 200X

Fig. 3.2.2. Partículas libres de pirita (py), calcopirita (cp) y de gangas (GGs), muestra M4.

Magnificación: 200X



*\*Tomado de: "Informe de Mineralurgia de la Muestra, Febrero 2011"*

Por lo que se aprecia en ambas imágenes microscópicas las partículas de sulfuro se encuentran rodeadas o encapsuladas de gangas minerales mayores en tamaño lo que nos permitiría decir que la reactividad de estos sulfuros será lenta, lo cual finalmente conllevaría a que el potencial de generación ácida sea bajo.

Mineralogía de la muestra M4 por microscopio óptico:

- Minerales Ferríferos: como minerales Ferríferos se encuentran la pirita, la pirrotita y la arsenopirita.
- Minerales Cupríferos: como mineral de cobre encontramos a la calcopirita.
- Otros Minerales: En este grupo se encuentran las gangas, dentro de los cuales están los silicatos y carbonatos).

### Distribución Volumétrica (M4):

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal y es como sigue:

- Calcopirita: 2%
- Pirrotita: 1%
- Arsenopirita: 1%
- Pirita: 6%
- Gangas: 90%

### 3.1.1.3. Muestra M5:

*Tabla 3.4: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 5.*

#### Muestra M-5

Nombre del mineral	Fórmula	%
Siderita	$\text{FeCO}_3$	24.94
Ankerita	$\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})(\text{CO}_3)_2$	24.21
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	17.59
Actinolita	$\text{Ca}_2(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	9.98
Pirita	$\text{FeS}_2$	8.91
Calcita	$\text{CaCO}_3$	8.19
Pirrotita	$\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$	6.18

\*Tomado de: "Informe de Ensayo: Análisis Mineralógicos por difracción de Rayos X (DRX) de Cuatro Muestras, para sección Ingeniería de Minas PUCP".

Por observación en microscopio óptico y cálculos con valores porcentuales de los elementos químicos de la muestra M-5, se encontraron las siguientes especies minerales:

- Arsenopirita,  $\text{FeAsS}$  = 0.115 %
- Calcopirita,  $\text{CuFeS}_2$  = 0.047 %
- Galena,  $\text{PbS}$  = 0.378 %
- Esfalerita,  $\text{ZnS}$  = 1.34 %

Figura 3.3 Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 5:

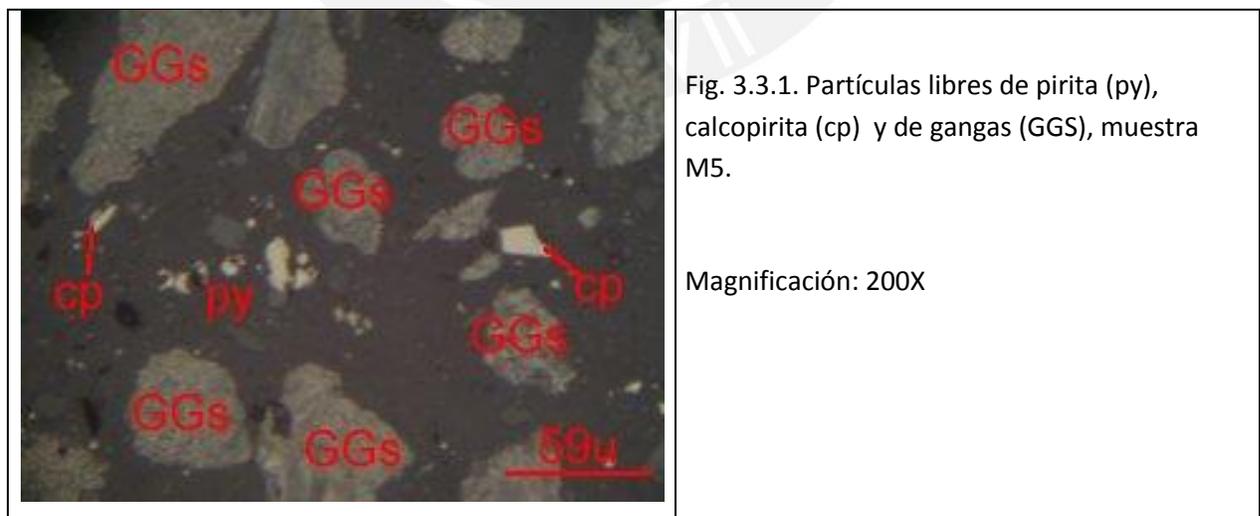
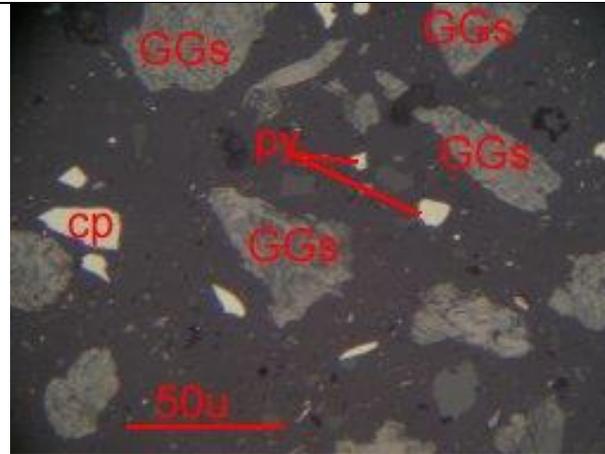


Fig. 3.3.2: Partículas libres de pirita (py), calcopirita (cp) y de gangas (GGs), muestra M5.

Magnificación: 200X



Tomado de: "Informe de Mineralurgia de la Muestra, Febrero 2011"

En estas imágenes podemos encontrar partículas pequeñas de sulfuros (calcopirita y pirita) las cuales están entre 5 y 10u, lo que nos haría suponer que la velocidad de reacción sería rápida ya que a menor tamaño de partícula la reactividad es mayor. Debemos indicar también que según la difracción de Rayos X el contenido de especies básicas o neutralizadoras es alto por lo que se podría dar un balance final hacia la no generación ácida.

Mineralogía de la muestra M5 por microscopio óptico:

- Minerales Ferríferos: como minerales Ferríferos se encuentran la pirita, la pirrotita y la arsenopirita.
- Minerales Cupríferos: como mineral de cobre encontramos a la calcopirita.
- Otros Minerales: En este grupo se encuentran las gangas, dentro de los cuales están los silicatos y carbonatos).

### Distribución Volumétrica (M5):

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal y es como sigue:

- Calcopirita: 1%
- Pirrotita: 1%
- Arsenopirita: 1%
- Pirita: 7%
- Gangas: 90%

#### 3.1.1.4. Muestra M7:

*Tabla 3.5: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 7.*

#### Muestra M-7

Nombre del mineral	Fórmula	%
Cuarzo	$\text{SiO}_2$	61.13
Ortoclasa	$\text{KAlSi}_3\text{O}_8$	12.40
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	12.23
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	12.00
Pirita	$\text{FeS}_2$	2.25

*\*Tomado de: "Informe de Ensayo: Análisis Mineralógicos por difracción de Rayos X (DRX) de Cuatro Muestras, para sección Ingeniería de Minas PUCP".*

Por observación en microscopio óptico y cálculos con valores porcentuales de los elementos químicos de la muestra M-7, se encontraron las siguientes especies minerales:

- Arsenopirita,  $\text{FeAsS}$  = 0.08 %
- Calcopirita,  $\text{CuFeS}_2$  = 0.037 %
- Galena,  $\text{PbS}$  = 0.203 %
- Esfalerita,  $\text{ZnS}$  = 0.105 %

*Figura 3.4 Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 7:*

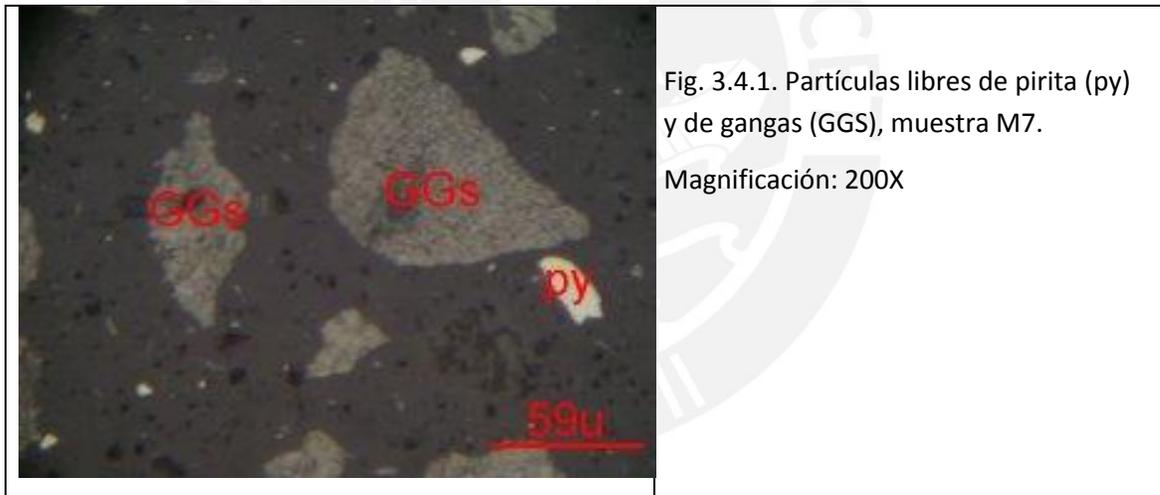
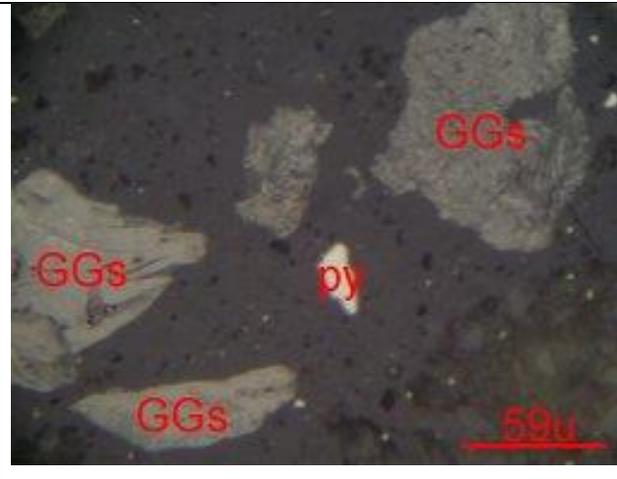


Fig. 3.4.2. Partículas libres de pirita (py), y de gangas (GGs), muestra M7.

Magnificación: 200X



*\*Tomado de: "Informe de Mineralurgia de la Muestra, Febrero 2011"*

Las imágenes nos muestran partículas pequeñas de pirita (10 – 15 $\mu$ ) que están completamente libres del encapsulado de gangas minerales lo cual nos demostraría su facilidad y alta reactividad para degenerar en aguas ácidas al oxidarse.

Mineralogía de la muestra M7 por microscopio óptico:

- Minerales Ferríferos: como minerales Ferríferos se encuentran la pirita, la pirrotita y la arsenopirita.
- Minerales Cupríferos: como mineral de cobre encontramos a la calcopirita.
- Otros Minerales: En este grupo se encuentran las gangas, dentro de los cuales están los silicatos y carbonatos).

### Distribución Volumétrica (M7):

La distribución volumétrica realizada en esta muestra se ha hecho sobre la base de los minerales que han intervenido en el análisis modal y es como sigue:

- Calcopirita: 1%
- Pirrotita: 1%
- Arsenopirita: 1%
- Pirita: 3%
- Gangas: 94%

### 3.1.2. Discusión de Resultados de Análisis:

La evaluación mineralógica realizada a las muestras, la cual combina diversos métodos de análisis, permite determinar de modo preliminar la posibilidad de formación de ácido en los relaves correspondientes dependiendo del contenido mineralógico de cada uno.

Así, se observa que el cuarzo, mineral inerte a la formación de ácido, es también inerte a efectos de neutralización, se encuentra presente en importantes cantidades en todas las muestras analizadas (M3, M4, M5 y M7). Consecuentemente no hay riesgo ecológico con este mineral.

Semejante respuesta a la del cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), se produce con silicatos tales como la moscovita  $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ , ortoclasa ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_9$ ), andradita ( $\text{Ca}_3\text{Fe}_2(\text{SiO}_4)_3$ ), diopsido ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ), apatito ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ), jarosita

( $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), etc. Todas estas especies se encuentran presentes, en diversa magnitud, en las muestras de relaves analizadas.

El porcentaje de todas estas especies mineralógicas, neutras a los efectos ácido - base en las muestras analizadas, es como sigue:

M3: 94.6 %

M4: 67.7 %

M5: 50.0 %

M7: 97.3 %

Es decir, cada una de las muestras minerales analizadas, tienen una alta proporción de especies neutras.

Las especies que presentan un carácter neutralizante son la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomita ( $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ ) y siderita ( $\text{FeCO}_3$ ). Siendo todas ellas constituidas de carbonato, su reacción frente a un ácido es de una típica reacción de neutralización ácido - base (ácido + base  $\rightarrow$  sal haloidea + agua).

Estos minerales se distribuyen en las muestras de la siguiente manera:

M3: 2.6 %

M4: 18.0 %

M5: 33.0 %

M7: 0.0 %

Las especies generadoras de ácido son aquellas que corresponden a sulfuros. En especial, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_{(x)}$ ), las cuales presentan una fuerte reactividad a la formación de ácido.

Las especies formadoras de ácido se distribuyen de la siguiente manera:

M3: 2.8 %

M4: 14.3 %

M5: 17.0 %

M7: 2.7 %

En resumen, la mineralogía de las muestras estudiadas en términos de especies neutras, especies generadoras de ácido y especies con capacidad neutralizante de ácido es presentada en la siguiente tabla:

*Tabla 3.6: Resumen de distribución de especies neutras, generadoras de ácido y especies con capacidad neutralizante de las muestras analizadas*

Muestra	Especies neutras, % peso	Especies de tipo básico, % peso	Especies generadoras de ácido, % peso
M3	94.6	2.6	2.8
M4	67.7	18.0	14.3
M5	50.0	33.0	17.0
M7	97.3	0.0	2.7

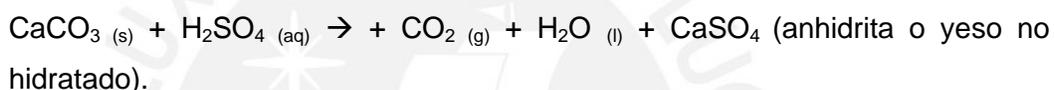
El análisis de esta síntesis mineralógica nos indica que las muestras M4 y M5 tienen escasas probabilidades de generación ácida debido a que la predominante presencia de especies básicas en alguna medida garantiza la posible neutralización del ácido que se genere. En cambio, las muestras M3 y

M7 muestran posibilidades de generación de ácido por la predominancia de las especies sulfuradas.

Los carbonatos reaccionan con los ácidos, según la siguiente reacción iónica:



O en términos de especies:



Esta reacción indica que teóricamente 100 g de caliza pueden neutralizar 98 g de ácido. Es decir, una parte en peso de caliza, neutraliza a una parte en peso de ácido.

Ahora bien, existen metodologías diseñadas para medir la capacidad generadora de ácido de una muestra mineral, las cuales complementan nuestros análisis mineralógicos correspondientes.

Como se detalló previamente en la sección de metodología de trabajo, las muestras trabajadas fueron analizadas por métodos de análisis estáticos para determinar su potencial de generación ácida, su potencial de neutralización neta, así como su pH general para cada muestra.

*La relación ácido/base, ABA*, es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la generación o no de acidez. Teniendo en cuenta que la diferencia entre el

Potencial de Neutralización (NP) y el Potencial de acidez (AP) es positiva, el riesgo de generación ácida es menor, en cambio si esta diferencia es negativa existirá una alta probabilidad de que se formen efluentes ácidos.

Cabe resaltar que cuando los valores (NP / AP) están entre 1 y 3 la predicción de la producción ácida es también algo incierta y dificultosa, mientras que para valores de esta relación por encima de 3 el potencial de generación ácida es mucho menor, es por esto que siempre se toma para el caso de análisis de neutralización el triple de material neutralizante que de material generador de acidez.

La tabla 3.7 nos muestra los parámetros de la Prueba Ácido - Base ABA (Acid - Base Account) y sus respectivas normativas.

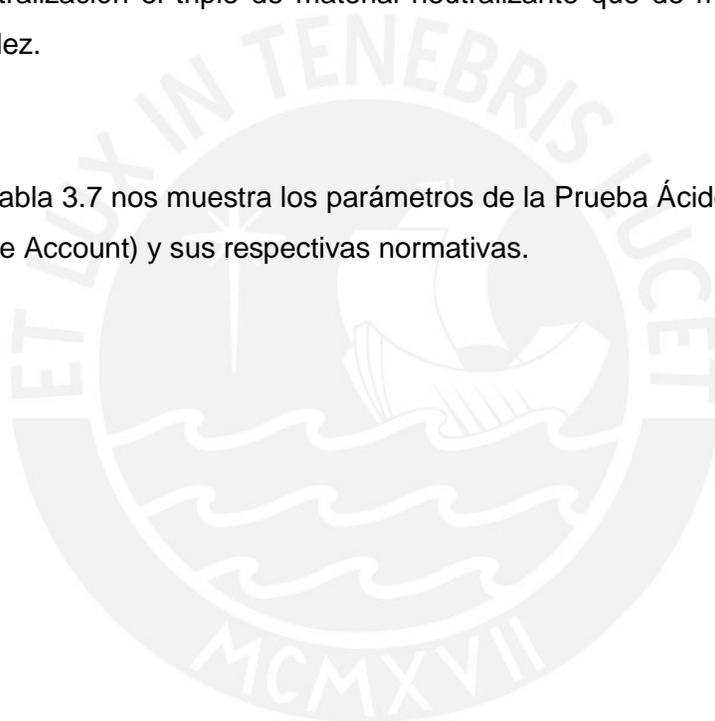


Tabla 3.7: Parámetros de la prueba balance Ácido Base:

Denominación	Parámetro	Norma o Referencia
pH pulpa	pH	EPA METHOD 9045C SOIL AND WASTE pH
NP	Potencial de Neutralización	EPA METHOD EPA-600/2-78-054 p. 47-50 (Lawrence)
S Total	Azufre total	ASTM - STANDARD TEST METHODS FOR ANALYSIS OF METAL BEARING ORES AND RELATED MATERIALS BY COMBUSTION INFRARED ABSORPTION SPECTROMETRY.
S (SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> )	Azufre como Sulfato	ASTM - STANDARD TEST METHODS FOR ANALYSIS OF METAL BEARING ORES AND RELATED MATERIALS BY COMBUSTION INFRARED ABSORPTION SPECTROMETRY.
S <sup>=</sup>	Sulfuro	ASTM - STANDARD TEST METHODS FOR ANALYSIS OF METAL BEARING ORES AND RELATED MATERIALS BY COMBUSTION INFRARED ABSORPTION SPECTROMETRY.
AP	Potencial de Generación ácido	EPA METHOD EPA-600/2-78-054 p. 47-50 (Lawrence)
NNP	Potencial Neto de Neutralización	EPA METHOD EPA-600/2-78-054 p. 47-50 (Lawrence)
NP/AP	Relación Potencial Neto de Neutralización	EPA METHOD EPA-600/2-78-054 p. 47-50 (Lawrence)

\*Fuente: SGS del Perú, 2010

De igual manera, con la relación  $NNP = NP - AP$  (diferencia entre el potencial neutralizador y el potencial generador ácido, inherentes en cada muestra) se puede determinar si un residuo minero (relave) puede o no generar drenaje ácido cuando se altere o lixivie (cuando tome contacto con las condiciones atmosféricas), para ello se tiene en cuenta las siguientes consideraciones detalladas en la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas,

preparadas por el mismo organismo regulador en materia ambiental, el Ministerio de energía y Minas (MEM):

*Tabla 3.8: Criterios de Evaluación de los Resultados del conteo Ácido Base – MEM:*

Potencial de generación de aguas ácidas	Guía MEM	
	NNP Kg CaCO <sub>3</sub> equivalente /t material	Relación NP / AP
No tiene	> +20	> 3,0
Incierto	- 20 < x < +20	1,0 < x < 3,0
Probable	< - 20	< 1,0

*\*Tomado de: MEM, 1995, Guía Ambiental Para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.*

El potencial de generación de acidez determinado a partir de estos ensayos estáticos (Relación ácido / base, ABA) nos es útil para evaluar la posibilidad de generación ácida e implementar así, dependiendo de los resultados obtenidos, las medidas de control a tomar sobre estos residuos para satisfacer los criterios de calidad medioambiental en el entorno en donde se desarrolla la actividad minera.

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos de los análisis estáticos realizados a las siete muestras, así como también se encuentran resaltadas las cuatro muestras seleccionadas especialmente para este proyecto de tesis (M3, M4, M5 y M7).

En este cuadro encontramos todos los valores relevantes para una predicción de generación ácida, estos son contrastados con la *tabla 3.8* según la legislación peruana correspondiente (Guía Ambiental Para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas, MEM 1995) para encontrar su potencial de generación ácida (Alto Potencial, Potencial Marginal o Incierto). Estos valores deben ser cruzados con los resultados mineralógicos obtenidos en los análisis químicos realizados a las muestras para tener una respuesta más acertada del comportamiento de cada uno de los relaves.

Los resultados del análisis estático completo realizado a las muestras seleccionadas así como los análisis químicos correspondientes se encuentran indexados de manera detallada en la sección de Anexos del presente documento.

*Tabla 3.9: Caracterización Ácido / Base de los relaves analizados*

Muestra	S Total (%)	S Sulfato (%)	S (%)	PNN(*)	PN	PA	pH	PN/PA	Generación de ácido
M1	10.19	3.29	6.90	-9.10	206.50	215.60	8.20	0.96	Incierto
M2	10.49	3.20	7.29	-35.30	192.60	227.90	8.10	0.85	Alto potencial
M3	1.91	0.53	1.38	-25.50	17.60	43.10	7.50	0.41	Alto potencial
M4	10.75	3.58	7.17	123.00	234.80	111.80	8.40	2.10	Potencial marginal
M5	8.89	4.50	4.39	189.50	326.80	137.30	6.90	2.38	Potencial marginal
M6	7.40	1.35	6.05	-236.00	-47.10	188.90	2.30	-0.25	Alto potencial
M7	4.25	1.07	3.18	-141.80	-42.60	99.20	2.20	-0.43	Alto potencial

*\*Tomado de “Análisis Químico ICP – SGS GQ1005019-22(Pesos) – Anexos”*

Donde:

PN = Potencial de neutralización;

%S = Porcentaje de azufre como sulfuro;

%S Sulfato = Porcentaje de azufre como sulfato;

%S Total = Porcentaje de azufre total (Sulfuro + Sulfato);

PA = Potencial de acidez;

PNN = Potencial neto de neutralización;

(\*) PN, PA y PNN están expresados en kg-CaCO<sub>3</sub>/t

De acuerdo a los criterios indicados anteriormente y a los resultados de los ensayos ABA obtenidos en el laboratorio, se encuentra que existen muestras de relaves que tienen valores de PNN que van desde -236 hasta -25.50 expresados en kg-CaCO<sub>3</sub>/t, todas las muestras dentro de este rango de valores tienen una alta tendencia o alto potencial a generar drenaje ácido, esto abarca 4 de las 7 muestras totales (M2, M3, M6 y M7) y 2 de las 4 muestras seleccionadas (M3 y M7).

Por otro lado, las muestras de relave -M4 y M5- presentan valores de PNN (kg-CaCO<sub>3</sub>/t) de 123 y 189.50 respectivamente y un pH neutro en ambos casos, por lo tanto no son consideradas generadoras de drenaje ácido (Potencial Marginal) en caso de alterarse en contacto con agua y oxígeno, Esto se da en dos de las 7 muestras totales (M4 y M5) y en dos de las 4 muestras seleccionadas (M4 y M5).

En el caso particular de la muestra M1, la cual no forma parte del grupo de muestras especialmente seleccionadas, el valor de PNN es de -9.10 kg-CaCO<sub>3</sub>/t, este se encuentra dentro del rango de incertidumbre de la predicción de generación de drenaje ácido (-20 < PNN < +20) lo cual hace incierta la predicción para esta muestra en particular. Este caso sólo se da en una de las muestras totales / seleccionadas (M1).

Finalmente, la evaluación del contenido de azufre como sulfuro y la relación de PN / PA obtenida en las pruebas ácido - base para las muestras analizadas, indica que los relaves sí pueden generar acidez (Alto Potencial), pues en su mayoría (M1, M2, M3, M6 y M7), salvo las muestras M4 y M5, presentan un PN / PA menor o igual a 1.

Habiendo efectuado el estudio mineralógico señalado anteriormente, es decir teniendo todo el perfil químico y mineralógico de las muestras, observamos una muy buena correlación entre la evaluación mineralógica y las pruebas químicas estáticas de tipo ABA.

El resumen que vincula estos dos tipos de exámenes (químico mineralógico y estático) se encuentra detallado en las tablas 3.10 y 3.11:

*Tabla 3.10: Resumen del Análisis Mineralógico de las muestras de relave:*

Muestra	Especies neutras, % peso	Especies de tipo básico, % peso	Especies generadoras de ácido, % peso	Posibilidad de generación ácida
M3	94.6	2.6	2.8	Sí
M4	67.7	18.0	14.3	No
M5	50.0	33.0	17.0	No
M7	97.3	0.0	2.7	Sí

Cabe señalar que los estudios y análisis químicos ICP de las muestras de este proyecto fueron realizados por el laboratorio “SGS del Perú S.A.C.” (Anexos 1 y 2) con cinco muestras por cada espécimen para tener un adecuado estudio estadístico. Para hallar el peso final ó % de un elemento se obtuvo el promedio ponderado de todas las muestras, utilizando el peso de cada lote, para cada valor de M #.

Estos números se contrastaron además con los resultados obtenidos del análisis mineralógico por difracción de rayos X (DRX) de las muestras de relave de diferentes yacimientos realizado por la empresa “Buenaventura Ingenieros

BISA” (Anexo 3) lo que da mayor certeza y confiabilidad a los datos usados para este estudio estadístico.

*Tabla 3.11: Caracterización Ácido / Base de los relaves:*

Muestra	S Total (%)	S Sulfato (%)	S (%)	PNN(*)	PN	PA	pH	PN/PA	Generación de ácido
M3	1.91	0.53	1.38	-25.50	17.60	43.10	7.50	0.41	Alto potencial
M4	10.75	3.58	7.17	123.00	234.80	111.80	8.40	2.10	Potencial marginal
M5	8.89	4.50	4.39	189.50	326.80	137.30	6.90	2.38	Potencial marginal
M7	4.25	1.07	3.18	-141.80	-42.60	99.20	2.20	-0.43	Alto potencial

*\*Tomado de “Análisis Químico ICP – SGS GQ1005019-22(Pesos) – Anexos 1 y 2”*

Es importante recalcar que los criterios utilizados comúnmente para asignar el potencial de generación de aguas ácidas de una muestra son empíricos, es decir basados en la experiencia y en la observación de hechos, por lo que es muy recomendable relacionar la información proporcionada por las pruebas estáticas ABA con los resultados de los análisis mineralógicos como se hizo en este proyecto. Las tablas y resultados anteriores ratifican este concepto.

Queda demostrado que la aplicación de previos análisis químicos y mineralógicos aumentan los grados de certeza y confiabilidad en los resultados cuando se quiere detectar el potencial de generación de drenaje ácido de una muestra, ya que proporcionan fuentes de información que pueden ser contrastadas con otros análisis.

Como ejemplo podemos citar las pruebas de difracción de rayos X realizadas a las muestras seleccionadas que aumentaron nuestro grado de seguridad sobre los elementos contenidos en las muestras de relave, confirmando y en algunos casos hasta descartando las pruebas de análisis químicos que se les había realizado anteriormente.

De acuerdo a los resultados anteriores se estableció la probabilidad de generación de drenaje ácido de las muestras en presencia de agua, oxígeno y actividad bacteriana. Probabilidad que tiene alta certeza debido a la combinación de múltiples pruebas realizadas sobre las muestras de relave recolectadas en el campo.

Es importante resaltar que por más que el pH es cercano al neutro en la mayoría de las muestras (M1 = 8.2, M2 = 8.1, M3 = 7.5, M4 = 8.4 y M5 = 6.9), salvo en M6 que es 2.3 y en M7 que es 2.2 (valores de pH notablemente ácidos) (resultados en Anexos 2), el porcentaje de azufre sigue siendo muy elevado (1-11%). Por tanto se podría anticipar o predecir que los depósitos que contienen estos relaves de mina son generadores de acidez; en especial las muestras M2, M3, M6 y M7 (alto potencial de generación ácida); y deben acondicionarse para garantizar su estabilidad física y proceder a su pronto cierre para que no entren en contacto con el agua y el aire, y evitar así su alteración y la generación de efluentes ácidos.

Estos resultados se obtienen de las diferentes pruebas químicas, mineralógicas y estáticas ABA.

Una de las opciones que se puede utilizar para frenar el escape y la formación de drenaje ácido es la contención a través de presas de relave que incorporen elementos de bloqueo para que los relaves no puedan mezclarse con el terreno, entren en contacto con la napa freática, o que sean afectados por las lluvias de la zona.

Otro método de solución para este problema es la neutralización del material generador de ácido; esto se logra aplicando material que neutralice y disminuya el potencial ácido del relave.

Así para el cuidado y cierre del depósito de relaves se recomienda, utilizando la caracterización inicial de Potencial de Generación Ácida aplicado a lo largo de este proyecto, y utilizando un promedio de esta con respecto de todas las muestras tomadas (M1, M2, M3, M4, M5, M6 y M7) para PA (potencial de generación ácida) y asumiendo que todo el material se disolvería y generaría drenaje, utilizar la relación de 1 a 3 con respecto a la necesidad de reactivo para neutralizar el material total almacenado en promedio (146.26 kg-CaCO<sub>3</sub>/t, promedio de PA de todas las 7 muestras), ya que para la reglamentación peruana, fuente: “MEM, 1995, Guía Ambiental Para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas”; la relación de NP/AP debe ser mayor a 3 para que se asegure la no generación de material ácido, acotando la necesidad de realizar un ensayo de lixiviación en columnas para determinar la verdadera cantidad o porcentaje del 100% de metales que generarían acidez.



## CAPÍTULO IV

### MÉTODOS PROPUESTOS PARA LA NEUTRALIZACIÓN Y/O CONTROL DEL POTENCIAL ÁCIDO DE LAS MUESTRAS SELECCIONADAS

#### 4.1. Control de los Drenajes Ácidos:

Por lo general el control de los drenajes ácidos comprende dos conjuntos de acciones a tomar, unas de tipo preventivo y otras de carácter correctivo. Las acciones preventivas se refieren a la adopción de medidas antes del comienzo de las labores extractivas y que son programadas en función al conocimiento del potencial contaminante que poseen los materiales a tratar. Mientras las correctivas son todas aquellas acciones que se llevan a cabo en el momento en que se comprueba que las medidas preventivas no han tenido el efecto deseado y existe la posibilidad de que se generen aguas ácidas.

Para nuestro caso nos concentraremos en las acciones correctivas debido a que tratamos con relaves ya depositados en zonas representativas de minas de la zona centro del Perú.

El objetivo principal de las medidas de control de aguas ácidas es el de satisfacer los criterios de calidad medioambiental en el entorno donde se desarrolla la actividad minera, empleando para ello las técnicas más efectivas de mitigación contra la generación ácida.

Para minimizar los costos de tratamiento y lograr un control efectivo del drenaje ácido, así como para reducir el riesgo de contaminación por aguas ácidas, se recurre a la

aplicación de alguna medida de control con el fin de eliminar o excluir alguno de los factores que participan en la generación ácida.

#### 4.1.1. Prevención y control del proceso de generación de aguas ácidas:

Una forma efectiva de evitar la generación ácida es mediante el control y la eliminación de los parámetros y las condiciones que favorecen la formación de aguas ácidas, mediante la aplicación de las siguientes medidas:

- Restringiendo el ingreso del agua en los residuos expuestos a la meteorización.
- Minimizando la penetración de oxígeno a través del aire o del agua, mediante el empleo de materiales impermeabilizantes.
- Aislando los minerales sulfurosos, mediante flotación u otro tratamiento previo al vertido.
- Controlando el pH del medio, mediante la adición de materiales alcalinos.
- Empleando bactericidas para inhibir la acción bacteriana a los minerales sulfurosos.

Con este tipo de medidas se pretende limitar la formación de aguas ácidas mediante la eliminación de los mecanismos de oxidación de los elementos contaminantes contenidos en los efluentes. Esto se puede conseguir mediante la exclusión de uno o varios de los elementos protagonistas de las reacciones de oxidación y reducción de los sulfuros, o controlando el medio en el que se encuentran estos.

Los métodos y las técnicas de control de la generación ácida de mina más utilizadas se encuentran resumidos en la Tabla 4.1. Estas técnicas se basan en la adopción de medidas dirigidas a prevenir las reacciones generadoras de aguas ácidas mediante la eliminación de alguno o varios de los elementos que intervienen en ella.

Las técnicas preventivas para el control de la formación de aguas ácidas se pueden clasificar en tres grupos de métodos: los *métodos de barrera*, que tienen como objetivo el aislar los sulfuros de los elementos oxidantes o del sistema de transporte hidrológico; los *métodos químicos*, que modifican la composición de las soluciones del agua que entra en contacto con los materiales rocosos y limitan las posibilidades de reacción, y los *métodos de inhibición bacteriana*, que rompen el proceso de oxidación cíclico catalizado biológicamente.

Tabla 4.1. *Métodos y técnicas de control de la generación ácida de mina más utilizadas:*

MÉTODO	OBJETIVO	MEDIDA DE CONTROL
Barrera	Eliminación o aislamiento de los sulfuros	Acondicionamiento, impermeabilización y depósito selectivo de estériles y residuos
		Microencapsulado
		Retirada física de los sulfuros
		Revegetación de terrenos
	Exclusión del Agua	Cunetas de desvío del agua
		Remodelado de la superficie
		Recubrimiento y sellado
	Exclusión del Oxígeno	Depósitos subacuáticos (inundación)
		Recubrimiento y sellado
Químico	Control del pH	Adición de materiales alcalinos y fosfatos
		Empleo de dispositivos rellenos con material carbonatado
		Mezcla de los materiales ácido / base y vertido selectivo
Inhibición Bacteriana	Control y supresión de la acción bacteriana	Aplicación de Bactericidas
		Adición de Fosfatos

\*Tomado de: "Aduvire, O., *Drenaje Ácido de Mina, Generación y Tratamiento, 2006*".

#### 4.1.1.1. Métodos de Barrera:

La prevención es el tratamiento más eficaz al problema de la generación de aguas ácidas, para ello se emplean métodos físicos que actúan como barreras que impiden la mezcla y dilución de los distintos efluentes o reducen el potencial ácido generador de los mismos.

Entre los principales métodos de este tipo podemos encontrar los siguientes, de los cuales son mayormente usadas las técnicas de revegetación de los terrenos y el aislamiento del agua y el oxígeno:

- a. Revegetación de los terrenos
- b. Acondicionamiento y depósito selectivo de materiales
- c. Encapsulado
- d. Aislamiento del Agua
- e. Aislamiento del Oxígeno
- f. Depósitos Subacuáticos
- g. Recubrimiento y Sellado

#### 4.1.1.2. Métodos Químicos:

Otra forma de inhibir la generación ácida es manteniendo el pH de los efluentes de mina dentro de un rango alcalino, esto se consigue en algunos casos añadiendo a las soluciones ácidas materiales alcalinos como roca caliza en polvo, cal, fosfatos y otros.

#### a. Adición de Materiales Alcalinos:

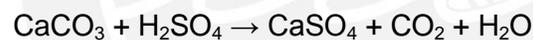
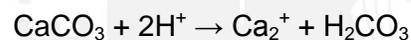
La adición de sustancias alcalinas o rocas básicas es una medida de control adecuada a corto plazo, aunque en algunos casos su efectividad puede notarse incluso a largo plazo, dependiendo de la cantidad, tipo y grado de reacción de los minerales sulfurosos. De igual forma los residuos potencialmente ácido generadores pueden mezclarse con otros materiales alcalinos de recubrimiento del propio depósito y efectuar el vertido en la relavera de manera controlada.

El objetivo de mezclar o añadir material alcalino es controlar el pH en el rango cercano al neutro, limitando así la oxidación química de los sulfuros y la actividad bacteriana. Se puede añadir material alcalino o neutralizante a los residuos, como piedra caliza, cal e hidróxido de sodio, durante el procesamiento; o bien se puede colocar estos materiales en capas dentro de la roca que genera ácido, durante la acumulación. Los aditivos básicos, como la piedra caliza finamente molida que se mezcla íntimamente con la roca, pueden ser adecuados en un corto plazo, dependiendo de la cantidad, tipo y reactividad de los minerales sulfurosos.

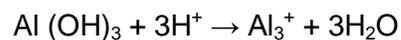
Las sustancias más utilizadas suelen ser: hidróxido sódico o soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), calcita o caliza ( $\text{CaCO}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ ), hidróxido de aluminio ( $\text{Al(OH)}_3$ ) y carbonato sódico ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). La adición de estas sustancias, además de producir la neutralización de las aguas ácidas, crea un ambiente desfavorable para la oxidación de los materiales sulfurosos. Primero, porque las bacterias que participan en el proceso de oxidación del hierro requieren un medio ácido para que su actividad sea óptima y, segundo porque con pH cercanos al neutro el hidróxido férrico precipita y tiende a depositarse sobre la superficie de los sulfuros, recubriéndolos y rompiendo el mecanismo de oxidación.

No es raro que una roca contenga minerales sulfurosos y minerales *ácidos consumidores* a la vez. El balance entre los dos tipos de minerales determinará si la roca producirá condiciones ácidas o no en el agua, a su vez este balance determinará el tipo de procedimiento experimental a emplear en los ensayos estáticos. Una vez que entren en contacto los minerales sulfurosos con los minerales ácidos consumidores la neutralización resultante removerá una parte de la acidez y el hierro de la solución y, a su vez cambiará el pH del medio.

El mineral ácido consumidor más común es la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), que consume acidez a través de la formación de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3^0$  o  $\text{CaSO}_4$  (anhidrita o yeso):



De igual forma actúan otros minerales ácidos consumidores, como por ejemplo el hidróxido de aluminio:



#### **b. Adición de Fosfatos:**

La adición de fosfatos a los residuos de mina hace más lenta la oxidación de los sulfuros, debido a la formación de fosfatos de hierro insolubles como

el  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$  y  $\text{FePO}_4$  que hacen disminuir la concentración de hierro férrico disponible para la reacción con los sulfuros como la pirita.

Existen estudios de laboratorio en donde se ha visto que la adición de apatito triturado reduce la formación de aguas ácidas hasta en un 96%. También hay casos en la utilización de apatito junto con caliza e hidróxido sódico para neutralizar las aguas de una mina subterránea abandonada mediante la inundación de sus labores.

#### 4.1.1.3. Métodos de Inhibición Bacteriana:

La presencia de bacterias como el *Thiobacillus ferrooxidans* y otras que contribuyen a la oxidación del hierro influyen fuertemente en la generación ácida, pero si se logra eliminar estos microorganismos se puede llegar a reducir hasta en un 50% el proceso de acidificación. Entre los bactericidas de mayor efectividad para inhibir la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, se encuentran los surfactantes aniónicos, entre ellos el más eficaz y económico utilizado es el sodio lauril sulfato (SLS) aplicado mediante riego por aspersión, y los ácidos orgánicos.

El empleo de bactericidas puede ser interesante como tratamiento a corto plazo. Los bactericidas tienen una vida limitada y hay dificultad a la hora de aplicarlos de manera efectiva. Además, no debe olvidarse que actúan únicamente sobre los procesos de oxidación biológicos pero no sobre la oxidación química de los sulfuros. Por lo que, es aconsejable aplicar siempre medidas complementarias para neutralizar los efluentes ácidos generados por vía química.

#### 4.1.2. Control de la Migración de las Aguas Ácidas:

Cuando la generación ácida no ha podido ser evitada, el siguiente grupo de medidas es el constituido por aquellas que intentan impedir la llegada de los efluentes ácidos al medio natural. En este caso es preciso impedir la entrada del agua a las fuentes de contaminación y evitar la circulación de los elementos contaminantes.

Entre las medidas de este tipo de control que suelen tomarse, tenemos las siguientes:

- Desviación del agua de escorrentía (lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje) alejándola de la fuente de acidez.
- Prevención sobre la entrada de aguas subterráneas a la fuente de acidez.
- Prevención de la infiltración de las precipitaciones sobre la fuente contaminante.
- Localización controlada de las estructuras de materiales generadores de aguas ácidas.

#### 4.2. Aplicación de Métodos Seleccionados a las Muestras de Relave Analizadas:

En la presente sección analizaremos de manera teórica la aplicación de diversos métodos más utilizados en el tratamiento del drenaje ácido de mina para las muestras de relave seleccionadas anteriormente (M3, M4, M5 y M7).

Se debe tener en cuenta que el presente análisis es meramente investigativo y resulta de un análisis teórico de las condiciones del medio en el que se encuentran los relaves de la zona de las muestras trabajadas.

Utilizaremos un método químico aplicando caliza (aplicación de material alcalino), el cual es uno de los materiales neutralizantes más populares y conocidos en el tratamiento de drenaje ácido.

#### **4.2.1. Método Químico Adicionando Materiales Alcalinos (Caliza $\text{CaCO}_3$ / Dolomita $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ):**

El objetivo de mezclar o añadir material alcalino es controlar el pH en el rango cercano al neutro, limitando así la oxidación química de los sulfuros y la actividad bacteriana.

Es muy probable que se presenten materiales neutralizantes en las zonas aledañas a la zona de explotación minera o al sector de almacenamiento de los residuos mineros (relaves), la presencia y la utilización de estos materiales alcalinos para reducir el potencial generador ácido del relave en análisis disminuiría de manera significativa los costos para neutralizar las fuentes ácidas.

##### **4.2.1.1. Presentación y Muestreo de Muestras de Material Neutralizante:**

Para nuestro caso utilizaremos muestras de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomía ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) de zonas aledañas a nuestros residuos mineros generadores de drenaje ácido, las cuales también pertenecen a la zona centro andina

del Perú. Para este fin se toma como valores referenciales los hallados en el ensayo ambiental realizado por la empresa consultora “SVS Ingenieros” a una empresa minera localizada en el departamento de Cerro de Pasco.

En la siguiente tabla presentamos un resumen de la litología y una breve descripción de las muestras de mano recolectadas de las zonas aledañas (informe referencial unidad minera) a las fuentes de medición de relave minero utilizado para nuestras muestras seleccionadas, es importante resaltar nuevamente que es muy probable encontrar este tipo de material neutralizante o alcalino en zonas cercanas a la explotación minera o a los depósitos de relave en la zona central del Perú.



Tabla 4.2. Descripción de muestras de mano, tomadas en zonas aledañas a las muestras de relave (Referencial), de diferentes tipos de materiales alcalinos posibles para la adición a las muestras seleccionadas y posterior neutralización de su potencial generador ácido:

Muestra	Identificación	Descripción de Muestras de Mano	
		Litología	Descripción
M1'	Caliza Silicificada	Caliza	Marrón brunaceo, textura no clástica, dura a muy dura, efervece violentamente con HCL, presenta vetillas lenticulares a irregulares de cuarzo lechoso y caolín, moderadamente intemperizada. Presenta una capa delgada de chert gris oscura criptocristalina.
M2'	Caliza	Marga Recristalizada	Gris parduzco, textura no clástica a granular fina, dura, efervece moderadamente con HCL, presenta pequeñas drusas y vetillas de calcita cristalizada, caolín y óxidos marrón amarillento; ligeramente intemperizada.
M3'	Dolomía	Marga	Gris claro, textura no clástica a granular fino, moderadamente dura, efervece ligeramente con HCL, presencia aislada de cristales de calcita y "puntos" de piritita en superficie de fracturas, ligeramente intemperizada.
M4'	Dolomía Oxidada	Marga Recristalizada	Gris parduzco, textura no clástica a granular fino, dura a muy dura, efervece moderadamente con HCL, estratificación en capas delgadas a finas, moderadamente intemperizada (oxidaciones).
M5'	Marga	Marga	Gris claro ligeramente verdoso, textura no clástica a granular fino, dura, efervece débilmente con HCL, no intemperizada.
M6'	Limoargilita	Lodolita Carbonosa	Gris oscuro, textura no clástica, dura, no efervece con HCL, presenta vetillas finas de cuarzo con distribución irregular, se fragmenta fácilmente con un golpe de martillo, no intemperizada.
M7'	Caliza Oxidada	Dolomía	Gris claro, textura no clástica, muy dura, no efervece con HCL, presenta oxidaciones marrón rojizo a amarillento, moderada a altamente intemperizada.

\*Tomado de: "Informe DAR Desmonte, Caracterización del potencial de generación de drenaje ácido de roca, Julio 2007".

#### 4.2.1.2. Análisis en Laboratorio de Muestras de Material Neutralizante:

Las muestras fueron analizadas químicamente para caracterizar el potencial de generación de AMD conduciendo pruebas de balance ácido - base en las que se determina el potencial hidrógeno (pH) en pasta, el potencial de neutralización (NP, de *NP – Neutralization Potential*) mediante análisis estáticos, el contenido de azufre como totales y en carbono como carbonato mediante el horno LECO y el contenido de azufre como sulfatos mediante gravimetría. El contenido de azufre como sulfuros se determina como la diferencia entre el contenido de azufre como totales y azufre como sulfatos. A partir del contenido de azufre como sulfuros se calcula el potencial de acidez (AP, de *AP - Acid Potential*).

En las siguientes tablas presentamos de manera resumida los resultados de los análisis de laboratorio realizados a las muestras referenciales de material “neutralizante”, de las que determinamos su potencial generador ácido.

Las siguientes muestras son las que usaremos para el análisis con las muestras seleccionadas de material de relave que según las pruebas realizadas en el presente proyecto tienen un alto potencial de generación ácida, es decir que presentan un valor de NNP menor a “-20” (M2, M3, M6 y M7, entre las seleccionadas y analizadas en la primera parte encontramos a M3 y M7) y que sus condiciones mineralógicas favorecen de alguna forma la formación y generación de drenaje ácido.

Tabla 4.3. Muestras de Relave recolectadas que presentan un alto potencial de generación ácida.

Muestra	S Total (%)	S Sulfato (%)	S (%)	PNN(*)	PN	PA	pH	PN/PA	Generación de ácido
M2	10.49	3.20	7.29	-35.30	192.60	227.90	8.10	0.85	Alto potencial
M3	1.91	0.53	1.38	-25.50	17.60	43.10	7.50	0.41	Alto potencial
M6	7.40	1.35	6.05	-236.00	-47.10	188.90	2.30	-0.25	Alto potencial
M7	4.25	1.07	3.18	-141.80	-42.60	99.20	2.20	-0.43	Alto potencial

Tabla 4.4. Resultados de Análisis de Laboratorio a muestras de material neutralizante referenciales tomadas de informe de ensayo ambiental:

Muestra	pH Pasta	CO <sub>2</sub> (peso %)	Equiv. CaCO <sub>3</sub> (Kg CaCO <sub>3</sub> / t)	S (T) (peso %)	S (SO <sub>4</sub> ) (peso %)	S (S=) (peso %)	MPA (Kg CaCO <sub>3</sub> / t)	PN (Kg CaCO <sub>3</sub> / t)	PNN (Kg CaCO <sub>3</sub> / t)	Nivel Neutralizador (Fizz)
M1'	9.0	24.70	561.4	0.04	0.01	0.03	0.9	508.2	507.3	Fuerte
M2'	9.0	37.55	853.4	0.41	0.02	0.39	12.2	771.4	759.2	Fuerte
M3'	9.0	38.46	874.1	0.47	0.02	0.45	14.1	811.6	797.5	Fuerte
M4'	9.0	37.10	843.2	0.07	0.02	0.05	1.6	799.0	797.4	Fuerte
M5'	8.6	27.12	616.4	0.79	0.02	0.77	24.1	599.2	575.2	Fuerte
M6'	7.9	6.22	141.4	1.93	0.07	1.86	58.1	135.4	77.3	Moderado
M7'	6.5	27.21	618.4	0.75	0.04	0.71	22.2	65.8	43.6	Ligero

Notas:

1. El contenido de carbono como carbonato se determina como CO<sub>2</sub> en el horno Leco y se calcula su equivalente como CaCO<sub>3</sub>.
2. S (T), azufre total determinado mediante el horno Leco.
3. S (SO<sub>4</sub>), azufre como sulfato, determinado por gravimetría.
4. S (S=), sulfato como sulfuro,  $S (S=) = S (T) - S (SO_4)$ , considerando que todos los sulfuros se conviertan en sulfatos.
5. MPA, Potencial máximo de acidez se expresa en kg CaCO<sub>3</sub> equivalentes por tonelada de material. MPA se calcula a partir del contenido de sulfuros presentes.

6. Cuando el % de sulfuro total,  $S(T) < 0.01\%$ , se usa a  $S(T) = 0.01\%$  para calcular el MPA.
7. Cuando el % de sulfatos,  $S(SO_4) < 0.01\%$ , se usa  $S(SO_4) = 0$  para calcular el MPA.
8. PN, Potencial de Neutralización, expresado en kg  $CaCO_3$  equivalentes por tonelada de material.
9. PNN, Potencial Neto de Neutralización, expresado en kg  $CaCO_3$  equivalentes por tonelada de material.
10. El nivel neutralizador o “Fizz” se obtiene comparando los valores de PNN con los valores propuestos en la bibliografía: “MEND, 1995 ARD Guidelines for mine sites in British Columbia.
11. Para garantizar un adecuado estudio estadístico se realizaron al menos tres ensayos por muestra.

#### 4.2.1.3. Interpretación de Resultados:

Para predecir el potencial de generación de AMD se comparan los valores obtenidos para los parámetros estándar (*MEM, 1995, Guía Ambiental Para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas*), así como también los valores de parámetros derivados tales como el potencial neto de neutralización ( $NNP = NP - AP$ ) y la relación entre ambos potenciales ( $NP/AP$ ).

Cabe mencionar que la clasificación y/o predicción basada sobre parámetros de balance ácido base solamente es de carácter de índice y debería ser confirmada y complementada con pruebas cinéticas para estimar con mayor precisión la capacidad de generación de drenaje ácido de un determinado tipo de roca o mineralización.

Tal como se puede observar las muestras no tienen potencial para generar drenaje ácido de roca (material neutralizante), ya que en todos los casos el potencial de neutralización excede largamente el potencial de acidez.

Se observa que las muestras M6' (lodolita carbonosa) y M7' (dolomía), tienen el menor potencial de neutralización (65.8 a 135.4 kg CaCO<sub>3</sub>/t) en comparación a otros valores como 508.2 y 811.6 kg CaCO<sub>3</sub>/t de las muestras M1' y M3' respectivamente, correspondiendo estos últimos a margas y calizas. Cabe tomar en cuenta que estas margas y calizas, por la misma razón, son más susceptibles a reaccionar con aguas ácidas al estar en contacto con ello, lo que podría resultar en su disolución parcial.

#### 4.2.1.4. Cálculos:

En esta sección analizaremos la cantidad necesaria de material neutralizante para eliminar, en lo posible, el (alto) índice de generación ácida de las muestras de relave que resultaron, según las pruebas realizadas, con una alta probabilidad de contaminación por drenaje ácido (NNP < - 20).

Se cruzarán los valores de las muestras de relave con alto potencial ácido (M2, M3, M6 y M7) con todas las muestras de material neutralizante según su **nivel neutralizador**.

M1' = Nivel Fuerte (Caliza silicificada / Caliza)

M2' = Nivel Fuerte (Caliza / Marga recristalizada)

M3' = Nivel Fuerte (Dolomía / Marga)

M4' = Nivel Fuerte (Dolomía oxidada / Marga recristalizada)

M5' = Nivel Fuerte (Marga / Marga)

M6' = Nivel Moderado (Limoargilita / Lodolita carbonosa)

M7' = Nivel Ligero (Caliza Oxidada / Dolomía)

Para nuestros cálculos, se va a estimar la cantidad de material alcalino que se requiere para neutralizar las aguas ácidas generadas por 1 tonelada de relave seleccionado. La aplicación se realizará mediante mezcla con materiales carbonatados, mediante las siguientes condiciones:

- Cantidad de Material con potencial ácido (relave) a neutralizar = 1 Ton
- Material neutralizante trabajando idealmente a un 100% de potencial de neutralización.

Utilizaremos de referencia de cálculo la explicación utilizando el material alcalino N°1 (M1') con las 4 muestras potenciales a generar aguas ácidas. El cálculo de los relaves ácidos con todas las demás muestras neutralizadoras será presentado en una tabla resumen, calculado de la misma forma referencial.

#### **Utilizando Material Alcalino N° 1 (M1'):**

- Identificación: Caliza Silicificada
- Litología: Caliza
- NP (kg  $\text{CaCO}_3$  / t) = 508.2
- AP (kg  $\text{CaCO}_3$  / t) = 0.9
- NNP (kg  $\text{CaCO}_3$  / t) = 507.3

- Nivel Neutralizador: Fuerte

Vamos a estimar la cantidad de material alcalino M1' necesaria para neutralizar las aguas ácidas generadas por 1 ton de relave de la muestra M2:

Material generador de Acidez (M2):

- AP = 227.9 kg CaCO<sub>3</sub> / t
- NP = 192.6 kg CaCO<sub>3</sub> / t, por tanto,
- NNP = - 35.3 kg CaCO<sub>3</sub> / t

Material Consumidor de Acidez (M1'):

- AP = 0.9 kg CaCO<sub>3</sub> / t
- NP = 508.2 kg CaCO<sub>3</sub> / t, por tanto,
- NNP = 507.3 kg CaCO<sub>3</sub> / t

Aguas Ácidas, Potencial Total = 1 Ton x 35.3 = 35.3 t CaCO<sub>3</sub>

Cantidad de material alcalino para asegurar que sea improbable la generación de aguas ácidas (Q):

$$NP / AP = 507.3 / 35.3$$

$$NP / AP = 14.37$$

Para que se garantice la no generación de aguas ácidas, la reglamentación peruana exige o hace suficiente que  $NP / AP \geq 3$ , por tanto,

$$Q (NP / AP = 3:1)$$

$$14.37 \times Q = 3$$

$$Q = 0.21 \text{ t CaCO}_3 \text{ (M1')} / \text{ t relave (M2)}$$

O expresado como factor,

$$Q = 3 \times \frac{NNP (\text{Ácido})}{NNP (\text{Neutralizador})}$$

$$\frac{NNP (\text{Neutralizador})}{NNP (\text{Ácido})} \cong 3 \cong \frac{507.3 \times 0.21}{35.3}$$

Son necesarios 0.21 ton de  $\text{CaCO}_3$  (M1') para neutralizar la generación de aguas ácidas provocada por 1 ton de material de relave de la muestra M2.

De la misma forma, realizamos cálculos idénticos para las otras muestras de relave, generadoras de ácido (M3, M6 y M7) para calcular la cantidad que necesitan de M1' para neutralizar su potencial de generación de aguas ácidas.

Cantidad (Q) de material neutralizante (M1') necesitado para neutralizar la generación de aguas ácidas de las muestras de relave analizadas: (t  $\text{CaCO}_3$  / t relave)

Muestra	Q (t CaCO <sub>3</sub> / t relave)
M2	0.21
M3	0.15
M6	1.40
M7	0.84

### **Utilizando todas las muestras de material alcalino (M1' - M7'):**

De la misma manera, realizamos los cálculos para hallar la cantidad (Q) (t CaCO<sub>3</sub> / t relave) necesaria de las otras muestras neutralizadoras (M1' – M7') para neutralizar las aguas ácidas generadas por 1 ton de relave de las demás muestras generadoras de ácido (M2, M3, M6 y M7):

Muestra	Material Neutralizante Necesitado para neutralizar: (t CaCO <sub>3</sub> / t relave)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
M2	0.21	0.14	0.13	0.13	0.18	1.37	2.43
M3	0.15	0.10	0.10	0.10	0.13	0.99	1.75
M6	1.40	0.93	0.89	0.89	1.23	9.16	16.24
M7	0.84	0.56	0.53	0.53	0.74	5.50	9.76

### **Comentarios:**

- Se puede apreciar que todas las muestras con nivel neutralizador fuerte (M1', M2', M3', M4' y M5') necesitan de bajas cantidades de material alcalino para neutralizar 1 tonelada de material de relave generador de aguas ácidas (entre 0.1 y 1.4 t CaCO<sub>3</sub> / t relave), mientras que las muestras M6' y M7' que tienen niveles moderados y ligeros respectivamente necesitan de cantidades más grandes de material para el mismo fin (entre 0.99 y hasta incluso 16.24 t CaCO<sub>3</sub> / t relave).

- Como se esperaba, las muestras de relave que tienen un potencial de generación de aguas ácidas mucho mayor a los otros (M6 y M7 con NNP de  $-236.0$  y  $-141.8$  respectivamente) requieren de valores mucho más altos de material neutralizante debido a que su NNP ácido neto es mucho mayor que el de las otras muestras. Para tomar un ejemplo incluso la muestra M6 requiere de 16.24 ton de muestra M7' para neutralizar el potencial de 1 tonelada de relave, es decir que se necesitarían alrededor de 16 toneladas de este material de nivel neutralizador ligero para sofocar a 1 de desecho, la relación es de 1 a 16 prácticamente.
- Al evaluar y comparar los tipos de margas en las muestras neutralizadoras (M2', M3', M4' y M5') podemos observar que todas tienen en común que presentan tonalidades grises con texturas no clásicas a granular fina, son de dureza considerable y todas efervescen con HCl (ácido clorhídrico), lo que evidencia la presencia de carbonatos en la muestra. Además todas las margas de este estudio presentan un nivel neutralizador fuerte que va entre 575.2 a 797.5 de PNN neto, lo cual demuestra una alta concentración de material de carbonatos, sean estos en forma de caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) o dolomía ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ).
- Entre las 4 margas la que tiene un “menor” potencial neto de neutralización es la M5' con un PNN de 575.2 a comparación de M2', M3' y M4' que tienen valores que alcanzan hasta los 797.5 inclusive. La diferencia más marcada de este espécimen se encuentra en que tiene tonalidades ligeramente verdosas y que se encuentra no intemperizada, esto podría representar un factor importante en la determinación de su nivel de neutralización. Además podemos mencionar que esta muestra (M5' – Marga: sólo caliza, no contiene dolomía) a diferencia de M3' y M4' se trata de una caliza y no de una dolomía por lo que es solamente carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y no tiene presencia de magnesio, lo cual podría reducir su nivel neutralizador.

- Entre las muestras con menor nivel neutralizador, M6' y M7' con PNN neto de 77.3 y 43.6 respectivamente, podemos encontrar en común que presentan colores grises, texturas no clásicas, son duras y que ambas no efervecen con HCl, lo que nos comprueba su bajo porcentaje de contenido de carbonatos que podrían aumentar su potencial neutralizador de generación de aguas ácidas de encontrarse presentes. M6' presenta vetillas finas de cuarzo con distribución irregular lo que aumenta el contenido de materiales neutros en la composición y M7' presenta oxidaciones marrón rojizo a amarillento, esta oxidación estaría contribuyendo negativamente al potencial neutralizador de la muestra.

#### 4.3. Análisis Económico:

En la presente sección haremos un análisis económico comparativo para demostrar qué método conviene más económicamente y es más rentable, si utilizando la cal del lugar o comprando cal desde diferentes puntos del Perú.

Los datos y costos utilizados para esta parte son reales y han sido recolectados de cotizaciones actuales. Para efectos prácticos asumiremos que los valores NNP neutralizador de la cal comprada son iguales a los de las cales y materiales neutralizadores de la zona, sólo se castigará con el factor de pureza de la cal comprada.

Todos los costos están expresados en dólares americanos (USD) y para su conversión desde la moneda local, nuevos soles (PEN) se utiliza el tipo de cambio promedio para la fecha actual (Mar – 13) (2.56 PEN / USD).

#### 4.3.1. Costos Comunes:

Los costos comunes son aquellos en los que se incurrió para realizar este estudio, incluyen: los honorarios de las personas que toman las muestras, el costo por muestra de las pruebas realizadas, los traslados y alojamientos del personal, el transporte de las muestras, etc. Todos estos representan un costo fijo que se sumaría a ambos casos.

A continuación se detalla el costo fijo de cada partida común:

	Costo (US\$)	Cantidad	Costo Total (US\$)
<b>Análisis Químico SGS + ABA</b>	70.00	7	490.00
<b>Difractometría DX BISA</b>	122.07	4	488.28
<b>Análisis Petrográfico</b>	35.00	4	140.00
<b>Pasajes Personal</b>	23.44	2	46.88
<b>Honorarios Asistente</b>	39.06	1	39.06
<b>Honorarios Ingeniero</b>	109.38	1	109.38
<b>Alojamiento (noche)</b>	70.31	1	70.31
<b>Alquiler de Pick Up (día)</b>	70.00	1	70.00
<b>Costo Uso Pick Up (día)</b>	54.69	1	54.69
<b>Transporte de Muestras</b>	25.00	1	25.00
	<b>TOTAL</b>		<b>\$1,533.60</b>

**El costo total del muestreo o estudio, con todos los exámenes, es de 1,533.60 USD, lo que nos da un valor de 219.09 \$ / muestra analizada (7 muestras en total).**

El Análisis Químico y la prueba estática ABA son exámenes que siempre se realizan en los análisis de predicción ácida, mientras que la Difractometría de rayos X y el Análisis Petrográfico son pruebas adicionales que se han aplicado solamente en el presente estudio para aumentar el grado de certeza (tesis) en la predicción del potencial de generación ácida.

Si quitamos los costos de las pruebas adicionales que se realizaron para esta tesis (Difractometría DX = 488.28 \$ y Análisis Petrográfico = 140.00 \$) tenemos un costo total de estudio de 905.32 USD, lo que nos da un valor de 129.33 \$ / muestra analizada (7 muestras en total).

En resumen:

**Caso 1:** Estudio Actual (utilizando todos los exámenes): Aumenta el grado de certeza.

- **Costo Total:** 1533.60 \$
- **Costo / muestra analizada (7 muestras):** 219.09 \$ / muestra

**Caso 2:** Estudio Tradicional (sin utilizar exámenes adicionales):

- **Costo Total:** 905.32 \$
- **Costo / muestra analizada (7 muestras):** 129.33 \$ / muestra

**La diferencia en costos entre ambos casos es de 89.76 \$ / muestra analizada, costo que es completamente justificable dando los grados de certeza demostrados de los resultados. Se concluye que la adición de los estudios a la predicción de generación ácida de los relaves es viable y rentable por la relación costo / beneficio.**

## Notas:

1. Los costos de los análisis químicos en SGS, las difractometrías de rayos X en BISA ingenieros y los análisis petrográficos en el microscopio son contabilizados por muestra (\$ / muestra).
2. Para el análisis químico se trabaja con todas las 7 muestras recolectadas.
3. Para la Difractometría y los análisis petrográficos sólo se trabajó con las 4 muestras de relave seleccionadas.
4. Se considera que para el proyecto se necesitan dos personas: un geólogo o ingeniero y un asistente de campo.
5. Los pasajes del personal están considerado una tarifa de S/. 60 por persona (Lima – Cerro de Pasco - Lima) para 2 personas.
6. Los honorarios del asistente de campo están calculados a S/. 50 el día. El trabajo requiere de 1 asistente de campo por dos días.
7. Los honorarios del geólogo o ingeniero están calculados a S/. 140 el día. El trabajo requiere de 1 geólogo o ingeniero por dos días.
8. La tarifa utilizada para el alojamiento es de S/. 90 por noche por persona / habitación. Para este proyecto se necesita el alojamiento para dos personas por 1 noche.
9. El alquiler de la camioneta pick up es realizado en la ciudad de destino, es utilizada para transportar al personal y cargar las muestras entre los puntos de muestreo. Se necesita una camioneta por un día de trabajo.
10. El costo de combustible / día de la camioneta pick up se calculó bajo el siguiente esquema de costos:

<b>Eficiencia Pick Up</b>	25	Km /gal
<b>Uso Diario Pick Up</b>	250	Km
<b>Consumo Pick Up</b>	10.00	gal
<b>Costo Diesel</b>	5.47	\$ /gal
<b>Costo Uso Día</b>	54.69	US \$ / día

11. El costo de transporte de las muestras es considerado como referencial para llevar un lote de 7 bolsas de entre 10 – 15 Kg desde Cerro de Pasco a la ciudad de Lima.

#### 4.3.2. Costo Utilizando Materiales Neutralizadores de la Zona:

En la siguiente sección haremos el cálculo del costo total que necesitaremos para neutralizar el potencial de generación de aguas ácidas de 1 tonelada de material de relave de las muestras tratadas utilizando los materiales neutralizadores de las zonas aledañas a los puntos de muestreo.

El utilizar material alcalino extraído de zonas cercanas permitirá reducir los costos de tratamiento de las aguas ácidas ya que se ahorraría mucho en transporte, manipuleo y compra de insumos (cal, caliza, químicos, etc.). Incluso se podrían utilizar los mismos recursos con los que cuenta una unidad minera en operación (explosivos, maquinaria pesada, volquetes, personal, perforadoras, etc.).

Los datos utilizados en esta sección son referenciales. Se utilizan costos aproximados para la explotación de una pequeña cantera de caliza.

El esquema de costos para la extracción de la caliza y del desmante es como sigue:

##### Caliza:

	Costo (US \$ / Ton)
Perforación	0.16
Voladura	0.24
Carguío y Transporte	1.60
<b>TOTAL</b>	<b>2.00</b>

\$/Ton

**Desmante:**

	Costo (US \$ / Ton)	
Perforación	0.16	
Voladura	0.25	
Carguío y Transporte	1.64	
<b>TOTAL</b>	<b>2.05</b>	<b>\$/Ton</b>

## Notas:

1. Se considera que la caliza extraída no necesitará ningún proceso de tratamiento químico o de concentración, es decir su uso para la neutralización es directamente después de la explotación sin ningún tratamiento adicional.
2. Para la maquinaria y activos no se considera el costo de tenencia del equipo o de depreciación a lo largo de los años (TCO).
3. El esquema por centro de costos sigue la siguiente aproximación:

<b>Perforación</b>	8%
<b>Voladura</b>	12%
<b>Carguío y Transporte</b>	80%

4. Se consideran bancos de 10 a 15 metros de altura.
5. Se considera un mix de camiones con capacidades entre 22 a 60 toneladas métricas.
6. Se toman distancias de transporte de alrededor de 2 Km.

Con los datos obtenidos procedemos a calcular el costo total necesario para neutralizar el potencial para generar aguas ácidas de 1 tonelada de las muestras neutralizadoras contra los relaves con potencial ácido.

Muestra	Costo total por muestra para neutralizar potencial de 1 ton de relave (US \$)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
<b>M2</b>	\$ 0.42	\$ 0.28	\$ 0.27	\$ 0.27	\$ 0.37	\$ 2.74	\$ 4.86
<b>M3</b>	\$ 0.30	\$ 0.20	\$ 0.19	\$ 0.19	\$ 0.27	\$ 1.98	\$ 3.51
<b>M6</b>	\$ 2.79	\$ 1.87	\$ 1.78	\$ 1.78	\$ 2.46	\$ 18.32	\$ 32.48
<b>M7</b>	\$ 1.68	\$ 1.12	\$ 1.07	\$ 1.07	\$ 1.48	\$ 11.01	\$ 19.51
<b>TOTAL</b>	\$ 5.19	\$ 3.47	\$ 3.30	\$ 3.30	\$ 4.58	\$ 34.04	\$ 60.36

En el siguiente cuadro se resumen los costos finales necesarios por cada muestra de material neutralizante para neutralizar el potencial generador de aguas ácidas de 1 tonelada de cada muestra de material de relave (1 ton de M2 + 1 ton de M3 + 1 ton de M6 + 1 ton de M7).

**Costo total de neutralización por muestra alcalina utilizando materiales neutralizadores de la zona (US \$ / ton):**

	Total (US\$)
<b>M1'</b>	\$ 5.19
<b>M2'</b>	\$ 3.47
<b>M3'</b>	\$ 3.30
<b>M4'</b>	\$ 3.30
<b>M5'</b>	\$ 4.58
<b>M6'</b>	\$ 34.04
<b>M7'</b>	\$ 60.36
	<b>\$ 114.23</b>

#### 4.3.3. Costo Utilizando Materiales Neutralizadores Adquiridos a Proveedores Externos:

En la siguiente sección haremos el cálculo del costo total que necesitaremos para neutralizar el potencial de generación de aguas ácidas de 1 tonelada de material de relave de las muestras tratadas utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos.

Los materiales a utilizar serán cal viva ( $\text{CaO}$ ) y cal hidratada o apagada ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Para cada caso se presenta una cotización con montos de empresas reales en el mercado peruano.

Se presume que al utilizar cal o materiales alcalinos adquiridos a empresas del centro del Perú, se incurrirá en un mayor costo de neutralización debido a que se paga por costos adicionales como: el tratamiento químico que recibe la cal o caliza (calcinación de  $\text{CaCO}_3$  para obtener  $\text{CaO}$  o hidratación para obtener la cal hidratada), el transporte desde el local de venta hasta el punto de aplicación, los márgenes de ganancia de los proveedores, etc.

Los montos encontrados en empresas locales fueron los siguientes:

##### **Cotización N° 1: Mantaro Cal**

- Producto: Cal Viva ( $\text{CaO}$ )
- Pureza: 90%
- Estado: Molida
- Lugar: Concepción – Junín
- Costo: 160 \$ / ton

- Flete Concepción Junín – Lima: 25 \$
- Monto Mínimo: 1 Ton
- Monto Máximo: 30 Tons

### **Cotización N° 2: Jorge Quispe Agregados**

- Producto: Cal Hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ )
- Pureza: 87%
- Estado: Molida
- Lugar: Junín
- Costo: 145 \$ / ton
- Flete Junín – Lima: 25 \$
- Monto Mínimo: 1 Ton
- Monto Máximo: 30 Tons

Como primer paso calcularemos la cantidad necesaria (Q ton) de material neutralizante (cal viva o cal hidratada) para neutralizar el potencial generador de aguas ácidas de 1 tonelada de material de relave.

**Para efectos prácticos se asume que los valores de NNP neutralizador de la cal comprada son iguales a los de los materiales neutralizadores de la zona, sólo se castiga con el factor de pureza de la cal adquirida (90% u 87%).**

**Para asimilar los dos casos, en este asumiremos que hay 7 muestras de cal hidratada y 7 de cal viva neutralizadoras.**

**Utilizando Cal Viva al 90%:**

Muestra	Material Neutralizante Necesitado para neutralizar: (t CaCO <sub>3</sub> / t relave)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
M2	0.23	0.15	0.15	0.15	0.20	1.52	2.70
M3	0.17	0.11	0.11	0.11	0.15	1.10	1.95
M6	1.55	1.04	0.99	0.99	1.37	10.18	18.04
M7	0.93	0.62	0.59	0.59	0.82	6.11	10.84

**Utilizando Cal Hidratada al 87%:**

Muestra	Material Neutralizante Necesitado para neutralizar: (t CaCO <sub>3</sub> / t relave)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
M2	0.24	0.16	0.15	0.15	0.21	1.57	2.79
M3	0.17	0.12	0.11	0.11	0.15	1.14	2.02
M6	1.60	1.07	1.02	1.02	1.41	10.53	18.66
M7	0.96	0.64	0.61	0.61	0.85	6.33	11.21

Con los datos obtenidos procedemos a calcular el costo total (US \$) necesario para neutralizar el potencial para generar aguas ácidas de 1 tonelada de los relaves con potencial ácido contra las muestras neutralizadoras.

No se considera el flete de traslado desde el punto de venta del producto hasta el lugar de la aplicación (punto de salida de aguas ácidas).

**Utilizando Cal Viva al 90%:**

Muestra	Costo total por muestra para neutralizar potencial de 1 ton de relave (US \$)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
<b>M2</b>	\$ 37.11	\$ 24.80	\$ 23.61	\$ 23.61	\$ 32.73	\$ 243.55	\$ 431.80
<b>M3</b>	\$ 26.81	\$ 17.91	\$ 17.05	\$ 17.06	\$ 23.64	\$ 175.94	\$ 311.93
<b>M6</b>	\$ 248.11	\$ 165.79	\$ 157.83	\$ 157.85	\$ 218.82	\$ 1,628.29	\$ 2,886.85
<b>M7</b>	\$ 149.08	\$ 99.61	\$ 94.83	\$ 94.84	\$ 131.48	\$ 978.35	\$ 1,734.56
<b>TOTAL</b>	\$ 461.11	\$ 308.11	\$ 293.32	\$ 293.35	\$ 406.68	\$ 3,026.13	\$ 5,365.14

**Utilizando Cal Hidratada al 87%:**

Muestra	Costo total por muestra para neutralizar potencial de 1 ton de relave (US \$)						
	M1'	M2'	M3'	M4'	M5'	M6'	M7'
<b>M2</b>	\$ 34.79	\$ 23.25	\$ 22.13	\$ 22.13	\$ 30.68	\$ 228.33	\$ 404.82
<b>M3</b>	\$ 25.13	\$ 16.79	\$ 15.99	\$ 15.99	\$ 22.17	\$ 164.94	\$ 292.43
<b>M6</b>	\$ 232.60	\$ 155.43	\$ 147.96	\$ 147.98	\$ 205.15	\$ 1,526.52	\$ 2,706.42
<b>M7</b>	\$ 139.76	\$ 93.39	\$ 88.90	\$ 88.91	\$ 123.26	\$ 917.21	\$ 1,626.15
<b>TOTAL</b>	\$ 432.29	\$ 288.86	\$ 274.98	\$ 275.02	\$ 381.26	\$ 2,837.00	\$ 5,029.82

En los siguientes cuadros se resumen los costos finales necesarios por cada muestra de material neutralizante para neutralizar el potencial generador de aguas ácidas de 1 tonelada de cada muestra de material de relave (1 ton de M2 + 1 ton de M3 + 1 ton de M6 + 1 ton de M7).

**Costo total de neutralización por muestra alcalina utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos (US \$ / ton):**

**Utilizando Cal Viva al 90%:**

	Total (US\$)
M1'	\$ 461.11
M2'	\$ 308.11
M3'	\$ 293.32
M4'	\$ 293.35
M5'	\$ 406.68
M6'	\$ 3,026.13
M7'	\$ 5,365.14
	<b>\$ 10,153.84</b>

**Utilizando Cal Hidratada al 87%:**

	Total (US\$)
M1'	\$ 432.29
M2'	\$ 288.86
M3'	\$ 274.98
M4'	\$ 275.02
M5'	\$ 381.26
M6'	\$ 2,837.00
M7'	\$ 5,029.82
	<b>\$ 9,519.22</b>

**4.3.4. Discusión de Resultados y Comentarios:**

- Como se puede apreciar, los costos de neutralización utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos son mucho más altos a comparación de los montos necesitados al extraer los insumos de las zonas aledañas a los relaves.
- Mientras que al utilizar los recursos extraídos de la zona se necesitan valores de entre 3.30 y 60.36 \$ / ton de material de relave para la neutralización total, en el caso del uso de materiales comprados se necesitan montos entre 274.98 hasta incluso 5,365.14 \$ / ton de material de relave. Tomando los extremos de costos más altos, la relación entre los dos casos planteados es de 1 / 89, prácticamente al utilizar materiales comprados los costos se elevan en casi 90 veces.

- Al utilizar cal y materiales alcalinos adquiridos a empresas del centro del Perú, se incurrirá en un mayor costo de neutralización debido a que se paga por costos adicionales como: el tratamiento químico que recibe la cal o caliza (calcinación de  $\text{CaCO}_3$  para obtener  $\text{CaO}$  o hidratación para obtener la cal hidratada), el transporte desde el local de venta hasta el punto de aplicación, los márgenes de ganancia de los proveedores, etc.
- Como era de esperarse, en todos los casos, la muestra neutralizadora que necesita de un menor costo de neutralización es la M3' con montos de neutralización que oscilan entre 3.30 a 293.32 \$ / ton de material de relave neutralizado y la muestra que necesita el mayor costo de neutralización es la M7' con montos que van desde los 60.36 hasta los 5,365.14 \$ / ton de material de relave neutralizado. Estos resultados son directamente proporcionales al potencial neutralizador de cada muestra, es decir que mientras menores sean los valores de NNP neutralizador de las muestras de material alcalino los costos de neutralización serán mucho mayores.
- Según la partida de costos comunes el costo total del muestreo o estudio es de 1,533.60 USD, lo que nos da un valor de 219.09 \$ / muestra analizada (7 muestras en total).
- Los costos y pruebas adicionales que se realizaron en el presente proyecto como: análisis estático ABA, difracción de rayos X, microscopía petrográfica, análisis químico y otras herramientas de caracterización mineralógica como la microscopía electrónica que se hicieron a comparación de las pruebas estándares que se hacían para medir el nivel de potencial ácido de un material de relave, se justifican con una data y resultados de mayor confiabilidad y certeza.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES

#### 5.1. Conclusiones:

- Luego de analizar la situación ambiental y actual del Perú se puede apreciar que la problemática del DAM está muy presente en la realidad de la minería peruana, ya sea en los pasivos ambientales que dejó la minería antigua así como en la minería moderna por su moderado uso de agua y su alta tasa de desecho de residuos contaminantes, que son correctamente tratados bajo el esquema de una nueva y mejorada regulación ambiental, por lo que resulta muy necesario el contar con un método preciso y confiable de predicción de generación de aguas ácidas.
- Los minerales más comunes, **en las muestras tomadas** de las minas del centro del Perú, generadoras de drenaje ácido son: la pirita (sulfuro de hierro,  $\text{FeS}_2$ ), calcopirita (sulfuro de cobre y hierro,  $\text{CuFeS}_2$ ), pirrotita (sulfuro de hierro,  $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$ ), galena (sulfuro de plomo,  $\text{PbS}$ ), esfalerita (sulfuro de zinc,  $\text{ZnS}$ ) y la tetraedrita (sulfoantimoniuro de cobre, hierro, plata y zinc;  $(\text{Cu}, \text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$ ). Los principales minerales neutralizantes para la generación de agua ácida son la calcita (carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ ), dolomita (carbonato de calcio y magnesio,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), siderita (carbonato de hierro,  $\text{FeCO}_3$ ) y la ankerita (carbonato de hierro y magnesio,  $\text{CaFe}^{2+}(\text{CO}_3)_2$ ).
- En la zona geológica de estudio, los elementos químicos con mayores probabilidades de contaminación ambiental son: hierro, arsénico, plomo, cobre, cadmio y eventualmente el manganeso.

- Se evaluó, mediante diversos estudios, cuatro muestras de zonas representativas de la zona minera del centro del Perú, encontrándose que dos de ellas presentaban un alto potencial generador de ácido (M3 y M7) por su predominancia de especies sulfuradas y las otras dos (M4 y M5) con minerales generadores de ácido, pero que sus constituyentes minerales eran capaces de neutralizar la generación ácida por su predominante presencia de especies básicas.
- En el caso particular de la muestra M1, la cual no forma parte del grupo de muestras especialmente seleccionadas, el valor de PNN es de  $-9.10 \text{ kg-CaCO}_3/\text{t}$ , este se encuentra dentro del rango de incertidumbre de la predicción de generación de drenaje ácido ( $-20 < \text{PNN} < +20$ ) lo cual hace incierta la predicción para esta muestra en particular. Este caso sólo se da en una de las muestras totales / seleccionadas (M1).
- Se encuentran, según los análisis realizados, diversos silicatos contenidos en las muestras; estas especies neutras están presentes, en diversa magnitud, en las muestras de relave analizadas. Semejante respuesta a la de estos silicatos encontramos con el cuarzo, mineral inerte a la formación de ácido, es también inerte a efectos de neutralización, se encuentra presente en importantes cantidades en todas las muestras analizadas seleccionadas (M3, M4, M5 y M7).
- El uso de diversas técnicas de análisis químico y mineralógico (análisis químico ICP, difracción de rayos X, microscopía petrográfica, etc.), en adición a los análisis ácido base han aumentado la confiabilidad y precisión de los resultados, por lo cual se puede concluir que el uso de estos estudios para los análisis de predicción de generación de drenaje ácido es muy recomendable.
- El estudio de la mineralogía de yacimientos minerales con el uso de las técnicas y herramientas de caracterización mineralógica, podría integrar otros métodos como la microscopía electrónica para con ello hacer más eficiente un estudio predictivo de generación de ácido. Además el concepto de geometalurgia, que integra a la

ciencia de la geología y la ingeniería metalúrgica, puede ser aplicado de modo efectivo a los estudios predictivos de generación ácida.

- Como era de esperarse, al utilizar la muestra M3', de los elementos neutralizantes, la cual era la que tenía un potencial mayor de neutralización ( $PNN = 797.5$ ), las cantidades requeridas de este material para neutralizar el potencial de generar aguas ácidas de una tonelada de relave de las muestras generadoras de ácido será menor (los valores oscilan entre 0.10 y 0.89 t  $\text{CaCO}_3$  / t relave). De igual forma la muestra M7', con un potencial de neutralización mínimo ( $PNN = 43.6$ ) necesitará una mayor cantidad de este para obtener el mismo efecto neutralizador sobre los mismos relaves (los valores necesitados oscilan entre 1.75 a 16.24 t  $\text{CaCO}_3$  / t relave).
- En todos los casos, la muestra neutralizadora con la que se necesita de un menor costo de neutralización es la M3' con montos de neutralización que oscilan entre 3.30 a 293.32 \$ / ton de material de relave neutralizado y la muestra con la que se necesita el mayor costo de neutralización es la M7' con montos que van desde los 60.36 hasta los 5,365.14 \$ / ton de material de relave neutralizado. Se concluye que estos resultados son directamente proporcionales al potencial neutralizador de cada muestra, es decir que mientras menores sean los valores de NNP neutralizador de las muestras de material alcalino los costos de neutralización serán mucho mayores.
- Los costos de neutralización utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos son mucho más altos a comparación de los montos necesitados al extraer los insumos de las zonas aledañas a los relaves. Mientras que al utilizar los recursos extraídos de la zona se necesitan valores de entre 3.30 y 60.36 \$ / ton de material de relave para la neutralización total, en el caso del uso de materiales comprados se necesitan montos entre 274.98 hasta incluso 5,365.14 \$ / ton de material de relave. Tomando los extremos de costos más altos, la relación entre los dos casos planteados es de 1 / 89, prácticamente al utilizar

materiales comprados los costos se elevan en casi 90 veces, por lo que podemos concluir que la neutralización utilizando materiales alcalinos de puntos cercanos a la zona de relaves y extraídos con recursos propios es mucho más económica y rentable.

- La diferencia en costos entre el método tradicional de predicción ácida, en donde sólo se medía el potencial generador a través de ensayos estáticos ABA y eventualmente con análisis químicos, a comparación del método propuesto en este trabajo de tesis, adicionando pruebas que incorporan mayor confiabilidad a la proyección, es de 89.76 \$ / muestra analizada, costo que es completamente justificable dando los grados de certeza demostrados de los resultados. Se concluye que la adición de los estudios a la predicción de generación ácida de los relaves es viable y rentable por la relación costo / beneficio.



## BIBLIOGRAFÍA

- Aduvire, O. (2006), Drenaje Ácido de Mina, Generación y Tratamiento, Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- Ecoamérica, Minería y Medio Ambiente (2007), Drenaje Ácido de Mina.
- República del Perú, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (2006), Guía Para la Elaboración de Planes de Cierre de Minas.
- República del Perú, Ministerio de Energía y Minas (2006), Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas.
- Villachica, C. (2004), Proceso NCD, Caso Exitoso de Transferencia de Tecnología Limpia Para el Tratamiento de Efluentes Ácidos de Mina.
- Mills, C. (2001), Acid Base Accounting (ABA) Test Procedures.
- Zegarra, L. (2007), Pontificia Universidade Católica Do Rio de Janeiro, Predição do Potencial de Drenagem Ácida de Minas Utilizando o Método Cinético da Coluna de Lixiviação.
- Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Metalurgia (2001), 2<sup>do</sup> Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería – Trabajos Técnicos.

- Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulos de Ingeniería Geológica, de Minas y Metalurgia (2003), 3<sup>er</sup> Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería – Trabajos Técnicos.
- Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Ingeniería Metalúrgica (2005), 4<sup>to</sup> Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería, Simposio Nacional de Seguridad Minera y Desarrollo Sostenible – Trabajos Técnicos.
- Colegio de Ingenieros del Perú, Capítulo de Ingeniería Metalúrgica (2007), 5<sup>to</sup> Congreso Internacional de Medio Ambiente en Minería, Simposio Nacional de Seguridad Minera y Desarrollo Sostenible – Trabajos Técnicos.
- Aduvire, O., Baretino, D., Llopis, L., Aduvire, H. (2002), Prevención de la Formación y Tratamiento por métodos Pasivos de Aguas Ácidas de Minas y Escombreras.
- López – Pamo, E., Aduvire, O., Baretino, D. (2002), Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Journal of Earth and Environmental Sciences.
- Kleinman, R. (2001), the acid drainage technology initiative manual on prediction water quality at surface coal mines. The national energy technology laboratory. U.S. Department of Energy.
- Aduvire, O., Baretino, D., Aduvire H. (2003), Caracterización de ríos contaminados por aguas ácidas de mina y posibilidades de su remediación mediante métodos pasivos.

- Aduvire, O. (2004), Caracterización de drenajes ácidos de mina en la faja pirítica ibérica. V Congreso Nacional de Minería, Huancayo Perú.
- Aduvire, O., Aduvire, H., Mazadiego, L. (2005), Biogeoquímica y fases mineralógicas en drenajes ácidos de mina.
- Rodríguez, R., Estupiñán, M., Iglesias, M., Castillo, E. (2007), Evaluación del riesgo ambiental de los pasivos ambientales de la cuenca alta del Río Santa en el departamento de Ancash, Perú.
- Alza, A. (2007), Uso de Geomallas Bioaxiales para cobertura de relaves en la zona minera de Morococha.
- Aduvire, O., Aduvire, H. (2007), Dimensionado de sistemas de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina.

