

660.2  
V17

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA**



**“TRATAMIENTO Y CONTROL DEL DRENAJE ACIDO EN  
UNA MINA AURIFERA (ZONA-CAJAMARCA)”**

**TESIS**

**PARA LA OBTENCION DEL TITULO PROFESIONAL DE**

**INGENIERO QUIMICO**

**PRESENTADO POR**

**JUANA VALENCIA ARACAYO**

**ASESOR**

**ING. JULIO CESAR CALDERÓN CRUZ**

**CALLAO – PERU**

**2006**

La presente Tesis fue Sustentada ante el **JURADO DE SUSTENTACION** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios :

|                                |   |            |
|--------------------------------|---|------------|
| ING° LUIS CARRASCO VENEGAS     | : | PRESIDENTE |
| ING° ALBERTINA DIAZ GUTIERREZ  | : | SECRETARIA |
| ING° POLICARPO SUERO IQUIAPAZA | : | VOCAL      |
| ING° JULIO CALDERON CRUZ       | : | ASESOR     |

Según figura en el Libro de Actas N° 02, Folio N° 17 asentado en el Acta N° 200 de fecha **ONCE DE AGOSTO DE 2006**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de **Titulación con Sustentación de Tesis**, de acuerdo a lo normado por el Reglamento de Grados y Títulos aprobado por **Resolución N° 047- 92-CU de fecha 18 de Junio de 1992**.

Dedico el presente trabajo con mucho amor y respeto a mis padres Luis y Flora, por su confianza y sus sabios consejos recibidos en cada etapa de mi vida.

Y porque siempre me Inculcaron a seguir y alcanzar mis sueños con tenacidad, perseverancia y lucha constante en cada reto emprendido.

A mis hermanos queridos Elva Rosa, Luis Alberto, Luis Francisco, Elizabeth, Gloria y Victoria por su confianza, y apoyo incondicional que me brindaron en mi formación profesional.

A mis amigas de la etapa universitaria hasta la fecha; María, Silvia, Virginia, Catherine y Marlene por compartir; experiencias, aventuras, sueños y los mejores años de mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A Dios por darme la oportunidad de gozar de buena salud y tener a mi lado a las personas que más amo “mis padres y hermanos”.
- A mis padres, por su amor, confianza, comprensión y apoyo incondicional en guiarme siempre por el buen sendero de la vida.
- A mis hermanos queridos Elva Rosa, Luis Alberto, Luis Francisco, Elizabeth, Gloria y Victoria por su confianza, y el apoyo incondicional que me brindaron en cada reto de mi vida.
- A mi asesor, el Ing. Julio Cesar Calderón Cruz, por su amistad y apoyo en la realización de la presente tesis.
- A mis amigos, Dr. Julio Delgado, Ing. Alfredo Aragón, Ing. Miguel Arámbulo, Ing. Juver Vélez, Wimpper Arteaga, Ing. Mónica Vera, Eva Gonzáles y Carmen Yance por su apoyo desinteresado y sus sabios consejos.
- A mis amigas y compañeras de la etapa universitaria hasta la fecha María, Silvia, Virginia, Catherine y Marlene. En especial a mi amiga María por compartir nuestros sueños, ideales iniciativa y tenacidad, por hacer que el sueño de la excelencia se convierta en realidad y llegar a lo más altos.
- Y a todos aquellos que de una u otra manera me brindaron su apoyo desinteresado y creyeron en mi persona para la realización de la presente tesis.

# INDICE

## RESUMEN

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>I.</b>   | <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>II.</b>  | <b>OBJETIVOS</b> .....  | <b>3</b>  |
| <b>III.</b> | <b>LEYES Y NORMAS DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL</b>                     |           |
|             | 3.1 Principio del desarrollo sostenible.....                        | 4         |
|             | 3.2 Base legal .....  | 6         |
| <b>IV.</b>  | <b>GENERALIDADES DEL DRENAJE ACIDO DE MINA</b>                      |           |
|             | 4.1 Descripción del drenaje ácido .....                             | 8         |
|             | 4.2 Etapas en el desarrollo y generación del drenaje ácido .....    | 10        |
|             | 4.2.1 Etapa I .....   | 10        |
|             | 4.2.2 Etapa II.....   | 11        |
|             | 4.2.3 Etapa III.....  | 12        |
|             | 4.3 Reacciones químicas involucradas .....                          | 13        |
|             | 4.3.1 Velocidad de reacción.....                                    | 15        |
|             | 4.3.2 Oxidación Catalizada por Bacterias .....                      | 15        |
|             | 4.4 Impactos y efectos del drenaje ácido en el medio ambiente ..... | 16        |
|             | 4.5 Fuentes de generación del drenaje ácido .....                   | 17        |
|             | 4.5.1 Desmonte.....   | 17        |
|             | 4.5.2 Relaves.....  | 18        |
|             | 4.5.3 Minas Subterráneas.....                                       | 18        |
|             | 4.5.4 Mina a Tajo Abierto.....                                      | 18        |
| <b>V.</b>   | <b>GENERALIDADES DE LOS MÉTODOS DE TRATAMIENTO</b>                  |           |
|             | <b>5.1 PROCESOS QUIMICOS: TRATAMIENTO ACTIVO</b> .....              | <b>19</b> |
|             | 5.1.1 Neutralización.....   | 19        |
|             | 5.1.2 Coagulación-Floculación .....                                 | 20        |
|             | 5.1.2.1 Coagulación .....   | 21        |
|             | 5.1.2.3 Floculación.....  | 22        |
|             | 5.1.2.2 Influencia de Mezcla Rápida .....                           | 22        |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.1.3 Oxidación .....  | 23        |
| 5.1.4 Reducción .....  | 24        |
| 5.1.5 Aereación .....  | 24        |
| <b>5.2 PROCESOS BIOLÓGICOS .....</b>   | <b>25</b> |
| 5.2.1 Sistemas Wetland .....   | 27        |
| 5.2.1.1 Lagunas o ciénagas aeróbicas .....   | 28        |
| 5.2.1.2 Lagunas o ciénagas anaeróbicas .....   | 28        |
| <b>VI. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS PUNTOS CRÍTICOS DEL DRENAJE ACIDO, CASO CIA MINERA SAN ANTONIO S.A. ....</b> | <b>29</b> |
| 6.1 Identificación de los Puntos Críticos.....   | 29        |
| <b>VII. METODOLOGIA EMPLEADA A NIVEL DE LABORATORIO</b>  |           |
| <b>7.1 METODOS DE NEUTRALIZACIÓN .....</b>   | <b>35</b> |
| 7.1.1 Neutralización con Lechada de Cal .....  | 35        |
| 7.1.2 Neutralización con Soda Cáustica.....  | 37        |
| 7.1.3 proceso de coagulación - floculación .....   | 38        |
| <b>VIII. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE NEUTRALIZACIÓN</b>  |           |
| 8.1 Neutralización: lechada de cal preparada con agua potable.....   | 40        |
| 8.2 Neutralización: lechada de cal preparada con agua de mina.....   | 44        |
| <b>IX. CONTROL DEL DRENAJE ACIDO .....</b>   | <b>50</b> |
| <b>9.1 CONTROL PRIMARIO: CONTROL DEL PROCESO DE GENERACION .....</b>   | <b>51</b> |
| 9.1.1 Eliminación de sulfuros .....  | 52        |
| 9.1.2 Microencapsulado o envoltura de la pirita.....   | 54        |
| 9.1.3 Recubrimiento y sellado. ....  | 54        |
| 9.1.4 Depósitos subacuáticos: Cubiertas de agua y descarga subacuática.....                                    | 57        |
| 9.1.5 Mezclas de Aditivos Básicos .....  | 57        |
| 9.1.6 Inhibición de las bacterias.....   | 58        |

|   |    |
|---|----|
| <b>9.2 CONTROL SECUNDARIO: CONTROL DE MIGRACIÓN DE<br/>CONTAMINANTES</b> .....                    | 59 |
| 9.2.1 Desviación del agua superficial.....  | 59 |
| 9.2.2 Interceptación del agua subterránea.....  | 60 |
| 9.2.3 Control de la infiltración.....   | 60 |
| <br>  |    |
| <b>X. METODO EMPLEADO EN LA INVESTIGACION PARA EL<br/>CONTROL DEL DRENAJE ACIDO DE MINA</b> ..... | 63 |
| 10.1 Inhibición de bacterias .....  | 63 |
| 10.2 Pruebas por inhibición de bacterias.....   | 63 |
| <br>  |    |
| <b>XI. METODO DE NEUTRALIZACIÓN PROPUESTO</b> .....   | 65 |
| 11.1 Pre Tratamiento para reducir el contenido de $Fe^{3+}$ .....                                 | 65 |
| 11.2 Tratamiento por neutralización con lechada de cal .....                                      | 67 |
| <br>  |    |
| <b>XII. ANALISIS DE LOS METODOS EMPLEADOS EN LA<br/>INVESTIGACION</b> .....                       | 70 |
| 12.1. Análisis de los Resultados del Método por Neutralización con<br>Lechada de Cal.....         | 72 |
| 12.1.1. Análisis de la Alternativa I.....   | 72 |
| Lechada de cal (25%) preparado con agua potable   |    |
| 12.1.2. Análisis de la Alternativa II.....  | 72 |
| Lechada de cal (25%) preparado con agua de mina   |    |
| 12.1.3. Evaluando las Alternativas I y II.....  | 73 |
| 12.2. Análisis de los Resultados por el Método de Inhibición de<br>Bacterias .....                | 75 |
| 12.3. Análisis de los Resultados del Método de Neutralización<br>Propuesto.....                   | 76 |
| <br>  |    |
| <b>XIII. RECOMENDACIONES</b> .....  | 79 |
| <br>  |    |
| <b>XIV. CONCLUSIONES</b> .....  | 80 |

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| <b>XV. BIBLIOGRAFÍA.....</b> | <b>83</b> |
|------------------------------|-----------|

|                           |           |
|---------------------------|-----------|
| <b>XVI. APÉNDICE.....</b> | <b>85</b> |
|---------------------------|-----------|

- 1) PRUEBAS EXPERIMENTALES DE NEUTRALIZACIÓN
- 2) PRUEBAS DEL CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO POR INHIBICIÓN DE BACTERIAS
- 3) PRUEBAS EXPERIMENTALES DE NEUTRALIZACION
- 4) ESPECIFICACIONES DEL TANQUE DE AGITACION

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| <b>XVII. ANEXOS .....</b> | <b>128</b> |
|---------------------------|------------|

**BASE LEGAL.**

- 1) NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS EN OPERACIÓN.
- 2) VALORES MAXIMOS DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERAS QUE REINICIAN OPERACIONES.
- 3) FICHA DE IDENTIFICACION PUNTO DE CONTROL.
- 4) FRECUENCIA DE MUESTREO Y PRESENTACION DE REPORTE.
- 5) FRECUENCIA DE ANALISIS QUIMICO.
- 6) RESULTADOS ANALITICOS.
- 7) GESTION AMBIENTAL EN ACTIVIDADES MINERAS.
- 8) ESBOZO DE UN PLAN DE CIERRE.
- 9) DETERMINACION DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACION

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudia las características del drenaje ácido de la Cia Minera San Antonio S.A. con el fin de encontrar las condiciones óptimas para el tratamiento y control del efluente. La generación de aguas ácidas es resultado de la interrelación de varias reacciones químicas de oxidación e hidrólisis de compuestos sulfurosos. Los componentes principales que intervienen en este proceso son, los sulfuros metálicos, como mineral reactivo, el agua o la humedad atmosférica y el oxígeno.

El método de neutralización propuesto, se realiza por dos mecanismos: inhibición de las bacterias y neutralización con lechada de cal, lográndose los parámetros óptimos para el tratamiento del efluente, cumpliendo con los estándares ambientales para la descarga (límites máximos permisibles).

El control del drenaje ácido se consigue mediante la exclusión de la actividad bacteriana; El Lauril Sulfato de Sodio es el bactericida del *Acidithiobacillus ferroxidans*. El bactericida inhibe selectivamente al agente causante.

Para alcanzar los estándares de calidad de agua, se requiere una inversión que en muchos casos, sin recuperación pero sí de mucho valor en lo que respecta a la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible; tal es así que hoy en día es una obligación cumplir con la normatividad vigente para la descarga al medio ambiente.

## I. INTRODUCCION

El presente trabajo facilitará el control y tratamiento del drenaje ácido, reduciendo los costos de reactivos, optimizando el tratamiento de las aguas ácidas y reduciendo los efectos e impactos al medio ambiente.

La industria minera opera en un clima empresarial altamente dinámico donde debe respetar el ambiente físico como social. El mayor problema que tiene esta actividad es la generación de drenajes ácidos, debido a la compleja mineralización polimetálica que presentan los yacimientos en la que destaca una serie de sulfuros metálicos, como pirita, marcasita, arsenopirita, pirrotita, calcopirita, etc. los cuales expuestos al aire son oxidados produciendo las aguas ácidas.

El problema de generación del drenaje ácido puede durar muchos años y generar otros problemas secundarios, por esta razón surge la necesidad de aplicar y buscar nuevos métodos efectivos a corto y largo plazo para el tratamiento y control del drenaje producido, con la finalidad de cumplir con los estándares ambientales. Muchos asientos mineros tratan el drenaje ácido de manera artesanal, la dosificación de los reactivos no son los adecuados, porque no consideran parámetros importantes, y solo cuidan el aspecto (el color del las aguas) pero no la calidad del agua durante la descarga al cuerpo receptor.

Este proceso no es exclusivo de las minas activas, sino que persiste en el tiempo y puede llegar a ser incluso más grave en minas clausuradas, tanto de cielo abierto como de interior, donde ya se ha abandonado cualquier medida de control.

## **II.- OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION DE LA TESIS**

### **2.1 Objetivo General**

Optimizar el tratamiento y control del drenaje ácido de una mina aurífera desde el punto de vista técnico y económico para su disposición al ambiente, a fin de cumplir con los niveles permitidos por la autoridad ambiental.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- a) Hacer un diagnóstico e identificar los puntos críticos de generación del drenaje ácido.
- b) Estudiar los métodos para el tratamiento del drenaje ácido.
- c) Seleccionar y evaluar el método de tratamiento del drenaje ácido, más efectivo desde el punto de vista técnico y económico.

### III. LEYES Y NORMAS DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL

#### 3.1 Principio de Desarrollo Sostenible <sup>(1)</sup>

"El desarrollo sostenible, es cubrir las necesidades actuales sin destruir la posibilidad de futuras generaciones de satisfacer sus necesidades".

En el caso de la utilización sostenible de recursos naturales hay tres prioridades:

- 1.- Mantener los procesos ecológicos esenciales.
- 2.- Preservación de la diversidad genética.
- 3.- Utilización sostenible de especies y ecosistemas.

Las Naciones Unidas desde el año 1972 comienza a convocar distintas Conferencias Internacionales, la primera de ellas se llevó a cabo en Estocolmo, donde se consagra el principio:

"El hombre tiene el derecho fundamental a la libertad, a la igualdad y a condiciones adecuadas de vida en un medio ambiente de una calidad tal que permita una vida de dignidad y bienestar".

Hoy en día, se ha tomado conciencia que el desarrollo de los pueblos no puede llevarse a cabo a costa del medioambiente, el crecimiento económico debe ser equilibrado con el medio donde se desarrolla, por que la tierra donde se produce esa actividad económica es finita, se acaba y se deteriora, de allí la necesidad de conservar el medio en el que vivimos y la consecuente utilización racional de los recursos que de ella se derivan, se considera a los

---

*1 Esta definición fue empleada por primera vez en 1987 en la Comisión Mundial del Medio Ambiente de la ONU, en el Reporte "Nuestro Futuro Común".*

recursos naturales, no sólo, como suministradores de materia prima, sino como patrimonio de todos, como riqueza que en sí misma debe ser preservada, este nuevo enfoque del desarrollo, es conocido con el nombre de desarrollo sustentable.

El concepto surge en el año 1987, cuando la Comisión mundial del medio ambiente y del desarrollo, publica el Informe Brundtland o también conocido como Nuestro futuro común, en este informe se habla por primera vez del desarrollo sustentable. El término original es Sustainable Development, o "desarrollo perdurable" que por una mala traducción al español se conoce como "desarrollo sostenible".

La consagración de esta perspectiva sobre el desarrollo de las naciones, tuvo lugar en La Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, llevado a cabo en Río de Janeiro en el año 1992, es allí donde se sientan las bases de una verdadera integración, entre medioambiente y el desarrollo de los pueblos.

Los principios sobre la protección del medioambiente se han ido incorporando paulatinamente. En el Perú ha adquirido rango constitucional, Sin embargo, y a pesar de las leyes y la conciencia ambiental, que se observa a nivel nacional, los desastres ambientales se siguen produciendo; durante las dos últimas décadas, ha ocasionado varios desastres de importantes dimensiones en distintos lugares del país.

Estos accidentes van poniendo en evidencia la necesidad de mejorar las medidas de seguridad y de prevención de las explotaciones mineras, a través de una adecuada legislación y eficientes organismos de contralor.

### 3.2 BASE LEGAL

Las tendencias actuales del mundo se reducen a tres aspectos fundamentales: la globalización de la economía, la revolución de las comunicaciones y la conservación del medio ambiente. En nuestro país la actividad minero-metalúrgica es uno de los primeros sectores en materia de mejoramiento ambiental de procesos, mitigación de daños al entorno, control de efectos negativos y protección de la naturaleza; pero, en muchos casos es responsable de la contaminación que atenta nuestra salud, depreda los recursos irracionalmente y ensucia el entorno. Es allí donde entra en acción la Legislación Ambiental en este sector.

La normativa ambiental establece la protección y conservación de los recursos naturales y su explotación de manera sostenible, en el caso de minería, indica que la unidad minera deberá contar con instalaciones apropiadas para el tratamiento y los efluentes que se pudieran generar durante su explotación (DAM). Según la base legal Decreto Supremo No. 016-93-EM, Reglamento sobre Protección del Medio Ambiente en las actividades minero – metalúrgicas; Artículo 31o. al Artículo 36o., Artículo 39o. (*Pub. 28.04.93*).

La normatividad ambiental vigente, enfatiza:

- ▶ Evaluación de la contaminación ambiental; estudio de las alternativas de prevención, remediación y mitigación de la contaminación.
- ▶ cumplimiento de los límites máximos permisibles para la descarga de efluentes.
- ▶ Prevención remediación de aguas contaminadas, ejecución de monitoreo ambiental para identificación de contaminantes.
- ▶ Formación de recursos humanos para controlar la contaminación de aguas.
- ▶ Auditorías ambientales para la identificación de áreas contaminadas.

### 3.2.1 NORMATIVIDAD GENERAL A NIVEL NACIONAL

1. Constitución Política del Perú - Título III, Capítulo II: Del Ambiente y los Recursos Naturales.
2. Ley General del Ambiente (Ley N° 28611)
3. Ley del Consejo Nacional del Ambiente (CONAM Ley N° 26410).
4. Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental (Ley N° 27446)
5. Ley General de Aguas (Ley N° 17752).
6. Ley General de Salud (Ley N° 26842).
7. Ley de Protección Ambiental Minera (Ley N° 24585).

La reciente Ley de Protección Ambiental Minera, N° 24.585, y los decretos y leyes por las que las provincias se adhieren a la citada ley, delimitan el ámbito y la autoridad de aplicación, establecen los instrumentos de gestión ambiental a presentar por las empresas y las normas de protección y conservación ambiental.

La elaboración de los instrumentos de gestión ambiental, el Informe de Impacto Ambiental y la Declaración de Impacto Ambiental, el monitoreo de efluentes realizado por las empresas, los estudios destinados al desarrollo de tecnologías menos contaminantes y de procesos para el tratamiento de efluentes, requerirán servicios analíticos especializados a ejecutar dentro de un marco de aseguramiento de calidad.

## IV. GENERALIDADES DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)

En condiciones naturales, el efecto que tiene este proceso sobre la calidad del agua no suele ser significativo, ya que la capa del suelo minimiza el contacto de los minerales reactivos con el oxígeno, ralentizando la reacción de oxidación y restringiendo los focos de generación de agua ácida a los afloramientos rocosos. De manera que los volúmenes generados no suelen ser excesivamente cuantiosos y su composición química tampoco llega a ser extrema, dentro de que el pH es ácido y el contenido en metales y sulfatos más elevado de lo normal.

En cambio, los grandes movimientos de tierras, como los que se realizan en minería, dejan expuestas a la acción del aire y del agua enormes volúmenes de rocas, originalmente situadas en el subsuelo, donde están protegidas de estos agentes, con lo que se propicia el desencadenamiento de la reacción de oxidación, y pueden llegar a generarse grandes volúmenes de aguas ácidas. Si estas aguas llegan a los cauces y suelos naturales pueden ocasionar impactos muy severos sobre el medio ambiente.

### 4.1 Descripción del drenaje ácido de mina

El drenaje ácido es el escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas, frecuentemente con un contenido significativo de metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.), resultado de la oxidación química y biológica de minerales sulfurados ( $\text{FeS}_2$ ,  $\text{PbS}_2$ , etc.) y de la lixiviación de metales pesados asociados. Las reacciones de oxidación ocurren en forma natural, y se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno, al agua y por la acción catalizadora de bacterias (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, etc.). Las soluciones de drenaje ácido presentan un color café rojizo atribuido al ión Fe (III); sin embargo, también puede aparecer un color azul verdoso en el caso de que el hierro disuelto se encuentre en estado Fe (II), el cual tenderá a oscurecerse por oxidación a Fe (III), a medida que esté expuesto al oxígeno del aire.

Figura 1 Las soluciones de drenaje ácido presentan un color  
Café rojizo atribuido al ión  $\text{Fe}^{3+}$



Figura 2 Forma Natural de la Pirita



El drenaje ácido se caracteriza por presentar:

- valores de pH por debajo de 5 hasta 1,5 ;
- Alcalinidad decreciente y acidez creciente
- Concentraciones elevadas de sulfato
- Concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- Concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

## **4.2 Etapas en el desarrollo del drenaje ácido.**

El desarrollo del drenaje ácido es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados.

Se observa el proceso en tres etapas, definidas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurados.

### **4.2.1 Etapa I**

En esta etapa, el agua de drenaje se caracteriza generalmente por niveles elevados de sulfato, con pH cercano al neutro. El ácido producido es neutralizado mientras que el hierro férrico se precipita en forma de hidróxido. Si existen minerales de zinc asociados con los sulfuros de hierro, también podrían detectarse concentraciones elevadas de zinc en la solución.

#### **4.2.1.1 Mecanismos**

- ▶ Los minerales sulfurados, principalmente pirita ( $\text{FeS}_2$ ), son oxidados químicamente por el oxígeno del aire, que es el oxidante principal. El producto

de esta reacción de oxidación es sulfato ( $\text{SO}_4$ )<sup>-2</sup>, hierro ferroso ( $\text{Fe}^{+2}$ ) y protones ( $\text{H}^+$ ), los cuales generan acidez.

- ▶ En el rango normal de pH de suelos y agua (pH 5-7) los metales liberados por el desgaste de minerales generalmente precipitan y están relativamente inmóviles, debido a que los minerales alcalinos como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), presentes en la matriz de la roca neutralizan la acidez y originan la oxidación y precipitación del hierro como óxido o hidróxido.
- ▶ A medida que los minerales alcalinos se consumen o encapsulan por cubiertas de precipitado, disminuirá el pH en el área en torno al sulfuro, pasando a la siguiente etapa de desarrollo del drenaje ácido.

#### **4.2.2 Etapa II**

En esta etapa, el agua de drenaje está generalmente cerca al nivel neutro, con concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato. Se observa una acidez relativamente alta, aún cuando las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

##### **4.2.2.1 Mecanismos**

- ▶ En esta etapa el pH del microambiente ha disminuido hasta 4,5; por lo que ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas y si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3,5.

- ▶ Existen concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato y pese a la acidez relativamente alta, las concentraciones de metales en la solución pueden ser bajas.

### 4.2.3 Etapa III

En esta etapa, el agua de drenaje está generalmente cerca al nivel neutro, con concentraciones elevadas de hierro ferroso y sulfato. Se observa una acidez relativamente alta, aún cuando las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

#### 4.2.3.1 Mecanismos

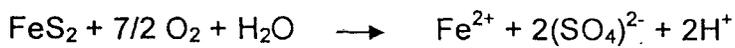
- ▶ Las reacciones de oxidación catalizadas por bacterias aumentan.
- ▶ Se produce hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ), que se oxida biológicamente a hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ), el cual se convierte en el oxidante dominante, reemplazando al oxígeno.
- ▶ El drenaje se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos ( $\text{ZnS}$ ,  $\text{PbS}$ , etc.), con mayores concentraciones de metales disueltos.
- ▶ La velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la etapa I. El aumento de las velocidades es de 10 a 1 millón de veces más.

### 4.3. Reacciones químicas involucradas

La generación de acidez es controlada por la oxidación de pirita, que es el sulfuro que se encuentra en mayores concentraciones en las vetas (Plumlee, 1999). La oxidación es un proceso muy complejo en el que intervienen factores mineralógicos y microbiológicos, ya que según las condiciones puede ser abiótica o biótica; el agente oxidante de la oxidación abiótica es el oxígeno y el de la biótica es el ion férrico en solución (Baker y Banfield, 2003). La oxidación biótica se produce a  $\text{pH} < 4$  y es realizada por comunidades bacterianas, siendo predominante la especie *Acidithiobacillus ferrooxidans* (Baker y Banfield, 2003).

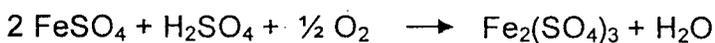
Las reacciones químicas que determinan la generación de agua ácida a partir de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), son las siguientes:

#### (1) Oxidación del sulfuro



(Sólido + gas + agua  $\longrightarrow$  Hierro ferroso + sulfato + protones)

#### (2) Oxidación del sulfato ferroso a férrico



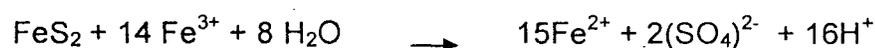
#### (3) Hidrólisis del sulfato férrico a hidróxido férrico



En el primer paso del proceso (1), el hierro ferroso, los sulfatos provocan un incremento de la concentración de sólidos disueltos totales y los protones de la acidez del agua, que produce, un descenso del pH. Si el ambiente es suficientemente oxidante, la mayoría del hierro ferroso se oxida a férrico (2). Con valores de pH de entre 2,3 y 3,5, el sulfato férrico se hidroliza y precipita como hidróxido férrico (3), con lo que el pH desciende aún más debido a la formación de ácido sulfúrico.

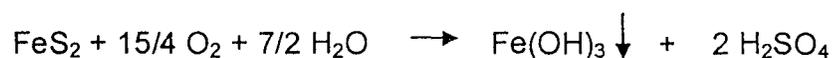
Los precipitados de hidróxido férrico son fáciles de identificar por el color que va del ocre amarillento al rojo intenso. Cuando el pH es muy ácido, gran parte del hierro férrico de la reacción (2) no se hidroliza y permanece en solución, entonces este catión actúa como agente oxidante adicional de la pirita, según la siguiente reacción (4):

(4) Oxidación adicional de la pirita por el sulfato férrico



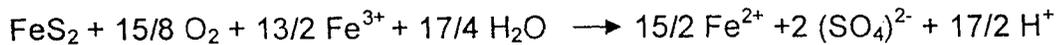
La reacción global de generación de agua ácida puede establecerse como combinación de las reacciones parciales (1), (2) y (3) de la forma que se indica en la reacción (5).

(5) Reacción global de oxidación de la pirita



En la ecuación (6) se indica la reacción global de la oxidación de la pirita cuando el hierro férrico actúa como oxidante adicional.

(6) Reacción global de oxidación de la pirita por hierro férrico



(7) Reacción global de oxidación de sulfuros metálicos por acción del hierro férrico



Todos estos sulfatos son muy solubles, excepto los de plomo, y son transportados en disolución por las aguas hasta que se produce su hidrólisis y precipitación.

#### 4.3.1 Velocidad de reacción

La velocidad de reacción es una variable muy importante en relación al impacto ocasionado por las aguas ácidas. Si el proceso de oxidación/hidrólisis ocurre lentamente, el medio natural puede incorporar los drenajes ácidos producidos sin que se produzca alteración significativa, pero la generación rápida de aguas ácidas puede tener graves consecuencias.

#### 4.3.2 Oxidación Catalizada por Bacterias

La oxidación del hierro ferroso a férrico, en condiciones normales, ocurre bastante lento. Sin embargo, hay ciertas bacterias que actúan como catalizadores y que pueden incrementar la velocidad de la reacción en factores de entre 4 y 50, lo que provoca un incremento notable de la generación de aguas ácidas.

El óptimo de su actividad se desarrolla en ambientes ácidos, mientras que la oxidación química es más rápida en ambientes neutros y alcalinos. De manera

que, una vez desencadenado el proceso, como en las distintas reacciones que lo componen se producen protones que acidifican progresivamente el ambiente, la oxidación biológica se acelera mientras que la química se ralentiza. Utilizan como fuente primaria de energía especies reducidas del azufre y ciertos metales en solución.

El *Acidithiobacillus thiooxidans* suele aparecer junto con el *Acidithiobacillus ferrooxidans* y morfológicamente es muy parecido a él. Este organismo oxida únicamente especies reducidas del azufre, y es incapaz de oxidar el hierro ferroso. Su rango de pH óptimo se sitúa entre 2 y 3,5, aunque soporta valores de pH por debajo de 1. El *Leptospirillum ferrooxidans* utiliza la pirita y el hierro ferroso como fuente primaria de energía, y cataliza su oxidación. Su rango óptimo de pH se sitúa entre 2,5 y 3.

La mayor parte de los autores coincide en señalar que el *Acidithiobacillus ferrooxidans* es el principal causante de la aceleración de la reacción. Esta bacteria está relacionada fundamentalmente con la oxidación de la pirita, aunque también puede actuar como catalizadora de la oxidación de sulfuros de antimonio, molibdeno, galio, arsénico, cobre, cadmio, cobalto, níquel, plomo y cinc (Novecol Environmental Consultants, 1989).

#### **4.4 Impactos y efectos del drenaje ácido en el medio ambiente**

Los posibles impactos y efectos sobre el medio ambiente pueden ser los siguientes:

- Afectar ecosistemas acuáticos, como resultado de la acidez y metales
- Inhibir el crecimiento de comunidades vegetales aledañas a los canales de drenaje, debido a que la acumulación de hierro y de sulfuros en la superficie

de los suelos dificulta la penetración de las raíces. También, el ácido sulfúrico afecta la tasa de crecimiento de las plantas.

- Afectar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas (acuíferos poco profundos), lo cual podría afectar a la comunidad por limitar o impedir utilizar las aguas para algunos usos como riego o recreación.

#### **4.5 Fuentes de generación del drenaje ácido**

Los minerales sulfurosos están en todas partes en el ambiente geológico, pero se encuentran principalmente en rocas que yacen debajo de una capa de suelo y, a menudo, debajo de la napa freática. Bajo condiciones naturales, el suelo que cubre la roca y el agua subterránea minimiza el contacto con el oxígeno, permitiendo así que la generación de ácido prosiga a una velocidad tan baja que el efecto sobre la calidad general del agua será insignificante o indetectable. La exposición de roca sulfurosa reactiva al aire y al agua, como resultado de actividades tales como la construcción de carreteras o explotación minera, puede acelerar la velocidad de generación de ácido y ocasionar un impacto en el ambiente.

##### **4.5.1 Desmonte**

Estos botaderos de desmonte son, generalmente, mezclas de material proveniente de diferentes áreas de explotación o desarrollo minero. Los botaderos, por lo común, están constituidos por rocas gruesas y se almacenan sobre la napa freática. De este modo, cualquier mineral sulfuroso reactivo queda expuesto al aire y al agua que pasan por el botadero, inmediatamente después de haber sido depositado allí. Las reacciones de generación de ácido pueden iniciarse en cualquier lugar del botadero, y generalmente se producen en varios sitios.

#### **4.5.2 Relaves**

En los relaves, el aire ingresa desde la superficie a través de los vacíos de los poros y resquebrajaduras, a una velocidad limitada por la forma en que el aire se difunde a través de estos materiales. Después que ha concluido la acumulación y los relaves empiezan a drenar; los sulfuros se exponen al oxígeno, en ese momento comienza la oxidación. Dado que las reacciones de oxidación requieren tanto de oxígeno como de agua, la generación de ácido por lo general comienza en la superficie y en los lados de la represa, que son los primeros en drenar.

Así, la oxidación se inicia en la superficie de la represa y progresa en profundidad, a medida que los relaves drenan y la napa freática se mueve hacia el fondo del depósito.

#### **4.5.3 Minas Subterráneas**

Cuando el drenaje ácido formado en estos focos alcanza las aguas limpias superficiales o aguas subterráneas las contamina en acidez, sulfatos y metales pesados. De igual forma la infiltración del drenaje ácido puede contaminar los suelos.

#### **4.5.4 Mina a Tajo Abierto**

La mayor parte de desmonte se produce en la explotación de minas a tajo abierto. En muchos casos, las cavidades dejadas por el minado subterráneo o a tajo abierto son rellenadas con desmonte o con relave, material que debido a su contenido piritoso facilita la generación de aguas ácidas.

## V. GENERALIDADES DE LOS METODOS DE TRATAMIENTOS

### 5.1 Procesos Químicos

Son aquellas que se basan en la adición de reactivos neutralizantes: carbonato cálcico, hidróxido sódico, bicarbonato sódico o hidróxido amónico. Estos reactivos llevan el pH a valores aceptables, y favorecen la precipitación de la mayor parte de los metales pesados que pueda contener el agua. Su principal problema es que suelen ser reactivos con un cierto coste, que no siempre pueden emplearse de forma extensiva, para neutralizar grandes volúmenes de DAM. En estos casos se aplican de forma local, más que nada como un depurador de las aguas residuales de lavadero.

#### 5.1.1 Neutralización

En los procesos de neutralización, se produce un cambio en el valor del pH que da como resultado la floculación de los componentes coloidales en el agua residual. Para la neutralización mediante la reacción con reactivos químicos, generalmente se consideran los siguientes materiales:

- Cal viva u óxido de calcio :  $\text{CaO}$
- Hidróxido de calcio :  $\text{Ca(OH)}_2$
- Carbonato de calcio :  $\text{CaCO}_3$
- Solución de hidróxido de sodio:  $\text{NaOH}$
- carbonato de sodio :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$
- Dolomita parcialmente calcinada:  $\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$
- Magnesita calcinada :  $\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO}$

La selección del agente neutralizante depende del tipo de ácido que se usará, de la cantidad de agua, de las condiciones locales, etc. Por lo general, se utiliza cal como agente neutralizante.

El hidrato de cal o cal apagada se comercializa en diferentes grados de calidad (pureza). Su componente principal es el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Los grados de calidad, que son muy comunes en los tratamientos de aguas, contienen diferentes cantidades de magnesio, aluminio, hierro y ácido silícico. El hidróxido de calcio puede adquirirse en forma muy pulverizada. Dado que la solubilidad de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el agua es muy baja (1.65gramos de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  / Litro a  $20^\circ\text{C}$ ), se emplea una suspensión denominada agua de cal o lechada de cal al aplicar la dosis del material en el agua. Debe agitarse constantemente en los depósitos de dosificación para evitar que la suspensión se sedimente. Las bombas centrífugas son necesarias para trasladar el agua de cal hasta el punto de dosificación.<sup>2</sup>

## **5.1.2 Coagulación – Floculación**

### **5.1.2.1 Coagulación**

El objetivo principal de la coagulación es desestabilizar las partículas coloidales que se encuentran en suspensión, para favorecer su aglomeración; en consecuencia se eliminan las materias en suspensión estables; la coagulación no solo elimina la turbiedad sino también la concentración de las materias orgánicas y los microorganismos.

---

<sup>2</sup> Manual de Disposición de Aguas Residuales: Origen, Descarga, Tratamientos y Análisis de las Aguas Residuales Tomo II, CEPIS, OPS, 1991

El proceso de coagulación transforma los pequeños partículas en grandes aglomerados con el objeto de lograr una mejor sedimentación disminuyendo el tiempo de la misma. El pH en el proceso de coagulación juega un papel importante pues permite dirigir en el sentido conveniente las reacciones químicas que favorecen la desestabilización y aglomeración de las partículas coloidales.

Es sabido que la cal puede utilizarse como coagulante cuando el tipo de solución tiene en su composición sales de fierro y sulfatos que contribuyen a que se den algunas de las siguientes reacciones:



Los hidróxidos (lechada de cal) son efectivos para aumentar la velocidad de precipitación, particularmente los sulfatos.

La coagulación es el tratamiento mas eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es igualmente el método universal porque elimina una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de peso de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

El proceso de coagulación mal realizado también puede conducir a una degradación rápida de la calidad del agua y representa gastos de operación no justificadas. Por lo tanto que se considera que la dosis del coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de decantación y que es imposible de realizar una clarificación, si la cantidad de coagulante esta mal ajustada.

### **5.1.2.2 Floculación**

En la segunda etapa de la mezcla que corresponde a una mezcla lenta tiene por objeto permitir los contactos entre los flóculos, la turbiedad y el color, la mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no mas del tiempo óptimo de floculación.

La floculación es el proceso que sigue a la coagulación, que consiste en la agitación de la masa coagulada que sirve para permitir el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de sedimentar.

La Floculación consiste en la agrupación de las partículas coloidales desestabilizadas, formando agregados de mayor tamaño denominados "flóculos", los cuales sedimentan por gravedad. Para favorecer la formación de flóculos más voluminosos y su sedimentación, se suelen utilizar determinados productos químicos (floculantes), generalmente de naturaleza polimérica.

### **5.1.2.3 Influencia de Mezcla Rápida**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa; turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes y la otra parte tenga poco o casi nada; la agitación debe ser uniforme e intensa en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante haya sido bien hecho y que se haya producido la reacción química de neutralización de cargas correspondiente.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta duración (60 seg., máx.) llamado mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad del coagulante dentro del volumen del agua a tratar, y en la segunda etapa la mezcla es lenta y tiene por objeto desarrollar los microfloculos.

La intensidad de agitación y el tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento preciso en que se dosifica el coagulante, con el objeto de que las reacciones de coagulación se den en condiciones óptimas.

La mezcla rápida se efectúa para la inyección de productos químicos dentro de la zona de fuerte turbulencia, una inadecuada mezcla rápida conlleva a un incremento de productos químicos.

Es muy importante que el coagulante sea difundido en toda la masa de agua tan rápido como sea posible para que los productos que se desarrollan en instantes de tiempos cortos produzcan desestabilización del conjunto de coloide.

### **5.1.3 Oxidación**

Los procesos de oxidación se utilizan para extraer compuestos indeseados de gran capacidad reductora. Los agentes oxidantes que mas se utilizan son el oxígeno atmosférico y el cloro. El permanganato de potasio  $\text{KMnO}_4$ , es un agente oxidante fuerte, puede producir irritación y mancha de la piel y la ropa.

Las disoluciones de permanganato son perfectamente estables si se preparan adecuadamente y se protegen de la acción del polvo, de los gases reductores (ejemplo:  $\text{SO}_2$ ) y la acción directa de la luz del sol o de otras fuentes de luz intensa. El ozono, es el agente oxidante más fuerte. En la tecnología de las aguas residuales se ha utilizado el ozono en forma limitada, pues se requieren grandes

cantidades del mismo, así como una fuerte inversión de capital. Sin embargo, la oxidación parcial posee algunas ventajas para la conversión de mezclas de sustancias difíciles de descomponer biológicamente, en sustancias que puedan biodegradarse. La oxidación del cianuro también es posible mediante el ozono.

#### **5.1.4 Reducción**

Según MEINCK/107/, la técnica de reducción es apropiada para aguas residuales que contienen compuestos nocivos fácilmente reductibles. Por ejemplo, el tóxico ácido crómico de las aguas residuales provenientes de los talleres de cromado puede reducirse con ácido sulfúrico o con sales respectivas y también con sales de hierro bivalente, pudiendo adoptar una forma que pueda ser precipitada con cal, a su vez, un exceso de agentes reductores dará como resultado un consumo correspondiente de oxígeno en el agua residual. Las aguas residuales que contienen cloro y provienen de la industria química pueden ser reducidas mediante carbón activado.

#### **5.1.5 Aereación**

La aereación es necesaria en muchos métodos de tratamiento de aguas residuales. Deberá aplicarse durante el tratamiento previo de las aguas residuales comerciales, mediante la aspersion o rociamiento, por medios mecánicos (ruedas de paletas, cepillos aereadores, impulsores), soplando aire comprimido en forma de burbujas finas, medias o gruesas, o a través de columnas de aereación, en los procesos de activación. La aereación también posee múltiples aplicaciones para remover solventes (por ejemplo en la industria farmacéutica) y otros compuestos volátiles orgánicos (por ejemplo, en la industria petroquímica).

Se entiende por aereación la mezcla del agua con el aire, que tiene por objeto modificar la concentración de las sustancias volátiles contenidas en ella e incrementar la concentración del oxígeno disuelto. La aereación tiene en realidad varios propósitos: Incrementar los niveles de oxígeno disuelto, disminuir la concentración de bióxido de carbono, de sulfuro de hidrógeno, de metano y otros gases indeseables que puedan estar presentes; adicionalmente promover y acelerar la oxidación y precipitación del hierro y manganeso y corregir las características de olor y sabor ocasionadas por la presencia en el agua de sustancias orgánicas volátiles.

En los procesos de tratamiento de aguas residuales, el propósito más importante que cumplen los sistemas de aereación es el de incrementar la concentración de oxígeno a las velocidades requeridas para garantizar que el oxígeno no limite la metabolización de la materia orgánica presente. En purificación de aguas, la principal función es la de propiciar y acelerar la oxidación del hierro y manganeso.

Los principales factores que influyen en el proceso de aereación del agua son la temperatura, la presión y la superficie de contacto. En el proceso de aereación, los sistemas más comúnmente empleados suelen ser, aereación en cascada, aereación por inyección, aereación por surtidor, y aereación por contacto.

## **5.2 Procesos Biológicos**

Este proceso natural da como resultado la eliminación de la acidez, sulfatos y metales de las aguas del drenaje ácido, las reacciones ocurren en forma natural produciendo alcalinidad, reduciendo los sulfatos y promoviendo la precipitación de los metales en solución, en forma de sulfuros metálicos.

Los procesos aeróbicos y anaeróbicos apuntan a quitar este agente contaminador pero principalmente los procesos anaerobios tales como reducción bacteriana del

sulfato muestran un mejor funcionamiento (la reducción directa del sulfato a sulfuro de hidrógeno es producida por bacterias especializadas, específicas y estrictamente anaeróbicas por los dos géneros: Desulfovibrio y Desulfotomaculum. La actividad de estas bacterias reductoras de sulfatos es importante para la producción de sulfuro de hidrógeno, precipitación de los metales y al aumento de alcalinidad. Los humedales construidos se han considerado como una de las posibles soluciones a largo plazo del drenaje ácido de la mina. Varias investigaciones han revelado los Resultados positivos con respecto al uso de humedales artificiales para tratar las aguas contaminadas por actividades mineras.

Esta tecnología permite optimizar los mismos procesos que se encuentran en humedales naturales: filtración, sedimentación, inmovilización física y química, y descomposición química y biológica. Además, los humedales construidos proporcionan a un método efectivo y de bajo costo para remover agentes contaminadores del drenaje ácido de la mina.

### **5.2.1 Sistemas Wetlands**

Los humedales construidos están siendo utilizados en muchos países alrededor del mundo mejorando la calidad del agua del drenaje ácido de mina. Los humedales construidos ofrecen varias ventajas Hammer (1989), porque son:

#### **Ventajas**

- Relativamente económicos para construir y operar.
- Fáciles de mantener.
- Eficaces y confiables para el tratamiento de aguas residuales.
- Relativamente tolerantes a los cambios en las tarifas de cargamento hidráulicas y biológicas.
- Puede proporcionar beneficios ecológicos ,

- Reconocidos como una buena alternativa de tratamiento por muchos reguladores y grupos ambientales.

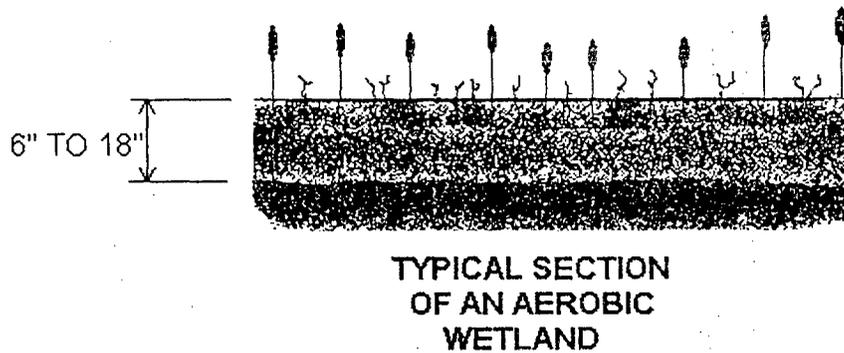
#### Desventajas

- Requisitos de área a ser usada relativamente grandes.
- Criterios de diseño y operación actual imprecisos.
- Complejidad biológica e hidrológica.
- Diferencias en funcionamiento con el cambio de las estaciones.
- Posibles problemas con olor y mosquitos.
- El rendimiento a largo plazo es desconocido ya que con el tiempo, el humedal puede convertirse en un problema que contribuya a la reducción de la tasa de remoción de contaminantes a través de tiempo.
- Cambios en equilibrio de un humedal natural debido a la presencia de nuevos metales y fuente de sulfato y posibilidad de efectos físicos relacionados.
- Fluctuaciones en el flujo y temperatura afectan el funcionamiento de humedales y pueden causar tasas inconsistentes de remoción de contaminantes. Flujos altos pueden sobrecargar el mecanismo de remoción, mientras que periodos secos pueden dañar las plantas y afectar significativamente el funcionamiento del humedal y,
- Condiciones más frías afectan la velocidad de producción, con que el humedal es capaz de retirar contaminantes, siendo este un problema serio especialmente para proyectos localizados en los Andes.

#### 5.2.1.1 Lagunas o ciénagas aeróbicas

Este sistema se utiliza para tratar aguas neutras o alcalinas. Los metales pesados precipitan como consecuencia de reacciones de oxidación, con formación de los correspondientes óxidos o hidróxidos, lo cual tiene su mayor eficiencia a pH mayor de 5.5.

Fig. 3 Lagunas o ciénagas aeróbicas

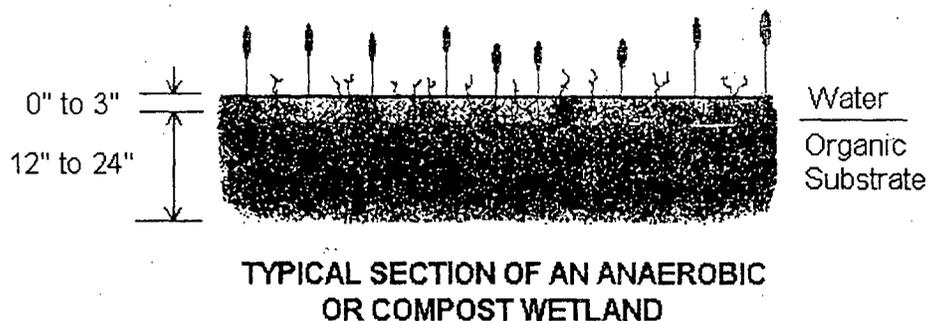


Fuente: <http://www.uclm.es/users/higuera/mam/MAM9.htm>

#### 5.2.1.2 Lagunas o ciénagas anaeróbicas

En este caso se trata de lagunas con una delgada lámina de agua sobre un sustrato rico en materia orgánica, que puede estar constituido por turba, u otros materiales orgánicos: compost usado de plantaciones de champiñones, virutas de madera, heno, etc., mezclado con un 10% de carbonato cálcico. A través de este sustrato se produce el flujo de las aguas a depurar, produciendo fundamentalmente la reducción de sulfatos, en aguas conteniendo oxígeno disuelto,  $Fe^{3+}$ ,  $Al^{3+}$ , y con acidez media o baja.

Fig.4 Lagunas o ciénagas anaeróbicas



Fuente: <http://www.uclm.es/users/higuera/mam/MAM9.htm>

## **VI. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LOS PUNTOS CRITICOS DEL DRENAJE ACIDO, CASO CIA MINERA SAN ANTONIO S.A.**

La Compañía minera San Antonio S.A. (C.M.S.A), es un yacimiento de oro a tajo abierto, se encuentra a una altitud promedio de 3600 m.s.n.m. en el departamento de Cajamarca en la provincia de Hualgayoc.

El drenaje ácido de mina es descargado en el río Llaucano, ubicado al norte de Cajamarca y forma el valle de Bambamarca. Parte de las provincias de Cajamarca, Hualgayoc, Chota y Cutervo. Geográficamente, sus puntos extremos están ubicados aproximadamente entre las coordenadas 78°18' y 78° 52' de longitud Oeste y 6°04' y 6°59' de latitud Sur.

Los principales centros poblados ubicados dentro de la cuenca son Hualgayoc, Bambamarca, Cutervo, Socota, Conchán y Tacabamba)

Actualmente se viene trabajando en la construcción de un canal para conducir las aguas ácidas hasta los 4 sistemas wetlands y la planta de neutralización, mediante tuberías y buzones, las tuberías se encuentran enterradas, de tal manera que se mantengan en buen estado a lo largo de todo su recorrido; para que no sufran daño ni alteraciones.

### **6.1 IDENTIFICACION DE LOS PUNTOS CRITICOS**

En los sectores denominados Nivel 7, Nivel 8, Nivel 9 y Nivel 10, los flujos de agua existentes se han unido en una sola tubería de drenaje llamado Nivel 11, hacia la planta de tratamiento de agua y de aquí son derivadas mediante tubos colectores al río. Los Niveles 1, 2, 3, 4, 5, 6 se tratan en los Sistemas Wetlands, pero debido a que estos sistemas no cuentan con la capacidad suficiente (no se abastece porque los flujos de drenajes son muy altos, que alcanza un caudal máximo de

16 L/S). Se efectuaron muestreo, de agua con el fin de detectar los puntos críticos de generación del drenaje ácido, pues los minerales sulfurosos están en todas partes del ambiente geológico y las áreas en las cuales las rocas sulfurosas han sido removidos, disturbados hasta llegar a la superficie expuesta al aire y al agua que aceleran la velocidad de generación de aguas ácidas y ocasionar un impacto en el ambiente.

En el asiento minero C.M.S.A, de acuerdo al monitoreo y muestreo realizado en Enero-Diciembre del 2005, se determino las siguientes fuentes de generación ácida, a la que hemos clasificado como niveles.

**TABLA 1**

**FUENTES DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO, MONITOREO PERIODO  
2005**

| U.M.N    | Caudal (L/S) | pH   | Cu     | Fe      | Zn    | Pb   | Mn     | Cd   | As   |
|----------|--------------|------|--------|---------|-------|------|--------|------|------|
| Nivel 1  | 6.50         | 1.50 | 126.50 | 1400.20 | 19.02 | 1.00 | 144.00 | 0.47 | 0.28 |
| Nivel 2  | 2.00         | 1.82 | 96.88  | 1607.10 | 15.03 | 0.81 | 108.00 | 0.39 | 0.10 |
| Nivel 3  | 4.98         | 2.14 | 117.32 | 810.55  | 3.98  | 0.55 | 72.40  | 0.18 | 0.08 |
| Nivel 4  | 8.00         | 2.36 | 100.00 | 1345.17 | 5.10  | 0.22 | 118.23 | 0.06 | 0.18 |
| Nivel 5  | 1.86         | 1.94 | 133.18 | 786.00  | 7.62  | 0.33 | 110.70 | 0.19 | 0.14 |
| Nivel 6  | 3.00         | 3.08 | 98.00  | 888.00  | 9.69  | 0.44 | 88.00  | 0.83 | 0.16 |
| Nivel 7  | 11.00        | 2.44 | 58.94  | 592.00  | 16.18 | 0.58 | 62.00  | 0.06 | 0.09 |
| Nivel 8  | 8.00         | 4.45 | 79.76  | 912.15  | 13.42 | 0.07 | 53.77  | 1.04 | 0.12 |
| Nivel 9  | 5.55         | 2.70 | 68.00  | 1225.00 | 10.00 | 0.47 | 132.00 | 0.72 | 0.08 |
| Nivel 10 | 8.17         | 3.16 | 66.00  | 1177.00 | 9.82  | 0.15 | 100.00 | 0.67 | 0.10 |

Composición química: ppm

U.M.N: unidad de muestreo por niveles

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

**TABLA 2**

**SULFUROS METÁLICOS POTENCIALMENTE GENERADORES DE AGUAS ÁCIDAS**

|             |                    |              |                  |
|-------------|--------------------|--------------|------------------|
| Pirita      | FeS <sub>2</sub>   | Molibdenita  | MoS <sub>2</sub> |
| Marcasita   | FeS <sub>2</sub>   | Milerita     | NiS              |
| Pirrotita   | FexSx              | Galena       | PbS              |
| Calcocita   | Cu <sub>2</sub> S  | Esfalerita   | ZnS              |
| Corellita   | CuS                | Arsenopirita | FeAsS            |
| Calcopirita | CuFeS <sub>2</sub> |              |                  |

Fuente: (Skousen etal, 1998)

Durante el periodo Enero / Diciembre del 2005 se realizo el monitoreo y el muestreo de las aguas ácidas, los niveles representan los valores promedio durante todo el año.

- Las pilas de lixiviación : Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3
- Los embalses de relaves : Nivel 4 y Nivel 5, Nivel 6
- Las rocas descubiertas : Nivel 7, Nivel 8,
- Las pilas de desmonte : Nivel 9 y Nivel 10

Fig. 5 Aguas ácidas generadas en una escombrera.  
Se aprecian en color ocre rojizo, los hidróxidos precipitados.

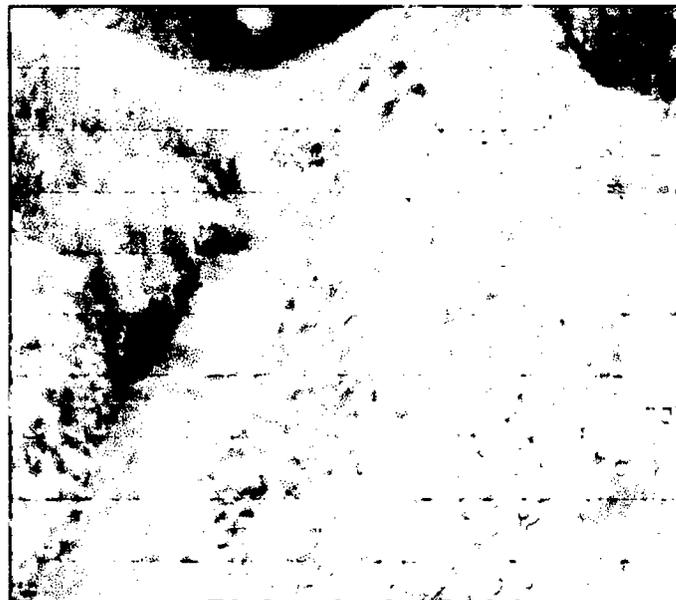


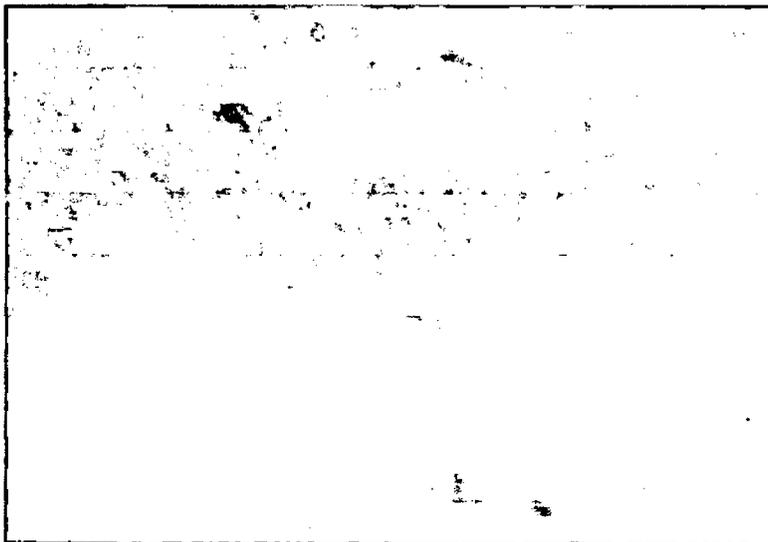
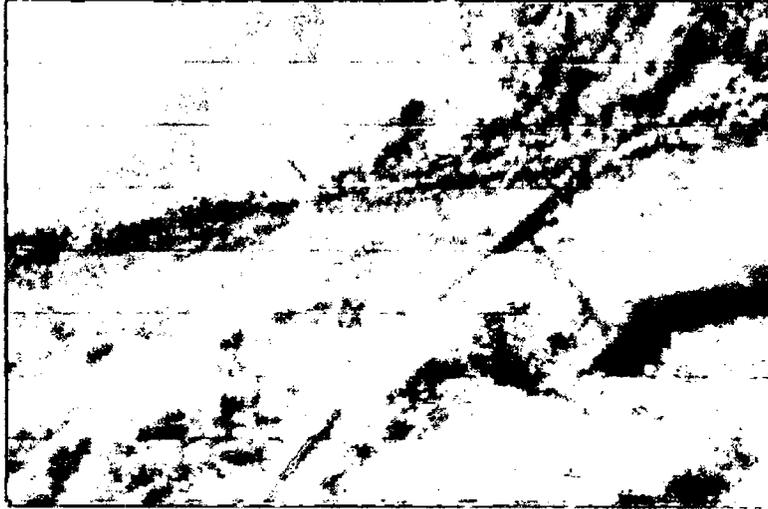
Fig.6 Desmonte sulfurado formando charcos de agua ácida



Fig.7 mineral descubierto, expuesto al medio ambiente



Fig.8 Mineral piritico expuesto al medio ambiente



## VII. METODOLOGIA EMPLEADA A NIVEL DE LABORATORIO

### 7.1. METODOS DE NEUTRALIZACION

El objetivo principal de este proceso de neutralización es la de proporcionar, mediante el incremento del valor del pH, las condiciones necesarias para que precipiten los iones metálicos que pueden aun permanecer disueltos en el agua de mina.

Para el tratamiento del drenaje ácido de mina, se logra mediante la adición de agentes neutralizantes tales como: óxido de cal. Estos reactivos llevan el PH a valores aceptables y favorecen la precipitación de la mayor parte de los metales pesados contenidos en el agua.

#### 7.1.1 Neutralización con Lechada de Cal

La lechada debe suministrarse en forma continua ya que el hidróxido de calcio se convierte en sulfato de calcio, el cual es arrastrado con los lodos. Se realizó un análisis cualitativo y cuantitativo al efluente inicial (color amarillento), en el equipo de absorción atómica con la finalidad de obtener los metales contaminantes más importantes y representativos en el agua de mina. La composición química del agua de mina se muestra en la siguiente Tabla 3.

**TABLA 3**  
**NIVEL 11, PUNTO DE ACOPIO DE LOS NIVELES 7, 8, 9 Y 10**

| U.M.N    | PH   | Cu    | Fe     | Zn    | Pb   | As   |
|----------|------|-------|--------|-------|------|------|
| Nivel 11 | 2.50 | 70.12 | 985.36 | 11.25 | 0.52 | 0.08 |

Composición química: ppm

U.M.N: unidad de muestreo por niveles

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

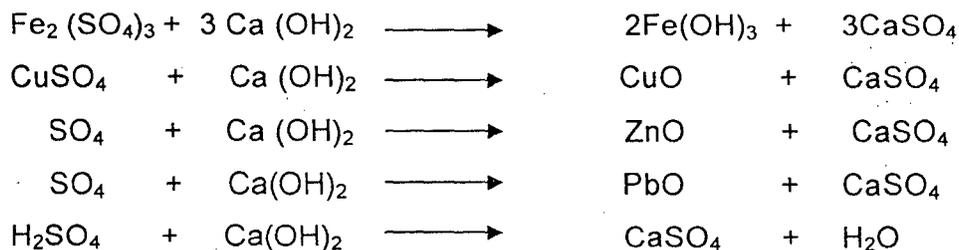
En las pruebas combinadas de lechada de cal y soda cáustica, se hicieron un ajuste de pH, con el criterio de obtener una eliminación adecuada de elementos perniciosos contenidos en estas aguas ácidas. Para esta etapa preliminar a nivel de laboratorio se utilizará lechada de cal al 25% en peso de 70% de pureza. El valor de pH que se debe alcanzar esta en el rango de 6-9.

### 7.1.1.1 REACCIONES INVOLUCRADAS

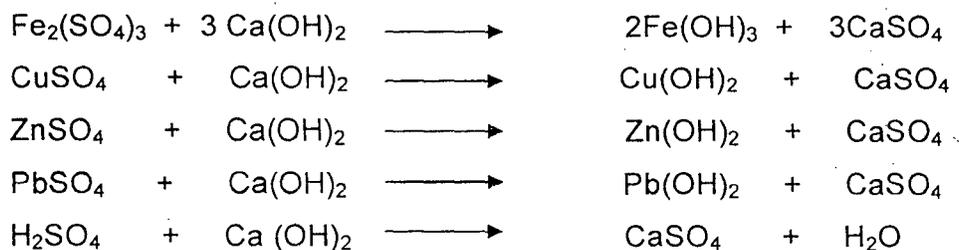
Algunos iones insolubles al reaccionar con la cal o soda precipitan en forma de hidróxidos u óxidos metálicos acompañados del sulfato de calcio formado por la reacción de neutralización.



Reacción de óxidos:



Formación de hidroxidos



Las reacciones son de simple intercambio iónico.

La ley de salubridad reglamenta los límites máximos permisibles (LMP) de los contaminantes según Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996), para aguas del sector minero, ver tabla 4

**TABLA 4**

**VALORES LMP, ESTIPULADOS POR LA LEY.**

| PH    | Cu  | Pb   | Zn  | Fe  | As  |
|-------|-----|------|-----|-----|-----|
| 6 - 9 | 1.0 | 0.40 | 3.0 | 2.0 | 1.0 |

Composición química (ppm)

*Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)*

### **7.1.2 Neutralización con Soda Cáustica**

La soda cáustica, es un neutralizante más eficiente, sin embargo su costo encarece el método a pesar que se requiere menores cantidades de soda cáustica, pues su basicidad es mayor. Tiene la ventaja que los productos de las reacciones son solubles y no aumentan la dureza del agua.

Para esta etapa de neutralización se fijaron los siguientes parámetros de operación a nivel de laboratorio:

**Parámetros de operación:**

Tiempo de agitación : ½ - 1 minuto

Velocidad de agitación : 300 RPM

Volumen de efluente : 1L

Temperatura de operación: 11- 13°C

Para efectos de las pruebas experimentales se utilizará vasos de 1Litro provistos de un sistema de agitación con velocidad variable.

**7.1.3 Proceso de Coagulación- Floculación**

Se utiliza la soda cáustica de concentración 10 molar, de grado industrial al 98% de pureza. La soda cáustica es empleada como agente coagulante-floculante, para ayudar a la sedimentación aglomerando las pequeñas partículas en suspensión a unas de mayor tamaño, las cuales sedimentarán con mayor rapidez que el caso de sedimentación libre.

Para esta etapa se fijaron los siguientes parámetros de operación a nivel de laboratorio:

**Parámetros de operación:**

Tiempo de agitación : 10-20 segundos

Velocidad de agitación : 30 RPM

Volumen de efluente : 1L

Temperatura de operación: 11- 13°C

Las pruebas de sedimentación se realizó en una probeta de capacidad de 1 Litro, luego de establecer los parámetros para determinar la velocidad de sedimentación, se pueden graficar curvas, tomando como datos directos la altura y el tiempo de sedimentación , a partir de éstas se pueden hacer estimaciones de las velocidades de sedimentación y calcular el % de lodos acumulados.

**8.1 NEUTRALIZACIÓN: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA POTABLE**

Todas pruebas de neutralización se muestran en el apéndice 1.

**PRUEBA # 1**

**PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN**

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
 Velocidad de Agitación : 300 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

**PARÁMETROS: COAGULACIÓN**

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
 Velocidad de Agitación : 30 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

**Dosificación**

Lechada de Cal (25%) : 9.6 (mL/L)

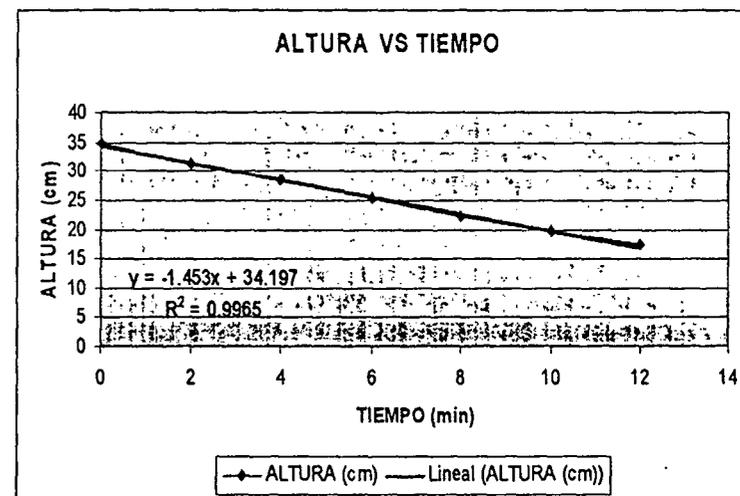
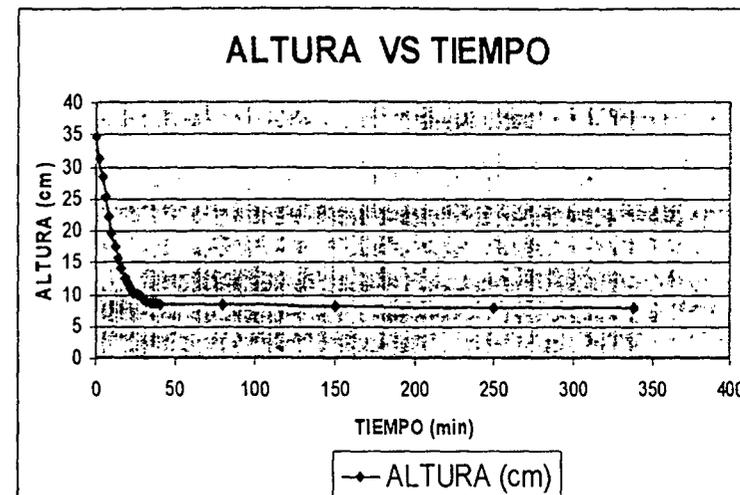
| PRUEBA 1    | pH         | Cu         | Fe         | Zn         | Pb         | As         | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5        | 70.12      | 985.4      | 11.25      | 0.52       | 0.08       | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.50       | 0.218      | 0.298      | 0.720      | 0.1<       | 0.02       | 1.45                        | 17.00 | 2.4                                 | -                                 | 0.336                             | -                                  |
| <b>LMP</b>  | <b>6-9</b> | <b>1.0</b> | <b>2.0</b> | <b>3.0</b> | <b>0.4</b> | <b>1.0</b> |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
 DAM: Drenaje Ácido de Mina  
 Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 26          | 9.86       |
| 2           | 31.28      | 28          | 9.52       |
| 4           | 28.29      | 30          | 9.18       |
| 6           | 25.16      | 32          | 8.88       |
| 8           | 22.10      | 34          | 8.70       |
| 10          | 19.58      | 36          | 8.53       |
| 12          | 17.34      | 38          | 8.48       |
| 14          | 15.47      | 40          | 8.38       |
| 16          | 13.97      | 80          | 8.30       |
| 18          | 12.58      | 150         | 8.00       |
| 20          | 11.56      | 250         | 7.92       |
| 22          | 10.88      | 338         | 7.82       |
| 24          | 10.20      |             |            |

GRAFICA 1



## PRUEBA # 2

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 8.6 (mL/L)  
Soda Cáustica (10M) : 0.2 (mL/L)

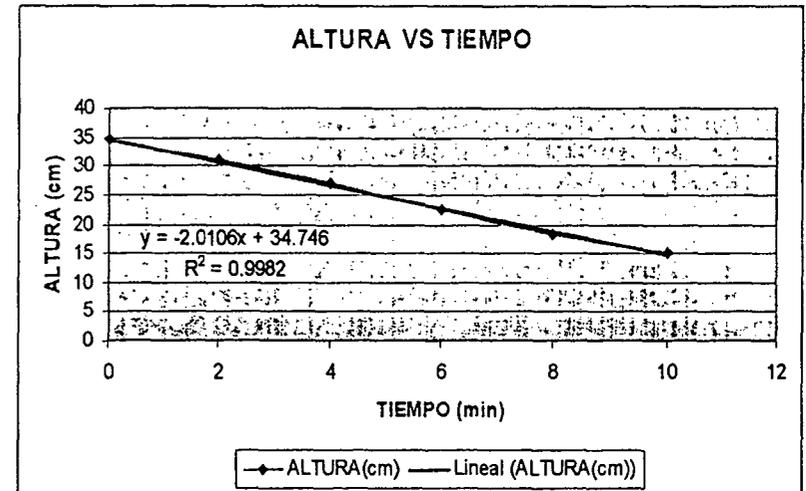
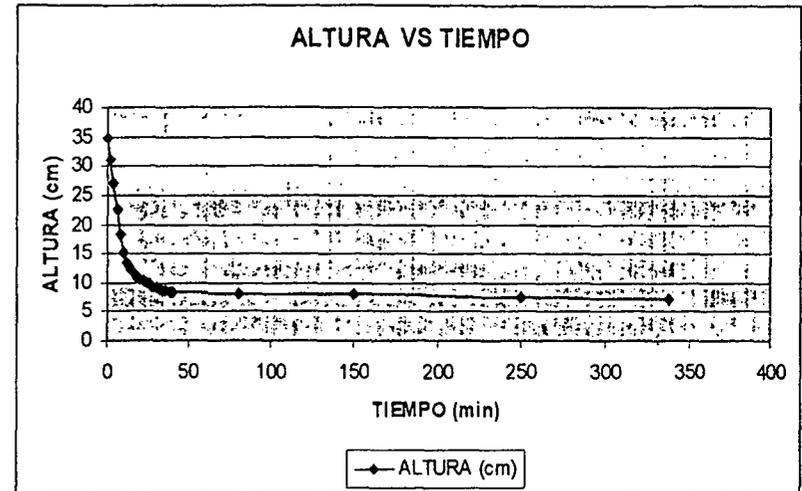
| PRUEBA 2    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As    | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08  | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.90 | 0.258 | 0.356 | 0.815 | 0.1< | 0.018 | 2.01                        | 15.00 | 8.60                                | 2.150                                | 0.08                              | 0.301                              |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0   |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
DAM: Drenaje Ácido de Mina  
Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 26          | 9.52       |
| 2           | 30.94      | 28          | 9.18       |
| 4           | 26.97      | 30          | 8.98       |
| 6           | 22.44      | 32          | 8.84       |
| 8           | 18.22      | 34          | 8.60       |
| 10          | 14.99      | 36          | 8.48       |
| 12          | 13.26      | 38          | 8.33       |
| 14          | 12.24      | 40          | 8.12       |
| 16          | 11.53      | 80          | 7.98       |
| 18          | 10.88      | 150         | 7.85       |
| 20          | 10.54      | 250         | 7.30       |
| 22          | 10.17      | 338         | 7.14       |
| 24          | 9.79       |             |            |

GRAFICA 2



## 8.2 NEUTRALIZACIÓN: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA DE MINA

### PRUEBA # 1

#### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
 Velocidad de Agitación : 300 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

#### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
 Velocidad de Agitación : 30 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

#### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 10.5 (mL/L)  
 Soda Caustica (10M) : 0.20 (mL/L)

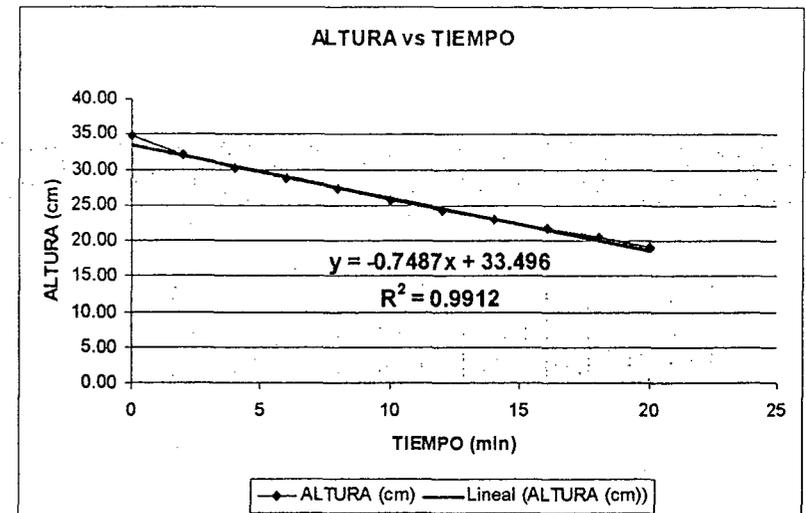
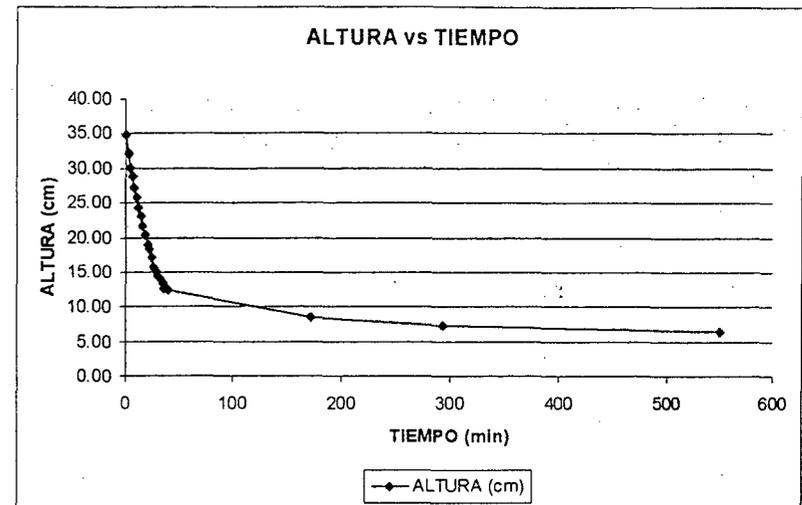
| PRUEBA 1    | PH         | Cu         | Fe         | Zn         | Pb         | As         | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5        | 70.12      | 985.4      | 11.25      | 0.52       | 0.08       | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.10       | 0.312      | 0.985      | 0.314      | 0.1<       | 0.014      | 0.75                        | 19.00 | 2.625                               | 0.08                              | 0.368                             | 0.041                              |
| <b>LMP</b>  | <b>6-9</b> | <b>1.0</b> | <b>2.0</b> | <b>3.0</b> | <b>0.4</b> | <b>1.0</b> |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
 DAM: Drenaje Ácido de Mina  
 Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 24          | 17.07      |
| 2           | 31.96      | 26          | 15.64      |
| 4           | 30.04      | 28          | 14.96      |
| 6           | 28.73      | 30          | 14.42      |
| 8           | 27.13      | 32          | 13.94      |
| 10          | 25.67      | 34          | 13.26      |
| 12          | 24.13      | 36          | 12.58      |
| 14          | 22.95      | 38          | 12.51      |
| 16          | 21.62      | 40          | 12.24      |
| 18          | 20.40      | 172         | 8.50       |
| 20          | 18.87      | 294         | 7.14       |
| 22          | 18.16      | 550         | 6.46       |

GRAFICA 1



## PRUEBA # 5

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 11.0 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.20 (mL/L)

| PRUEBA 5    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.0 | 0.278 | 0.061 | 0.234 | 0.1< | 0.01 | 0.81                        | 18.00 | 2.750                               | 0.08                                 | 0.385                             | 0.041                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

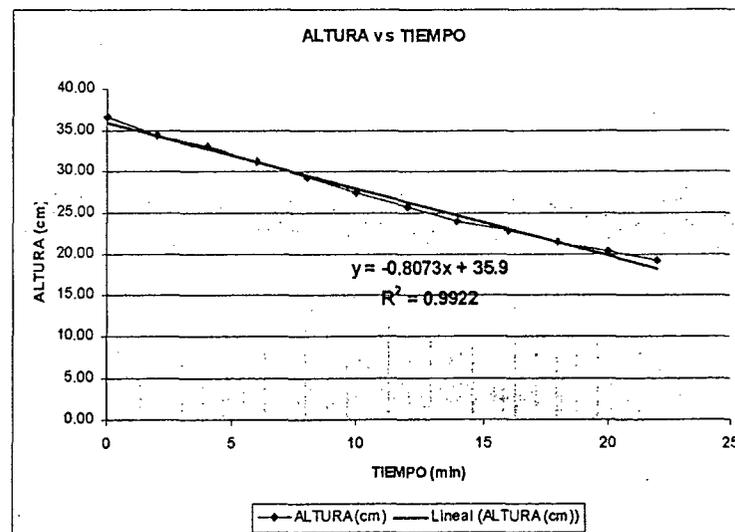
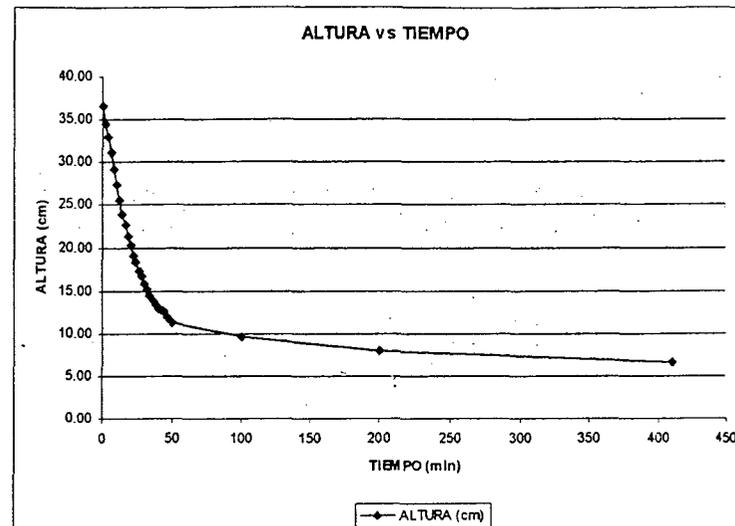
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 15.77      |
| 2           | 34.38      | 32          | 15.08      |
| 4           | 32.94      | 34          | 14.40      |
| 6           | 31.10      | 36          | 13.68      |
| 8           | 29.16      | 38          | 13.32      |
| 10          | 27.36      | 40          | 12.89      |
| 12          | 25.56      | 42          | 12.68      |
| 14          | 23.90      | 44          | 12.53      |
| 16          | 22.68      | 46          | 11.81      |
| 18          | 21.31      | 48          | 11.48      |
| 20          | 20.16      | 50          | 11.10      |
| 22          | 19.08      | 100         | 9.47       |
| 24          | 18.29      | 200         | 7.80       |
| 26          | 17.28      | 410         | 6.47       |
| 28          | 16.56      |             |            |

GRAFICA 5



## TABLA DE RESUMEN DE RESULTADOS

TABLA 5: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA POTABLE

### ALTERNATIVA I

| N° PRUEBA | pH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | Ar    | Velocidad de Sed.(cm./min) | %Lodo | Lechada De Cal 25%(L/m <sup>3</sup> ) | Consumo Cal(Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH(Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH(\$/m <sup>3</sup> ) | costo total(\$/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|------|-------|-------|-------|------|-------|----------------------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1         | 6.60 | 0.218 | 0.298 | 0.720 | 0.1< | 0.020 | 1.45                       | 17.00 | 9.60                                  | 2.400                           | -                                | 0.336                             | -                                 | 0.336                           |
| 2         | 7.00 | 0.258 | 0.356 | 0.815 | 0.1< | 0.013 | 2.01                       | 15.00 | 8.60                                  | 2.150                           | 0.08                             | 0.301                             | 0.041                             | 0.342                           |
| 3         | 7.40 | 0.158 | 0.189 | 0.564 | 0.1< | 0.010 | 0.20                       | 33.00 | 0.00                                  | 0.000                           | 2.40                             | -                                 | 1.224                             | 1.004                           |
| 4         | 7.90 | 0.162 | 0.268 | 0.675 | 0.1< | 0.010 | 0.49                       | 20.40 | 10.00                                 | 2.500                           | -                                | 0.350                             | -                                 | 0.350                           |
| 5         | 8.40 | 0.125 | 0.026 | 0.350 | 0.1< | 0.010 | 0.74                       | 17.60 | 9.00                                  | 2.250                           | 0.08                             | 0.315                             | 0.041                             | 0.356                           |
| 6         | 8.70 | 0.068 | 0.1<  | 0.162 | 0.1< | 0.010 | 0.49                       | 19.80 | 9.40                                  | 2.350                           | 0.16                             | 0.329                             | 0.082                             | 0.411                           |
| 7         | 9.10 | 0.678 | 0.018 | 0.181 | 0.1< | 0.1<  | 0.40                       | 23.45 | 11.00                                 | 2.750                           | -                                | 0.385                             | -                                 | 0.385                           |
| 8         | 10.0 | 0.1<  | 0.1<  | 0.120 | 0.1< | 0.1<  | 0.34                       | 24.76 | 12.00                                 | 3.000                           | -                                | 0.420                             | -                                 | 0.420                           |

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

Composición Química: ppm

Concentración de la lechada de cal = 25% (en peso)

Concentración del hidróxido de sodio = 10 Molar

**TABLA 6: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA DE MINA**

ALTERNATIVA II

| Nº PRUEBA | pH   | Cu    | Fe    | Zn     | Pb    | Ar    | Velocidad de Sed.(cm./min) | %Lodo | Lechada De Cal 25%(L/m <sup>3</sup> ) | Consumo Cal(Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH(Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH(\$/m <sup>3</sup> ) | costo total(\$/m <sup>3</sup> ) |
|-----------|------|-------|-------|--------|-------|-------|----------------------------|-------|---------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1         | 6.10 | 0.312 | 0.985 | 0.314  | 0.1<  | 0.020 | 0.75                       | 19.00 | 10.50                                 | 2.625                           | 0.08                             | 0.368                             | 0.041                             | 0.409                           |
| 2         | 6.58 | 0.320 | 0.108 | 0.298  | 0.1<  | 0.015 | 0.52                       | 19.00 | 11.50                                 | 2.875                           | -                                | 0.403                             | -                                 | 0.403                           |
| 3         | 7.00 | 0.298 | 0.092 | 0.286  | 0.1<  | 0.012 | 0.56                       | 21.00 | 12.00                                 | 3.000                           | -                                | 0.420                             | -                                 | 0.420                           |
| 4         | 7.43 | 0.292 | 0.083 | 0.278  | 0.1<  | 0.010 | 0.35                       | 22.00 | 12.50                                 | 3.125                           | -                                | 0.438                             | -                                 | 0.438                           |
| 5         | 8.00 | 0.278 | 0.061 | 0.234  | 0.1<  | 0.010 | 0.81                       | 18.00 | 11.00                                 | 2.750                           | 0.08                             | 0.385                             | 0.041                             | 0.426                           |
| 6         | 8.45 | 0.267 | 0.064 | 0.24.1 | 0.1<  | 0.010 | 0.34                       | 22.60 | 13.00                                 | 3.250                           | -                                | 0.455                             | -                                 | 0.455                           |
| 7         | 8.73 | 0.183 | 0.032 | 0.211  | 0.1<  | 0.010 | 0.60                       | 20.00 | 11.00                                 | 2.750                           | 0.16                             | 0.385                             | 0.082                             | 0.467                           |
| 8         | 9.50 | 0.143 | 0.010 | 0.168  | 0.1 < | 0.010 | 0.55                       | 23.00 | 12.00                                 | 3.000                           | 0.08                             | 0.420                             | 0.041                             | 0.461                           |

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera.

Composición Química: ppm

Concentración de la lechada de cal = 25% (en peso)

Concentración del hidróxido de sodio = 10 Molar

## **IX. CONTROL DEL DRENAJE ACIDO**

El objetivo principal del control de los drenajes ácidos de mina es minimizar el efecto negativo de éstos (drenajes ácidos) sobre el medio ambiente, utilizando para ello la técnica más efectiva. Los métodos de control incluyen técnicas de prevención, realizadas antes del comienzo de la actividad extractiva, y técnicas de corrección, que se llevan a cabo dónde y cuándo se comprueba que se están produciendo aguas ácidas.

### **Técnicas de prevención**

Es decir, las medidas de control diseñadas e implementadas antes de la presencia del drenaje ácido. En este caso, el control de la calidad del agua es fundamentalmente el control de todo producto soluble y la prevención de oxidación y generación de ácido en el futuro.

### **Técnicas de corrección**

Es decir, el control que se implementa después de la generación o liberación de contaminantes. En este caso, las medidas de control deberán referirse a la oxidación, pasada y futura, y a los productos solubles almacenados.

Estos niveles de control (orden de preferencia desde el punto de vista medioambiental) son las siguientes:

#### **A. Control primario: control del proceso de generación**

El Control del proceso de generación (control de reacciones de oxidación) de las aguas ácidas se logra anticipando la posibilidad de que se generen aguas ácidas, es posible adoptar medidas para evitar que esto ocurra, eliminando con

ello el riesgo de que los productos contaminantes se introduzcan en el medio ambiente.

### **B. Control secundario: control de migración de contaminantes**

El Control del movimiento de las aguas ácidas se aplica cuando la generación de agua ácida no se ha previsto, o bien las medidas adoptadas para evitar su generación no han resultado efectivas, es necesario adoptar medidas encaminadas a evitar que los contaminantes lleguen al medio ambiente.

### **C. Control terciario: recolección y tratamiento del drenaje ácido**

La recolección y tratamiento de las aguas ácidas se realiza si no se han aplicado o no han resultado efectivos, ninguno de los dos niveles de actuación (primario y secundario), anteriores, únicamente puede recurrirse a aplicar técnicas de descontaminación de las aguas ácidas.

Las técnicas de control de los drenajes ácidos, son mucho mayores en las minas activas, especialmente si se están iniciando las labores y es posible introducir medidas de control como parte del plan de explotación, que en las minas abandonadas, donde únicamente cabe recurrir a estrategias de tratamiento y las posibilidades de actuación suelen estar limitadas por cuestiones económicas y por la severidad de los impactos ambientales. En cualquier caso, para conseguir mayores garantías de seguridad, es conveniente aplicar medidas de diferentes niveles de control.

## **9.1 CONTROL PRIMARIO**

### **CONTROL DEL PROCESO DE GENERACION**

El objetivo de este nivel primario es limitar la formación de aguas ácidas en la fuente mediante la inhibición del proceso de oxidación de los sulfuros

metálicos. Esto puede conseguirse mediante la exclusión de uno o más de los elementos primarios del proceso de generación (mineral reactivo, agua y oxígeno), o actuando sobre algunos de los factores que aceleran la velocidad de reacción (pH, temperatura y actividad bacteriana).

En el Perú, existen muchas actividades mineras en operación o en cierre, donde el potencial del drenaje ácido no fue reconocido y detectado en un inicio, por lo que estas medidas de control no son validas y no podrán ser aplicadas, pero sin duda son una buena alternativa para la planificación de nuevas minas.

A continuación se comentan algunas de estas técnicas de control de la generación de aguas ácidas.

### **9.1.1 Eliminación de sulfuros:**

#### **Depósito selectivo y aislamiento del mineral reactivo**

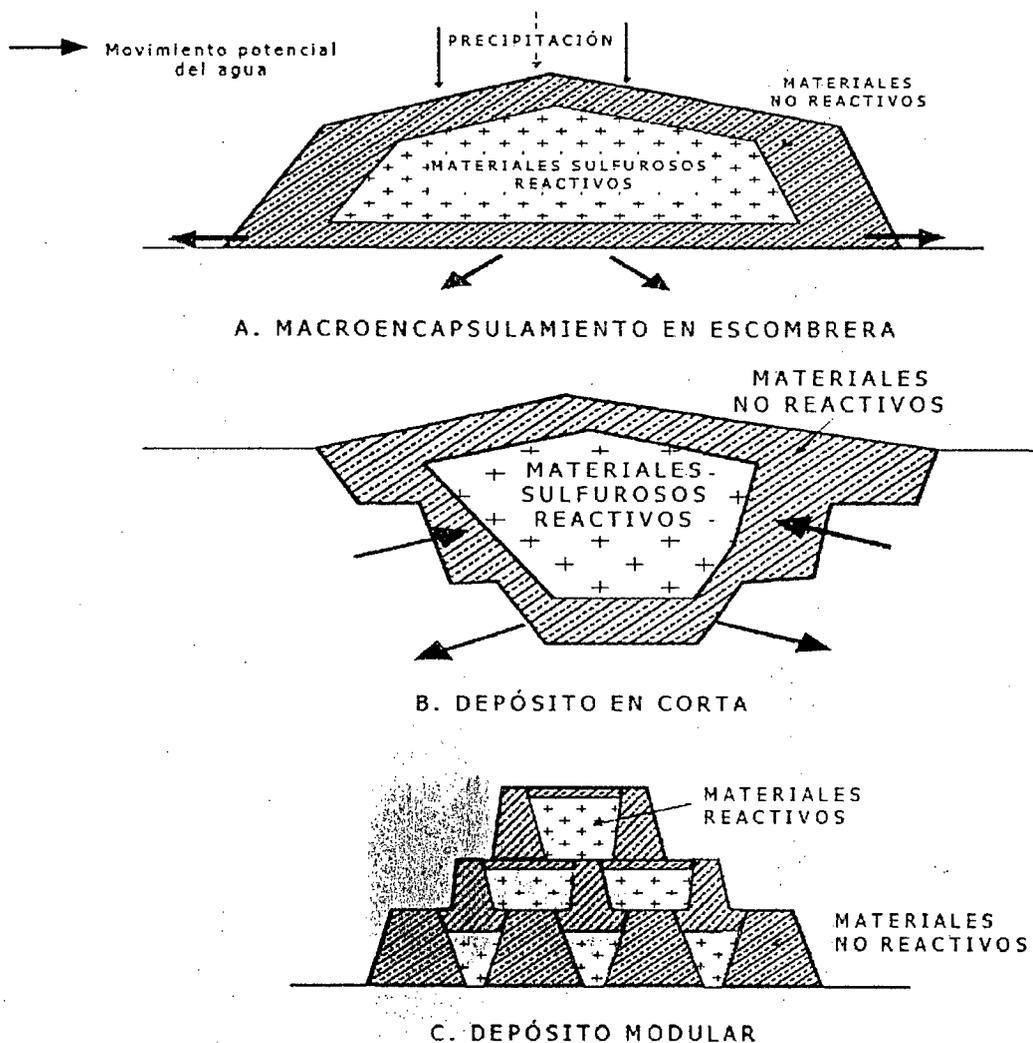
Esta técnica consiste en separar el material reactivo, que presenta alto riesgo de generación de aguas ácidas, y disponerlo de forma selectiva en depósitos y escombreras, quedando situado dentro del cuerpo de la escombrera, a una profundidad tal que se evite o minimice su contacto con el oxígeno y el agua.

En minas abandonadas o en plan de cierre, la aplicación de esta técnica de control puede ser bastante complicada y costosa, ya que requiere la realización de grandes movimientos de tierras, y presenta la dificultad de la separación de los materiales reactivos de los no reactivos.

En minas activas o en operación, su realización no presenta dificultades ni tiene porqué suponer un coste adicional, siempre que la separación y depósito de los materiales reactivos este incluido como una operación mas en el diseño del proyecto de explotación.

Este método de construcción de escombreras resulta útil para prevenir la generación de aguas ácidas, sin embargo se debe complementar con otras medidas de control adicionales, como el sellado o la mezcla de los materiales reactivos con materiales calizos o alcalinos. La figura 9, muestra cómo los residuos sulfurados pueden ser aislados dentro de una pila de residuos.

Fig. 9 Algunos diseños de disposición selectiva de los estériles sulfurados en escombreras.



Fuente: *Alternative options for passive treatment systems of acid coal mine drainage ECSC Agreement nº 7220-AF/015*

## 9.1.2 Microencapsulado o envoltura de la pirita

### Recubrimiento del material reactivo

En la actualidad la investigación de los métodos de aislamiento del mineral reactivo se orienta hacia el microencapsulado (Evangelou, 1994, 1995). Esta técnica se basa en el recubrimiento ("encapsulamiento") de las partículas de mineral reactivo con una capa de precipitado inerte, de forma que queden aisladas del agua y del oxígeno.

Su mecanismo de aplicación consiste en el riego o lixiviación de los materiales y superficies que contienen el mineral reactivo con una solución acuosa rica en  $\text{Ca}^{2+}$  o  $\text{PO}_4^-$ , mediante disolución en agua de materiales fosfatados o carbonatados, como el apatito, la cal o la caliza, y añadiendo peróxido de hidrógeno para incrementar la potencia oxidante de la solución.

Este proceso consiste en cubrir ciertos residuos mineros, para prevenir la oxidación de la pirita. El mecanismo con lleva a la lixiviación de residuos con una solución fosfatada de  $(\text{KH}_2\text{PO}_4)$  y acetato de sodio (también son utilizados:  $\text{CO}_3\text{Ca}$ ,  $\text{CaO}$ ) con peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). La superficie de la pirita es oxidada por el peróxido para liberar óxidos de hierro, los cuales reaccionan con la solución fosfatada para formar un precipitado de fosfato ( $\text{FePO}_4$ ) que precipita en la superficie formando la envoltura.

### 9.1.3 Recubrimiento y sellado

#### Exclusión del oxígeno y el agua

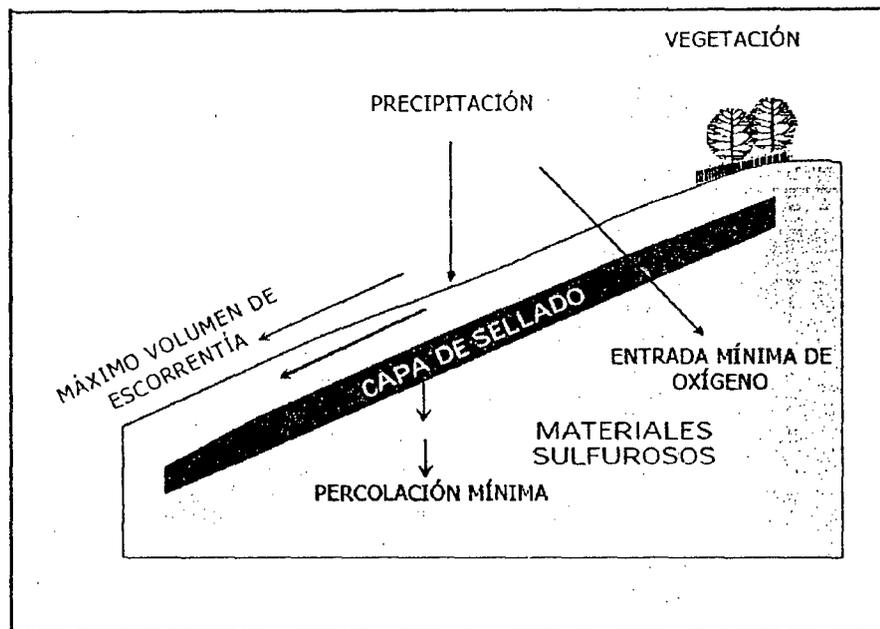
Las cubiertas y sellados actúan limitando la entrada de oxígeno y agua hacia los minerales reactivos, Figura 11. Para ello puede utilizarse una gran variedad de materiales, que por su capacidad de compactación y su baja permeabilidad, constituyen una barrera que frena la difusión del agua y el oxígeno.

Actualmente existen en el mercado multitud de productos de impermeabilización y sellado, desarrollado para vertederos y para la construcción de balsas y canales, que pueden utilizarse en escombreras de materiales piríticos.

Las cubiertas y sellos para controlar el flujo de oxígeno (control primario), son más adecuadas para controlar la infiltración y por ende, la migración de contaminantes. Éstas, se pueden colocar en la superficie y lados de un embalse de relaves reactivos o botaderos, para restringir el acceso de oxígeno y, así inhibir la generación de ácido. Para limitar la entrada de oxígeno, la cubierta deberá tener muy baja permeabilidad a estos elementos y no tener agujeros o imperfecciones a través de los cuales puedan ingresar. No se considera una solución práctica excluir el agua, hasta el punto de que no se presente la generación de ácido, excepto en climas muy áridos, dado que las cubiertas y sellos contribuyen a inhibir la subsiguiente migración de contaminantes.

Una de las preocupaciones a más largo plazo en relación con la integridad de las cubiertas está vinculada con la resistencia de la cubierta a las roturas, efectos horadantes de raíces y animales, la erosión y degradación debido al intemperismo y a la acción de las heladas.

Figura 10 Prevención de la generación mediante sellado de los Materiales reactivos.



*Fuente: Alternative options for passive treatment systems of acid coal mine drainage ECSC Agreement nº 7220-AF/015*

Esta técnica suele resultar bastante cara, a no ser que se utilicen los propios estériles de mina compactados como material de sellado, y su eficacia suele decrecer con el tiempo al deteriorarse la capa de sellado y abrirse grietas que permiten el paso de aire y oxígeno hacia los materiales reactivos.

Generalmente, una vez realizado el sellado, se dispone sobre él una capa de tierras naturales y se procede a su revegetación. Esto, además de permitir la restauración de las superficies tratadas, incrementa la efectividad de la capa de sellado y la protege de la erosión.

## **9.1.4 Depósitos subacuáticos**

### **A. Exclusión del Oxígeno**

Denominadas También cubiertas de agua y descarga subacuática, el objetivo de las cubiertas de agua es controlar el flujo de oxígeno y las tasas de oxidación de sulfuro, actuando como una barrera para la difusión de oxígeno desde la atmósfera a los sulfuros sumergidos. La velocidad de oxidación de sulfuro es considerablemente más baja en la fase acuosa, que en la fase gaseosa, en por lo menos cuatro órdenes de magnitud. Debido a que el coeficiente de difusión de oxígeno es menor en el agua y la máxima concentración de oxígeno disuelto en aguas naturales es aproximadamente 25.000 veces menor que la encontrada en la atmósfera. El oxígeno una vez disponible en el agua, es consumido, la velocidad de la reacción de oxidación empieza a disminuir significativamente pues la velocidad de reemplazo de aquel elemento es muy lenta.

### **B. Limitaciones**

Las cubiertas de agua han sido aplicadas en muchos sitios, pero no son aplicables universalmente. Factores del sitio específico, la capacidad para mantener una cobertura de agua durante el largo plazo, la integridad de las estructuras de contención, lugar y riesgos potenciales del sitio específico debido a eventos sísmicos, eventos de tormenta severa, la geoquímica o reactividad del material, etc, pueden invalidar el uso de esta técnica.

## **9.1.5 Mezclas de Aditivos Básicos**

### **A. Control del pH**

El objetivo de mezclar material alcalino es controlar el pH en el rango cercano al neutro, limitando así la oxidación química; y prevenir el establecimiento de la oxidación catalizada. Los materiales utilizados pueden ser, la 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.

## **B. Limitaciones**

- ▶ Las principales limitaciones son los costos (debido al manejo del material), limitaciones de ejecución (posibilidad de concentraciones elevadas de metales en pH neutro), incertidumbre técnica (predicción del comportamiento geoquímico), y la necesidad de caracterización amplia del material con anterioridad a la construcción.
- ▶ Para la mezcla adecuada de materiales alcalinos con desechos gruesos de roca se puede requerir la trituración y mezcla profunda.
- ▶ Se requiere de exhaustivas pruebas de laboratorio con el objeto de demostrar la efectividad de la mezcla.
- ▶ Hasta la fecha, no hay ejemplos de operación exitosos a largo plazo utilizando este método.

### **9.1.6 Inhibición de las bacterias**

Estos productos bactericidas contienen surfactantes, que destruyen la película de grasa que protege las bacterias. De esta forma el propio ácido que produjeron las ataca. Los bactericidas pueden ser aplicados en forma de spray o en forma sólida en una matriz de polímero, de modo de liberar lentamente el producto activo. (Rastogi, 1995). Los productos bactericidas más comúnmente utilizados son los surfactantes aniónicos, como el Lauril Sulfato de Sodio, compuestos fosfatados, ácidos orgánicos y algunas sustancias orgánicas conservantes.

## 9.2 CONTROL SECUNDARIO

### CONTROL DE MIGRACIÓN DE CONTAMINANTES

La mayoría de las técnicas de control del movimiento de las aguas ácidas inciden en prevenir o evitar la entrada de agua en las zonas que contienen sulfuros reactivos, actuando sobre la escorrentía, las aguas subterráneas y las de infiltración. En muchos asientos mineros existentes, el potencial del drenaje ácido no fue identificado y detectado antes de iniciar la operación, en estos sitios, la medida más efectiva de control es con frecuencia evitar la migración de los contaminantes. Las técnicas que modifican el movimiento de las aguas de salida son menos diversas y suelen estar más relacionadas con la captación de los drenajes ácidos y su conducción hacia instalaciones de tratamiento.

#### 9.2.1 Desviación del agua superficial

El agua superficial se puede desviar de las áreas de un asiento minero, mediante el apilamiento de desmonte en forma de bermas, perfiles superficiales y del empleo de zanjas.

Representa la medida de diseño más efectiva, en cuanto a costos, es la selección apropiada del sitio minero, con el fin de evitar canales de drenaje naturales y minimizar el contacto con el desagüe de agua superficial.

#### Limitaciones

- ▶ Las zanjas y bermas requieren de un sistema de mantenimiento anual, específicamente en zonas donde la formación del ciclo hielo/deshielo perturban la integridad física de la estructura.
- ▶ La ubicación del sitio minero en la cresta de los declives o en pequeñas mesetas para controlar la migración, puede resultar desfavorable en cuanto a costos, por las distancias y ubicación con respecto a la mina.

### **9.2.2 Interceptación del agua subterránea**

El agua subterránea es interceptada con el fin de mantenerla a un nivel por debajo de las labores mineras, durante la operación de la mina disminuye la napa freática. Sin embargo, después del cierre, dado que la napa freática natural se reestablece y el agua subterránea podría proporcionar un considerable flujo en el asiento minero. Las técnicas para la interceptación, son: colocación selectiva, paredes de pulpa, cortinas de inyecciones, zanjas profundas para drenaje y perforaciones o excavaciones con descarga de bombeo controlada.

#### **Limitaciones**

Se requiere de una detallada investigación con el propósito de definir el sistema de flujo subterráneo, tanto local como regional, los efectos del uso corriente debajo de cualquier interceptación de este sistema y, finalmente las alternativas técnicamente adecuadas para el control.

### **9.2.3 Control de la infiltración**

La principal fuente de agua que contribuye al transporte de contaminantes es la infiltración de lluvias, el método más práctico para controlarla son las cubiertas y sellos secos o de baja permeabilidad. Su efectividad se valora en función de su capacidad para impedir la entrada de agua y su resistencia y capacidad de absorción de los constituyentes en disolución de las aguas ácidas que pudieran generarse.

La selección de materiales para cubierta, depende de los objetivos de la colocación de éstas, es decir, el grado de reducción de infiltración, tanto de oxígeno como de agua que se requiere, de los materiales de cubierta potenciales en el sitio, de la duración necesaria del control y de las condiciones climáticas del lugar.

## **Limitaciones**

Existe un potencial de permitir entrar infiltración contaminada al medio ambiente. Los sistemas de cubierta mal diseñados pueden fallar durante un período de 10 a 50 años o incluso arriba de 100 años después de su construcción. La clave es prevenir el sistema de cubierta seca de fallas en el corto plazo.

### **a) Cubiertas simples de suelo**

Las cubiertas simples se construyen con una sola capa de suelo. Para reducir la infiltración puede utilizarse un suelo de grano fino, como arcilla, ciénaga o morrena (materiales arrancados, transportados y después glaciados).

## **Limitaciones**

- ▶ Están sujetas al resquebrajamiento por heladas, erosión del viento y el agua, sedimentación, acción horadante de raíces y animales y desecación, como consecuencia de las grandes variaciones estacionales en el contenido de humedad, que pueden originar un aumento de permeabilidad, conductividad hidráulica y la infiltración a través del tiempo.
- ▶ Las cubiertas de una sola capa de suelo probablemente no reduzcan de manera suficiente la infiltración, como para disminuir la carga de contaminantes que emana del botadero.

### **b) Cubiertas complejas de suelo**

Las cubiertas complejas se construyen con varias capas de diferentes características, y funciones específicas, con el fin de mejorar significativamente la exclusión del agua y oxígeno, la estabilidad a largo plazo y por ende la efectividad de reducción de infiltración.

## **Limitaciones**

Los principales componentes que afectan el balance total de agua de la cubierta son: precipitación, evapotranspiración, escorrentía y filtración. Sin cubierta, casi toda la precipitación se infiltra en el botadero, pudiendo emerger luego como filtración.

### **a.- Cubiertas sintéticas**

La industria minera esta considerando muchas cubiertas de muy baja permeabilidad, de materiales sintéticos desarrolladas en otras aplicaciones industriales. El tipo más común de estas cubiertas son las geomembranas, tales como: Geomembrana Bentónica (Somex), Membrana HDPE (Poirier) y Encapsulación (Weedon). En general los geopolímeros, que son compuestos de minerales, principalmente sílice, fosfato y oxígeno, se unen para formar un producto de tipo cerámico y pueden aplicarse sobre una superficie adecuadamente nivelada y preparada, para formar una barrera contra la infiltración y la difusión de oxígeno, pero la aplicación de éstos en las cubiertas de desechos mineros aún no ha sido demostrada. La colocación de materiales geosintéticos como capas impermeables, es una tecnología usada por años en aplicaciones como la lixiviación en pilas y relleno. En estos últimos años, se están usando estas membranas "impermeables" como cubiertas contra la generación de ácido para limitar el flujo tanto de oxígeno como de agua, es decir, como control tanto de la generación de ácido como de la migración de contaminantes.

## **Limitaciones**

La colocación de cubiertas puede complicarse por las dificultades que suponen las condiciones de la superficie, tales como pendientes, el acceso a la zona y estabildades de las superficies sobre las cuales se colocarán. Estas dificultades, con frecuencia, hacen que un tipo particular de cubierta no sea funcional o, prohibitivo, en términos de costos.

## X. METODO EMPLEADO EN LA INVESTIGACION PARA EL CONTROL DEL DRENAJE ACIDO DE MINA

### 10.1 INHIBICIÓN DE BACTERIAS

Existen bacterias capaces de aumentar enormemente la tasa de producción de acidez de los materiales piríticos. La principal bacteria que participa en acelerar la oxidación de los compuestos de azufre reducidos es el *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Bacteria acidófila sulfo-oxidante y ferro-oxidante mesófila.

### 10.2 PRUEBAS POR INHIBICIÓN DE BACTERIAS

Aplicamos el biocida (lauril sulfato de sodio) en forma granulado de liberación lenta, para mantener una concentración activa del biocida en el tiempo, a pesar de la biodegradación y el lavado que se produce por acción del agua, directamente en la zona afectada, para los Niveles 7, Nivel 8, Nivel 9 y Nivel 10, seguidamente se observa que esto provoca una rápida disminución de la actividad de las bacterias (lauril sulfato de sodio) sobre la pirita y por ende se logra también la disminución de la dilución y lixiviación de los metales.

TABLA 7

#### Datos del monitoreo, valores iniciales

| Nº Días | Origen   | pH   | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|------|------------------|------------------|----------|
| 1       | Nivel 7  | 2.44 | 20.35            | 571.65           | 592.00   |
| 1       | Nivel 8  | 4.45 | 80.33            | 831.82           | 912.15   |
| 1       | Nivel 9  | 2.70 | 15.36            | 1209.60          | 1225.00  |
| 1       | Nivel 10 | 3.16 | 65.32            | 1111.60          | 1177.00  |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

## Condiciones de trabajo:

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Tiempo de Medición                | : cada 24 horas                                   |
| Total de días empleados           | : 20  |
| Cantidad de bactericida utilizado | : 60 Kg de Lauril Sulfato de Sodio por cada Nivel |
| Caudal total de trabajo           | : 16 L/S  |
| Temperatura                       | : 11-20°C   |

La alimentación del bactericida se hizo en forma diaria durante 20 días. Los resultados de la aplicación del bactericida, en los Niveles 7, Nivel 8, Nivel 9 y Nivel 10, se muestran a continuación. Los datos de los días restantes se muestran en apéndice 2.

**TABLA 8**

### RESULTADOS DEL QUINTO DÍA

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 5       | Nivel 7  | 5.60     | 370.58           | 19.94            | 390.52   |
| 5       | Nivel 8  | 6.79     | 315.00           | 5.04             | 320.04   |
| 5       | Nivel 9  | 4.98     | 630.25           | 55.07            | 685.32   |
| 5       | Nivel 10 | 5.21     | 650.25           | 50.87            | 701.12   |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

**TABLA 9**

### VALORES PROMEDIOS DE CADA NIVEL DURANTE LOS 20 DIAS

| U.M.N    | pH   | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|----------|------|------------------|------------------|----------|
| Nivel 7  | 7.34 | 130.74           | 113.30           | 244.04   |
| Nivel 8  | 8.01 | 152.54           | 109.11           | 261.65   |
| Nivel 9  | 6.25 | 228.70           | 174.30           | 403.00   |
| Nivel 10 | 6.48 | 214.55           | 188.95           | 403.50   |

Composición química: ppm

Fuente: elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

## **XI. METODOLOGIA PROPUESTA EN LA INVESTIGACION**

Para lograr el tratamiento y control optimo del drenaje ácido, realizamos los siguientes pasos:

1° Recolección de agua

2° Inhibición de bacterias con lauril sulfato de sodio

3° neutralización con lechada de cal

### **11.1 RECOLECCIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO**

El éxito de cualquier sistema de tratamiento depende de la capacidad para identificar, recolectar y controlar el flujo de toda agua contaminada. Se realiza una selección de un sistema de tuberías y membranas para recolectar toda la filtración y el drenaje, y también para minimizar el volumen destinado al proceso de tratamiento. El volumen de flujo a tratarse será minimizado. La recolección de escorrentía se logra mediante zanjado superficial.

### **11.2 PRE TRATAMIENTO PARA REDUCIR EL CONTENIDO DE $Fe^{3+}$**

Utilizamos los inhibidores de bacterias. Estos bactericidas serán aplicados a acumulaciones de minerales temporales y acumulaciones de residuos de roca para retrasar el comienzo de condiciones ácidas, y para reducir los costos de tratamientos de neutralización con lechada de cal, mientras otras soluciones más permanentes serán implementadas.

**TABLA 11**

Valores finales: al cabo del quinto día

| U.M.N    | PH   | Cu    | Fe     | Zn   | Pb   | As   |
|----------|------|-------|--------|------|------|------|
| Nivel 11 | 5.60 | 32.15 | 390.52 | 7.12 | 0.47 | 0.06 |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

Tomamos como base de trabajo 5 días, porque la capacidad de la poza de almacenamiento es 12 000 m<sup>3</sup>. El caudal máximo por día 1382.4 m<sup>3</sup>, por lo tanto en 5 días, el caudal total es 6 912 m<sup>3</sup>.

## **11.2 TRATAMIENTO POR NEUTRALIZACIÓN CON LECHADA DE CAL**

En las pruebas combinadas de lechada de cal y soda cáustica, se hicieron un ajuste de pH, con el criterio de obtener mejores resultados en la eliminación de los elementos metálicos presentes en estas aguas ácidas.

Para esta etapa utilizamos lechada de cal al 25% en peso con 70% de pureza. Los valores que se presentan del quinto día de inhibición, es nuestra nueva base de estudio, observamos que el pH es mayor y los metales se encuentran en menor concentración con respecto a nuestros datos iniciales.

En el apéndice 3. se muestran todas las pruebas experimentales.

**TABLA 12**

**PRUEBAS EXPERIMENTALES DE NEUTRALIZACION**

| N° PRUEBA | PH    | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | Ar   | velocidad de sed. (cm./min) | %Lodo Cal 25%(L/m3) | Lechada de Cal 25%(L/m3) | Consumo de Cal(Kg/m3) | Consumo NaOH(Kg/m3) | Costo de Cal (\$/m3) | Costo de NaOH(\$/m3) |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1         | 6.500 | 0.120 | 0.860 | 0.236 | 0.1< | 0.1< | 0.56                        | 24.00               | 5.00                     | 1.25                  | 0.00                | 0.175                | 0.000                |
| 2         | 7.550 | 0.090 | 0.062 | 0.200 | 0.1< | 0.1< | 0.84                        | 18.00               | 5.00                     | 1.25                  | 0.08                | 0.175                | 0.041                |
| 3         | 8.700 | 0.065 | 0.043 | 0.185 | 0.1< | 0.1< | 0.57                        | 22.00               | 7.00                     | 1.75                  | 0.00                | 0.245                | 0.000                |
| 4         | 9.700 | 0.020 | 0.006 | 0.120 | 0.1< | 0.1< | 0.89                        | 15.00               | 7.00                     | 1.75                  | 0.08                | 0.245                | 0.041                |

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

Composición Química: ppm

Concentración de la lechada de cal = 25% (en peso)

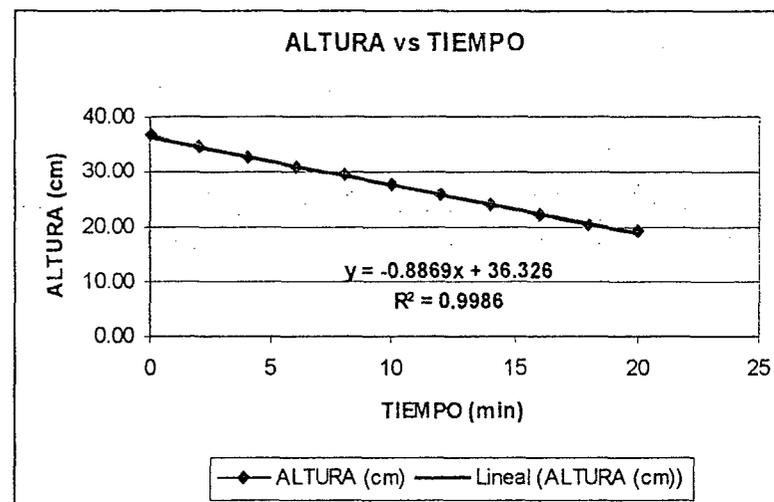
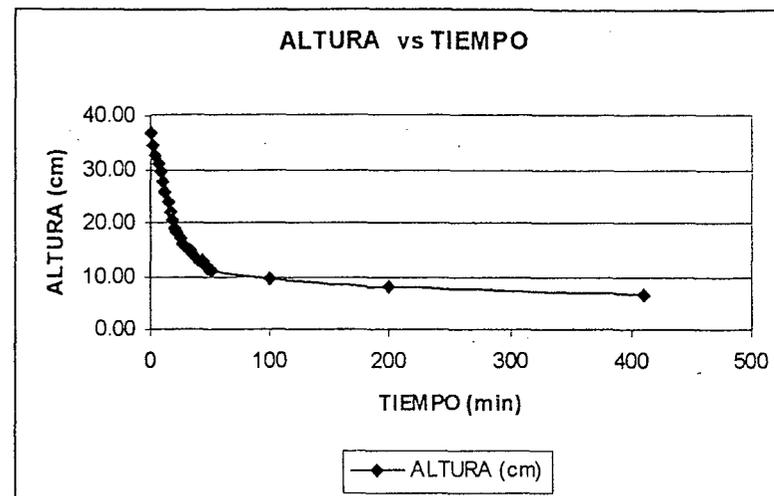
Concentración del hidróxido de sodio = 10 Molar

### PRUEBA N° 4

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 15.00      |
| 2           | 34.50      | 32          | 14.55      |
| 4           | 32.50      | 34          | 14.05      |
| 6           | 31.00      | 36          | 13.60      |
| 8           | 29.45      | 38          | 13.20      |
| 10          | 27.50      | 40          | 12.80      |
| 12          | 25.60      | 42          | 12.68      |
| 14          | 23.70      | 44          | 12.53      |
| 16          | 21.88      | 46          | 11.81      |
| 18          | 20.30      | 48          | 11.48      |
| 20          | 19.00      | 50          | 11.10      |
| 22          | 18.00      | 100         | 9.47       |
| 24          | 17.00      | 200         | 7.80       |
| 26          | 16.00      | 410         | 6.24       |
| 28          | 15.50      |             |            |

Grafica 4



## XII. ANALISIS DE LOS METODOS EMPLEADOS EN LA INVESTIGACION

Antes de desarrollar las posibilidades de tratamiento es importante fijar los objetivos finales de calidad que se pretenden, en función de parámetros como pH, concentración de los metales tales como plomo, cobre, zinc, fierro y arsénico determinados iones, etc. Estos objetivos pueden establecerse en función de la normativa de aguas vigente en la Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA) del Ministerio de Energía y Minas (MEM) mediante Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996), donde presenta los LMP de los afluentes mineros-metalúrgicos, o bien en términos de porcentaje de descontaminación o de reducción de la concentración de los parámetros que se consideren más significativos con respecto a su situación inicial.

Para alcanzar los estándares de calidad de agua, se debe hacer un óptimo tratamiento de las aguas residuales que requiere una inversión sin recuperación pero si de mucho valor en lo que respecta a la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible; tal es así que hoy en día es una obligación cumplir con los requerimientos para la descarga al medio ambiente ya que cada vez son mas estrictos las leyes ambientales.

Para optimizar los resultados de tratamiento y minimizar el riesgo de fracaso, es conveniente seguir un esquema metodológico de trabajo que tome en consideración todos los factores que pueden influir:

**A.-** caracterización de las aguas y de la zona de actuación, pues esto nos permite obtener un conocimiento adecuado sobre:

- ▶ El caudal medio de las aguas a tratar y su variabilidad a lo largo del año hidrológico.
- ▶ La composición química de las aguas, al menos, con respecto a los principales elementos y compuestos que condicionan las posibilidades de tratamiento.

B.- La selección del sistema, el dimensionamiento y diseño,

C.- Control y mantenimiento.

Luego de mostrar los resultados de las diversas proporciones de dosificación, se proseguirá a seleccionar la que mejor se adecue a nuestras necesidades de descontaminación desde el punto de vista técnico y económico, ya que todas las alternativas con respecto a niveles de metales están dentro de los LMP establecidos en la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996).

La velocidad de sedimentación, se ha calculado graficando Altura vs. Tiempo en la cual se muestra una curva descendente con tendencia a ser constante en el tiempo, posteriormente se linealiza la sección curva descendente de la grafica tomando la pendiente de la ecuación lineal.

Sabemos que la velocidad esta representada por la diferencial de la altura con respecto al tiempo:

$$V = \frac{dx}{dt} = m$$

De los gráficos presentados observamos que la variación de la altura se hace constante en el tiempo, por lo que decimos que en el tiempo  $t=T$  infinito, tendremos una variación de altura con tendencia a cero  $dt \rightarrow 0$ .

Cuando se tomo los tiempo en intervalos pequeños se nota claramente la variación (disminución) de la altura de los sedimentos, pero llegado a un tiempo "T" este sedimento se va haciendo mas compacto y permanece constante en el tiempo, por tal motivo a periodos grandes de tiempo la variación de la altura es casi nula.

## 12.1 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL METODO POR NEUTRALIZACION CON LECHADA DE CAL

### 12.1.1 ANALISIS DE LA ALTERNATIVA I

#### LECHADA DE CAL (25%) PREPARADO CON AGUA POTABLE

De los resultados de la Tabla 5, se deduce lo siguiente:

Si de costos se trata definitivamente la prueba N°1 es la mas económica, pero desde el punto de vista técnico y económico, elegimos la prueba N°2, porque se tiene, menor porcentaje de lodos y presenta una mayor velocidad de sedimentación con respecto a la prueba N°1.

Por los motivos ya explicados se determinó que la prueba N° 2 es la más adecuada técnica y económicamente.

|                       |   | COSTO (\$/m <sup>3</sup> )       |
|-----------------------|---|----------------------------------|
| Prueba N° 1           | : | 0.336                            |
| Prueba N° 2           | : | 0.342                            |
| Diferencias de Costos | = | <hr/> 0.006 (\$/m <sup>3</sup> ) |

### 12.1.2 ANALISIS DE LA ALTERNATIVA II

#### LECHADA DE CAL (25%) PREPARADO CON AGUA DE MINA

De los resultados de la tabla 6, se deduce lo siguiente: Aquí se tiene dos alternativas la N° 1 y la N° 5.

Elegimos la prueba N° 5, porque desde el punto de vista técnico y económico, aquí se obtiene, menor porcentaje de lodos y presenta una mayor velocidad de sedimentación con respecto a la prueba N° 1.

Por los motivos ya explicados se determinó que la prueba N° 5 es la más adecuada técnica y económicamente.

|                       |   | COSTO (\$/m <sup>3</sup> )     |
|-----------------------|---|--------------------------------|
| Prueba N° 5           | : | 0.426                          |
| Prueba N° 1           | : | 0.409                          |
| Diferencias De Costos | = | <u>0.017(\$/m<sup>3</sup>)</u> |

### 12.1.3 EVALUANDO LAS ALTERNATIVAS I y II

**Características de los reactivos:**

**Calcio**

Pureza: 70%

Tipo: industrial

**Sodio**

Pureza: 98%

Tipo: industrial

**a) Consumo de Reactivos: Cal**

|                       |   | Cal Kg/m <sup>3</sup>        |
|-----------------------|---|------------------------------|
| Alternativa I         | : | 2.15                         |
| Alternativa II        | : | 2.75                         |
| Diferencia de Consumo | = | <u>0.60 Kg/m<sup>3</sup></u> |

### b) Consumo de Reactivos: Hidróxido de Sodio

|                |   | NaOH Kg/m <sup>3</sup> |
|----------------|---|------------------------|
| Alternativa I  | : | 0.08                   |
| Alternativa II | : | 0.08                   |

Con respecto al consumo del hidróxido de sodio, se utiliza las mismas Cantidades en ambas alternativas.

### c) Costos Total de Reactivos: Cal e Hidróxido de Sodio

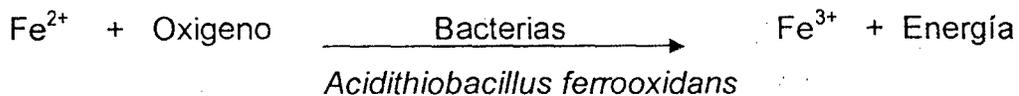
|                      |   | Costo Total (\$/m <sup>3</sup> ) |
|----------------------|---|----------------------------------|
| Alternativa I        | : | 0.342                            |
| Alternativa II       | : | 0.426                            |
| Diferencia de Costos | = | <hr/> 0.084Kg/m <sup>3</sup>     |

Evaluando las dos alternativas de neutralización, elegimos la alternativa II, debido que el costo total de operación es menor, porque se prepara la lechada de cal con la misma agua ácida y además por la disponibilidad inmediata y cercana de la misma a diferencia del agua potable que implicaría costo en su tratamiento y transporte, hasta la planta de tratamiento de agua.

Otras de las ventajas de esta alternativa es que, la lechada presenta una menor densidad, por lo tanto su flujo es de fácil manejo y no dificulta en la operación. Densidad I (Agua Potable) es 1450.0 gr. /L y Densidad II (Agua de Mina) es 900.0 gr. /L

## 12.2 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL METODO POR INHIBICION DE BACTERIAS

El hierro soluble promueve el crecimiento de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, bacterias autotróficas en los sistemas de distribución, las cuales oxidan el hierro ferroso  $Fe^{+2}$  en hierro ferrico  $Fe^{+3}$  insoluble, formando lamas de color rojizo.



Estas bacterias aumentan enormemente la tasa de producción de acidez de materiales piríticos. Los bactericidas han sido desarrollados para inhibir el crecimiento de estos microorganismos. Su efecto primario es minimizar el rol catalítico de las bacterias que permiten convertir el hierro ferroso en hierro férrico, bajo condiciones ácidas (donde el hierro férrico es el principal oxidante), rompiendo las cadenas de reacciones bioquímicas que aumentan la tasa de oxidación de residuos mineros.

El pH del medio, influye en el equilibrio del sistema hierro ferroso/hierro férrico, ya que a pH bajo, el hierro férrico actúa como un oxidante poderoso, el cual sucesivamente, puede atacar otros minerales sulfurados, incrementando la velocidad de oxidación del sulfuro y la generación de productos de oxidación.

Las aguas y los desechos de roca sulfuradas, contienen poblaciones bacteriales que utilizan la energía producida, a través de la oxidación de compuestos reducidos de azufre, o de iones metálicos, y así pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren algunas reacciones, incrementando con ello la velocidad de generación de ácido y la velocidad de lixiviación de metales pesados. Estas bacterias se desarrollan en los residuos a un cierto valor de pH y de  $T^{\circ}$ . La oxidación continua consiste en la producción de iones hidrógeno

(H<sup>+</sup>) y la consiguiente disminución del pH, hasta un valor adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro ferroso; la producción de hierro férrico y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, da por resultado condiciones ideales para el desarrollo de colonias de estas bacterias, estas bacterias actúan por contacto directo y mientras más fino sea el residuo, mayor es el número de sitios donde la bacteria puede fijarse.

Los resultados de la aplicación de bactericidas en el control del drenaje ácido de mina en diferentes puntos del asiento minero, se ha comprobado que:

- Previene la formación de ácido y la lixiviación de metales,
- Se disminuye drásticamente la presencia de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

### 12.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS DEL METODO PROPUESTO

Los valores que se presentan del quinto día de inhibición, es nuestra nueva base de estudio, observamos que el pH es mayor y los metales se encuentran en menor concentración con respecto a nuestros datos iniciales.

El fierro total presente en las aguas ácidas representa una forma de medir la acción del bactericida disminuyendo el grado de acidez, la notación es clara en cuanto a la disminución del Fe<sup>3+</sup> y el aumento del Fe<sup>2+</sup>, debido al efecto del bactericida, puesto que retrasa y disminuye oxidación del Fe<sup>3+</sup>.

De acuerdo a las pruebas realizadas, solo serán aplicados en acumulaciones de minerales temporales, acumulaciones de residuos de roca para retrasar el comienzo de condiciones ácidas, para reducir los costos de tratamientos.

**TABLA 13**

**COMPARACION DE RESULTADOS**

| N° PRUEBA                          | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | Ar    | Velocidad de Sed. (cm./min) | %Lodo | Costo Cal <sub>3</sub> (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) | costo total |
|------------------------------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|---|---------------------------------|-------------|
| Método de neutralización existente | 8.00 | 0.278 | 0.061 | 0.234 | 0.1< | 0.010 | 0.81                        | 18.00 | 0.385                                       | 0.041                           | 0.426       |
| Método de neutralización propuesto | 9.70 | 0.020 | 0.006 | 0.120 | 0.1< | 0.1<  | 0.89                        | 15.00 | 0.245                                       | 0.041                           | 0.325       |

Composición química: ppm

*Fuente: elaboración propia*

Estos resultados indican que la inhibición directa del agente causante puede ser el método más eficaz para controlar el drenaje ácido de mina, seguido de un tratamiento activo, esta combinación resulta bastante eficaz.

**Valores LMP, estipulados por la ley.**

| PH    | Cu  | Pb   | Zn  | Fe  | As  |
|-------|-----|------|-----|-----|-----|
| 6 - 9 | 1.0 | 0.40 | 3.0 | 2.0 | 1.0 |

Composición química pmm

*Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)*

Utilizando como tratamiento previo a los bactericidas, se logra minimizar mucho más el nivel de metales, por ende los metales se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles, asegurando la calidad del agua tratada, también

notamos claramente que se logra menor cantidad de lodos, y la velocidad de sedimentación es mucho mayor.

Económicamente los costos son los siguientes:

A: Método de neutralización existente: 0.4260 \$/ m<sup>3</sup>

B: Método de neutralización propuesto: 0.5208 \$/ m<sup>3</sup>

(Costo total)

|                      | Costo Total (\$/m <sup>3</sup> )  |
|----------------------|-----------------------------------|
| Alternativa A        | : 0.4260                          |
| Alternativa B        | : 0.5208                          |
| Diferencia de Costos | = <u>0.0948 \$/ m<sup>3</sup></u> |

En general realizando la integración con plantas de cal, resultan particularmente efectivas cuando se integra a una planta de cal pre-existente. Para determinar los días en el cual se realizara la neutralización con lechada de cal, será de acuerdo al mínimo y máximo caudal del drenaje ácido y considerando también la capacidad de almacenamiento de la poza.

### **XIII. RECOMENDACIONES**

1. La composición y el PH del agua de mina se vera alterada, en tiempos de fuerte lluvia, esto es un factor desorganizador en una planta de tratamiento de aguas. Por lo tanto se debe ajustar las dosificaciones químicas de acuerdo con la calidad del agua efluente. Esto impone dificultades en los operadores de la planta de tratamiento por lo que se requiere atención constante en el análisis y control de las aguas residuales.
2. Donde es imposible evitar la oxidación de los sulfuros, la estrategia preferible es aislar los materiales que entrañan mayor riesgo y retener los productos de la oxidación para minimizar el daño ambiental. La opción menos deseable es tratar los drenajes ácidos resultantes y corregir los impactos que éstos generen.
3. La mejor solución es la prevención, para ello es preciso que la planificación de la mina tome en consideración este factor, de manera de incorporar soluciones desde la fase del proyecto. Estas soluciones preventivas parten inicialmente de la identificación del potencial generador de drenaje ácido. Hoy en día ya existen softwares (sistemas especializados) para la planificación del muestreo con la finalidad de estudiar el potencial de drenaje ácido.
4. Es conveniente tomar muestras de agua en puntos representativos y Proceder a su análisis. Como mínimo deberían situarse puntos de toma de muestras en la entrada y la salida de cada una de las unidades que componen la secuencia de tratamiento y continuar este seguimiento durante un año, por lo menos.

## XIV. CONCLUSIONES

1. Se Realizo el diagnostico y se identifico los puntos críticos de generación del drenaje ácido de mina.

Se efectuaron muestreos, para detectar los puntos críticos de generación del drenaje ácido, pues lo minerales sulfurosos están en todas partes del ambiente geológico y las áreas en las cuales las rocas sulfurosas han sido removidos, disturbados hasta llegar a la superficie expuesta al aire y al agua que aceleran la velocidad de generación de aguas ácidas y ocasionar un impacto en el ambiente.

- ▶ Las pilas de lixiviación : Nivel 1, Nivel 2, Nivel 3
- ▶ Los embalses de relaves : Nivel 4 y Nivel 5, Nivel 6
- ▶ Las rocas descubiertas : Nivel 7, Nivel 8,
- ▶ Las pilas de desmonte : Nivel 9 y Nivel 10

2. Se estudiaron los métodos de tratamiento del drenaje ácido.

- ▶ Inhibición bacteriana , se utilizo el lauril sulfato de sodio
- ▶ Neutralización , se realizo con lechada de Cal

El método empleado en la presente investigación dio mejores resultados que los métodos ya existentes. Se optimizó el tratamiento del drenaje ácido. Para lograr los mejores resultados de tratamiento, es preferible, utilizar los distintos sistemas de forma combinada y secuencial, incluyendo unidades de pretratamiento y tratamiento.

3. Seleccionamos y evaluamos los métodos más efectivos desde el punto de vista técnico y económico:

### **Desde el punto de vista técnico**

Se determinaron y evaluaron las condiciones de operación de Neutralización cal/soda y coagulación, se logro la eliminación y reducción de los elementos metálicos presentes en el agua de mina cumpliendo con los LMP, como lo estipula la ley.

El pH, es un parámetro muy importante en el proceso de neutralización y coagulación, ya que afecta la solubilidad de los precipitados formados por el hierro. El pH, influye en el equilibrio del sistema hierro ferroso/hierro férrico, ya que a pH bajo, el hierro férrico actúa como un oxidante poderoso, el cual sucesivamente, puede atacar otros minerales sulfurados, incrementando la velocidad de oxidación del sulfuro y la generación de productos de oxidación.

### **Desde el punto de vista económico**

Respecto a los costos, la alternativa II es ligeramente mayor pero es justificable porque se logra mejores condiciones con respecto al costo total de operación.

Diferencia de costos de reactivos (Alternativa A y B): 0.0948 \$/m<sup>3</sup>

Se optimizaron el consumo de reactivos: lechada de cal al 25% en peso y soda cáustica de concentración 10 molar.

- ▶ En La Alternativa A, el consumo optimo fue de 2.75 Kg. Cal / m<sup>3</sup> y 0.08 Kg. NaOH / m<sup>3</sup>
- ▶ En La Alternativa B, el consumo óptimo fue de 1.75 Kg. Cal / m<sup>3</sup> y 0.08 Kg. NaOH / m<sup>3</sup> y 0.0868 Kg. bactericida / m<sup>3</sup>.

Diferencia de consumo de cal (Alternativa I y II): 1.00 Kg. Cal / m<sup>3</sup>

4. Para realizar una buena gestión ambiental de los residuos sulfurosos es necesario determinar el riesgo de generación de aguas ácidas existente en la mina, caracterizar y clasificar todos los estériles que van a generarse y, en función de ello, desarrollar estrategias para minimizar la oxidación de los minerales reactivos.
5. Debido a que la inhibición de bacterias, es sólo una solución a corto plazo, se hace necesario que las bactericidas trabajen en forma conjunta con la neutralización con lechada de cal, para lograr un planteamiento integral del manejo de residuos sulfurados.

## XV. BIBLIOGRAFIA

- 1) CEPIS, "Manual de Disposición de Aguas Residuales", Lima 1991
- 2) DANIEL F. DÁVILA, JANET QUIÑONES, LUIS PUENTES SANTIBÁÑEZ y colaboradores, "Simulación de la Producción y Remediación de Aguas Provenientes del Drenaje de Rocas Ácidas", Revista del Instituto de Investigación de La Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, Lima- Perú 2001
- 3) JAIRO ALBERTO ROMERO ROJAS, "Calidad del Agua", Edit. Escuela Colombiana, 2da Edición, Colombia 1998
- 4) LÓPEZ PAMO E, "Tratamientos Pasivos de Drenaje Ácidos de Mina", Boletín Geológico y Minero, España- 2002
- 5) LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ, "El Curso de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental", Volumen I UNESCO- Brasil 1995
- 6) MERCEDES HINOJOSAS CARRASCO, "Drenaje Acido de San Quitín: Estudio y Alternativas de Remediación, España Tesis, 2002
- 7) MSC. RAÚL A. TOLMOS, "Minería y Medio Ambiente en el Perú"
- 8) Centro de Investigación para el Medio Ambiente (CIPMA), Lima 2000
- 9) TINLIN, R. M.; MEYER, C. F., y KLEINECKE, D. C., Monitoring ground water quality. Annual Fall Meeting American Institute Mining Engineers, Pittsburgh, 1973, 11 págs.
- 10) U. S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA), Processes, procedures, and methods to control pollution from mining activities, EPA-403/9.73, 390 págs.
- 11) Singer, P.C. & Stumm, W. (1970). Acidic mine drainage: The rate-determining step. Science 167, 1121-1123.
- 12) Thornber M. R. & Wildman, J.E. (1984). Supergene alteration of sulphides VI: The binding of Cu, Ni, Zn, Co, and Pb. Chem. Geol. 44, 399-434
- 13) Thornber, M.R. (1985). Supergene alteration of sulphides. VII. Distribution of elements during the gossan-forming process. Chem. Geol. 53: 279-301.

- 14) Winland, R.L., Traina, S.J., Bigam, J.M. (1991). Chemical composition of ochreous precipitates from Ohio coal mine drainage. *J. Environ. Qual.* 20, 452-460.
- 15) Zachara, J.M., Girvin, D.C., Schmidt, R.L., Resch, C.T. (1987): Chromate adsorption on amorphous iron oxyhydroxide in the presence of major groundwater ions. *Environ. Sci. Technol.* 21, 589-594.
- 16) SOUZA PINTO, "Hidrológica Básica", Sao Paulo- Brasil 1976.
- 17) Kleinmann, R.L.P. (1981): Biogeochemistry of acid mine drainage and a method to control acid formation, *Min. Eng.* 33, 300-305.
- 18) Letterman R.D. & Mitsch W.J. (1978): Impact of mine drainage on a mountain stream in Pennsylvania. *Environ Pollut.* 17, 53-73.
- 19) Lawson, R.T. (1982): Aqueous oxidation of pyrite by molecular oxygen. *Chemical Reviews* 82, 461-497.
- 20) McGuinness, S. & Johnson, D.B. (1993): Seasonal variations in the microbiology and chemistry of an acid mine drainage stream. *Sci. Tot. Environ.* 132, 27-41.
- 21) Nordstrom D.K. (1982): Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. In: *Acid sulfate weathering*. Soil Science Society of America. JA Kitrick, DS Fanning & LR Hossner, eds., Madison, WI, 37-56.
- 22) Ritcey, G. M. (1986) *Tailings Management. Problems and Solutions in the Mining Industry*, 1st edn, Vol. 6, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- 23) <http://cabierta.uchile.cl/revista/20/articulos/pdf/edu3.pdf>
- 24) <http://html.rincondelvago.com/tratamiento-de-aguas-naturales.html>
- 25) <http://www.lenntech.com/espanol/coagulantes-y-floculantes.htm>
- 26) <http://www.tensoactivos.com/clasificacion-de-tensoactivos.htm>
- 27) [http://www.biohidrica.cl/BIOHIDRICA\\_InvestigacionDesarrollo.htm](http://www.biohidrica.cl/BIOHIDRICA_InvestigacionDesarrollo.htm)
- 28) [http://www.forp.usp.br/restauradora/temas\\_endo/temas\\_cast/solu\\_cast.html](http://www.forp.usp.br/restauradora/temas_endo/temas_cast/solu_cast.html)
- 29) <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/MAM9.htm>
- 30) <http://andes.miningwaych.org/org/andes/espanol/guia/capitulo-2.htm>

1.1 NEUTRALIZACIÓN: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA POTABLE

PRUEBA # 1

PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
 Velocidad de Agitación : 300 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
 Velocidad de Agitación : 30 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 9.6 (mL/L)

| PRUEBA.1    | pH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.50 | 0.218 | 0.298 | 0.720 | 0.1< | 0.02 | 1.45                        | 17.00 | 2.4                                 | -                                 | 0.336                             | -                                  |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

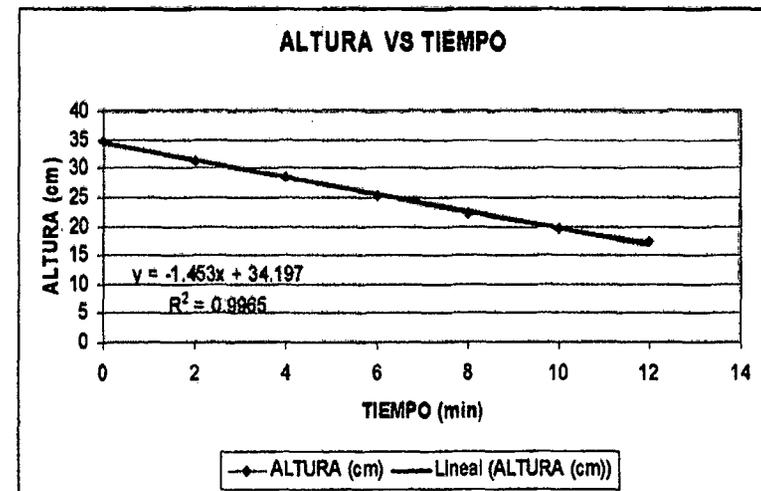
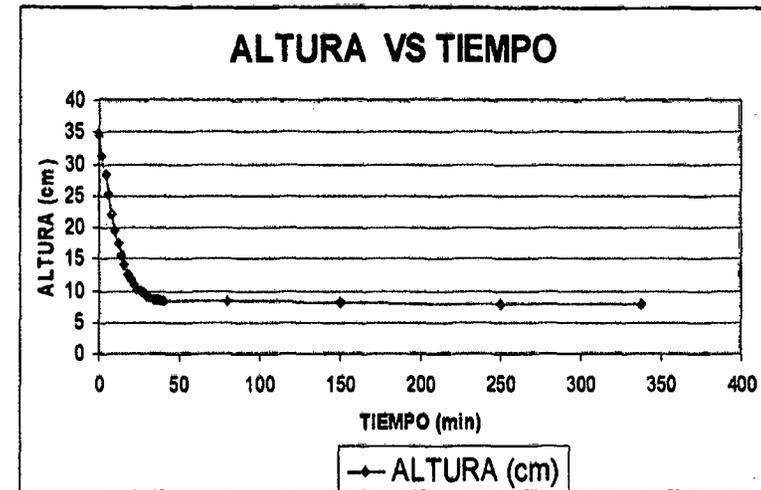
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

GRAFICA 1

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 26          | 9.86       |
| 2           | 31.28      | 28          | 9.52       |
| 4           | 28.29      | 30          | 9.18       |
| 6           | 25.16      | 32          | 8.88       |
| 8           | 22.10      | 34          | 8.70       |
| 10          | 19.58      | 36          | 8.53       |
| 12          | 17.34      | 38          | 8.48       |
| 14          | 15.47      | 40          | 8.38       |
| 16          | 13.97      | 80          | 8.30       |
| 18          | 12.58      | 150         | 8.00       |
| 20          | 11.56      | 250         | 7.92       |
| 22          | 10.88      | 338         | 7.82       |
| 24          | 10.20      |             |            |



## PRUEBA # 2

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 8.6 (mL/L)  
Soda Cáustica (10M) : 0.2 (mL/L)

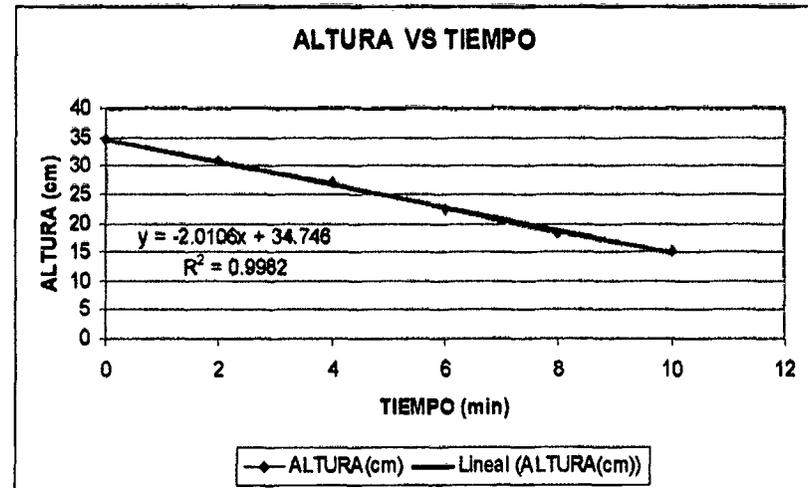
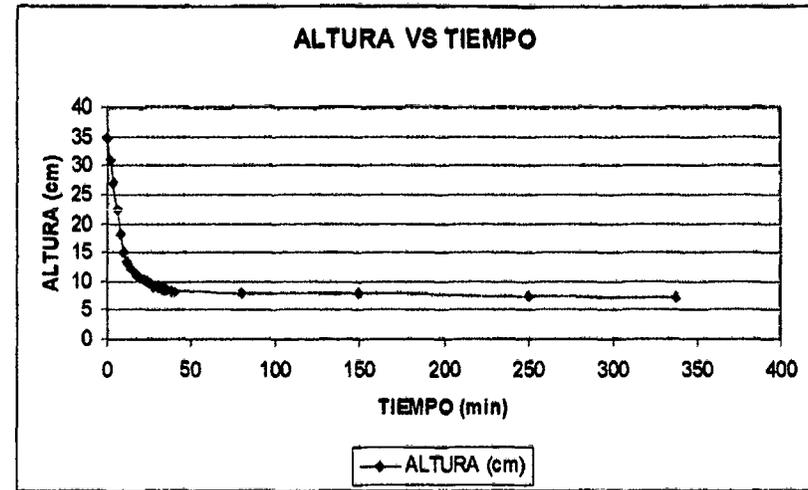
| PRUEBA 2    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As    | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08  | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.90 | 0.258 | 0.356 | 0.815 | 0.1< | 0.018 | 2.01                        | 15.00 | 8.60                                | 2.150                                | 0.08                              | 0.301                              |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0   |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
DAM: Drenaje Ácido de Mina  
Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 26          | 9.52       |
| 2           | 30.94      | 28          | 9.18       |
| 4           | 26.97      | 30          | 8.98       |
| 6           | 22.44      | 32          | 8.84       |
| 8           | 18.22      | 34          | 8.60       |
| 10          | 14.99      | 36          | 8.48       |
| 12          | 13.26      | 38          | 8.33       |
| 14          | 12.24      | 40          | 8.12       |
| 16          | 11.53      | 80          | 7.98       |
| 18          | 10.88      | 150         | 7.85       |
| 20          | 10.54      | 250         | 7.30       |
| 22          | 10.17      | 338         | 7.14       |
| 24          | 9.79       |             |            |

GRAFICA 2



### PRUEBA # 3

#### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### Dosificación

Hidróxido de Sodio : 6 (mL/L)

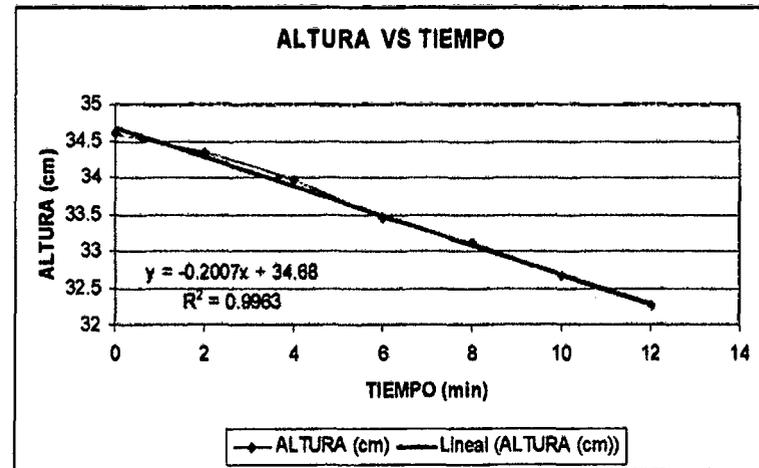
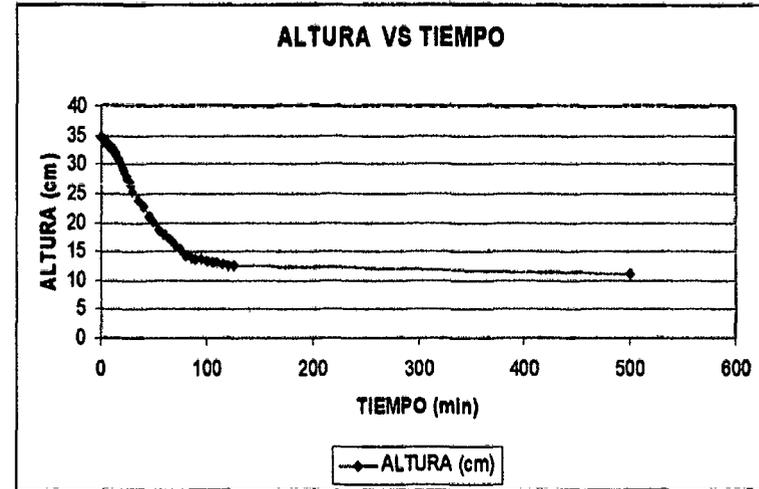
| PRUEBA 3    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As    | Velocidad Sed. (Cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|-------|--------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08  | -                        | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 7.4 | 0.158 | 0.189 | 0.564 | 0.1< | 0.012 | 0.20                     | 33.00 | -                                   | 2.40                                 | -                                 | 1.224                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0   |                          |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: r : mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
D I: Drenaje Ácido de Mina  
C iposición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 45          | 21.13      |
| 2           | 34.33      | 50          | 20.04      |
| 4           | 33.95      | 55          | 18.70      |
| 6           | 33.44      | 60          | 18.00      |
| 8           | 33.10      | 65          | 17.05      |
| 10          | 32.66      | 70          | 16.03      |
| 12          | 32.25      | 75          | 15.35      |
| 14          | 31.80      | 80          | 14.26      |
| 16          | 31.00      | 85          | 13.99      |
| 18          | 30.33      | 90          | 13.65      |
| 20          | 29.16      | 95          | 13.55      |
| 22          | 28.75      | 100         | 13.31      |
| 24          | 27.88      | 105         | 13.11      |
| 26          | 27.32      | 110         | 12.97      |
| 28          | 26.50      | 115         | 12.70      |
| 30          | 25.21      | 120         | 12.60      |
| 35          | 23.85      | 125         | 12.39      |
| 40          | 22.69      | 500         | 10.99      |

GRAFICA 3



## PRUEBA # 4

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10seg.  
Velocidad de Agitación : 30RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 10 (mL/L)

| PRUEBA 4    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 7.9 | 0.162 | 0.268 | 0.675 | 0.1< | 0.01 | 0.49                        | 20.40 | 2.500                               | -                                    | 0.350                             | -                                  |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

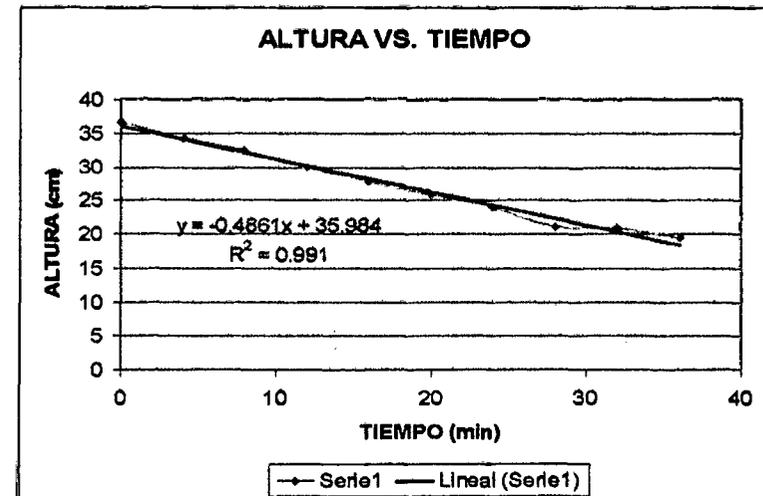
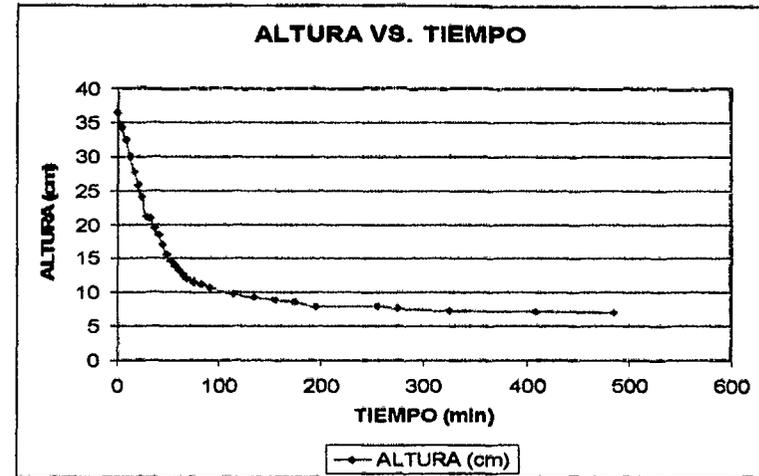
DAM: Drenaje ácido de Mina

Composición química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.50      | 64          | 12.56      |
| 4           | 34.20      | 68          | 12.02      |
| 8           | 32.40      | 74          | 11.52      |
| 12          | 29.95      | 82          | 11.16      |
| 16          | 27.72      | 90          | 10.72      |
| 20          | 25.74      | 114         | 9.68       |
| 24          | 23.90      | 134         | 9.18       |
| 28          | 21.01      | 154         | 8.93       |
| 32          | 20.89      | 174         | 8.64       |
| 36          | 19.44      | 194         | 7.99       |
| 40          | 18.44      | 254         | 7.92       |
| 44          | 17.06      | 274         | 7.63       |
| 48          | 15.48      | 324         | 7.34       |
| 52          | 14.65      | 409         | 7.20       |
| 56          | 13.96      | 484         | 7.02       |
| 60          | 13.28      |             |            |

GRAFICA 4



## PRUEBA # 5

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 9.0 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.2 (mL/L)

| PRUEBA 5    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.4 | 0.125 | 0.026 | 0.350 | 0.1< | 0.01 | 0.74                        | 17.60 | 2.250                               | 0.08                                 | 0.315                             | 0.041                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

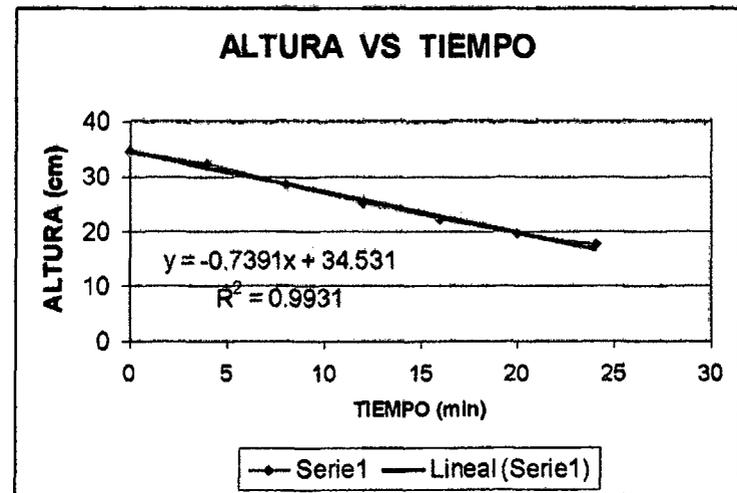
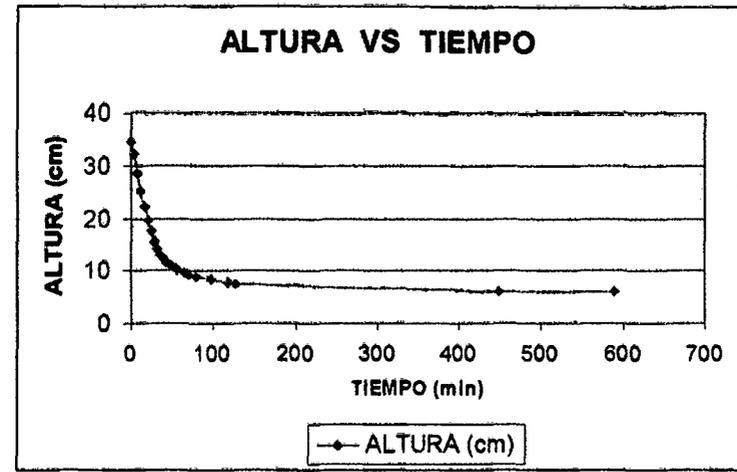
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.45      | 48          | 10.95      |
| 4           | 32.30      | 52          | 10.54      |
| 8           | 28.56      | 56          | 10.13      |
| 12          | 25.16      | 66          | 9.52       |
| 16          | 22.10      | 70          | 9.35       |
| 20          | 19.55      | 78          | 9.01       |
| 24          | 17.51      | 98          | 8.43       |
| 28          | 15.64      | 118         | 7.82       |
| 32          | 14.01      | 128         | 7.55       |
| 36          | 12.92      | 448         | 6.18       |
| 40          | 12.24      | 590         | 6.05       |
| 44          | 11.56      |             |            |

GRAFICA 5



## PRUEBA # 6

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1 L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1 L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 9.0 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.4 (mL/L)

| PRUEBA 6    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb    | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52  | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.7 | 0.068 | 0.1 < | 0.162 | 0.1 < | 0.01 | 0.49                        | 19.80 | 2.350                               | 0.16                                 | 0.329                             | 0.082                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4   | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

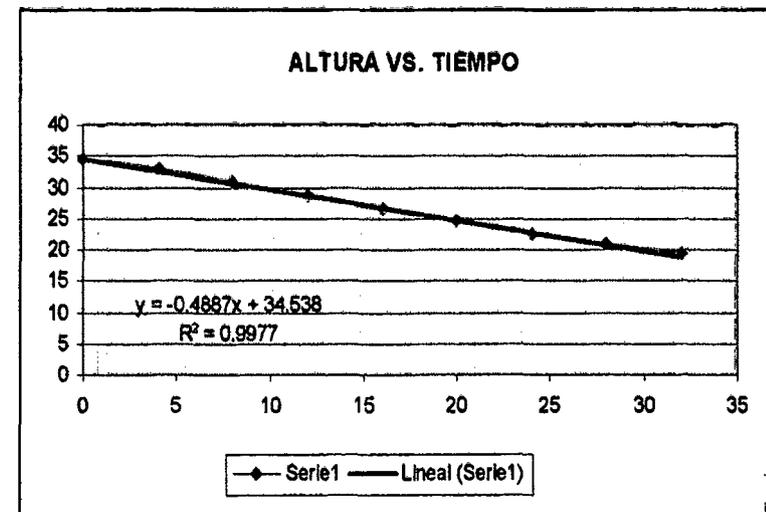
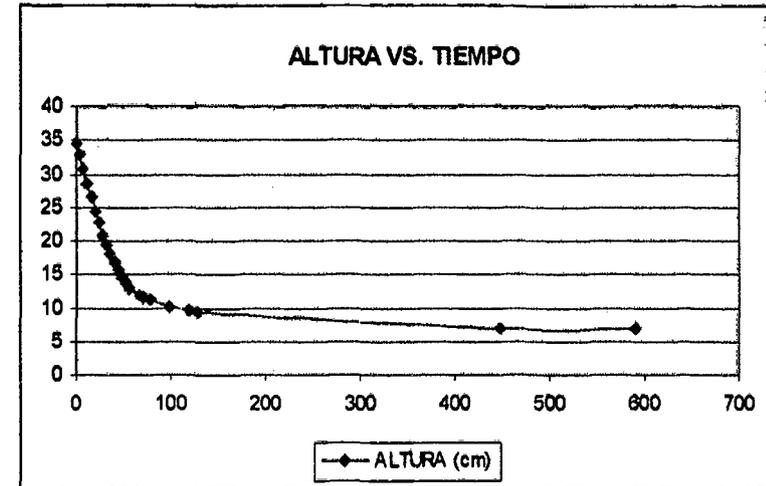
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.5       | 48          | 14.62      |
| 4           | 32.98      | 52          | 13.77      |
| 8           | 30.66      | 56          | 12.92      |
| 12          | 28.56      | 66          | 11.9       |
| 16          | 26.52      | 70          | 11.56      |
| 20          | 24.48      | 78          | 11.22      |
| 24          | 22.61      | 98          | 10.23      |
| 28          | 20.81      | 118         | 9.52       |
| 32          | 19.35      | 128         | 9.35       |
| 36          | 17.95      | 448         | 6.97       |
| 40          | 16.66      | 590         | 6.76       |
| 44          | 15.57      |             |            |

GRAFICA 6



## PRUEBA # 7

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1 L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 15seg.  
Velocidad de Agitación : 30RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1 L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 11 (mL/L)

| PRUEBA 7    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 9.1 | 0.678 | 0.018 | 0.181 | 0.1< | 0.01 | 0.40                        | 23.45 | 2.750                               | -                                    | 0.385                             | -                                  |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

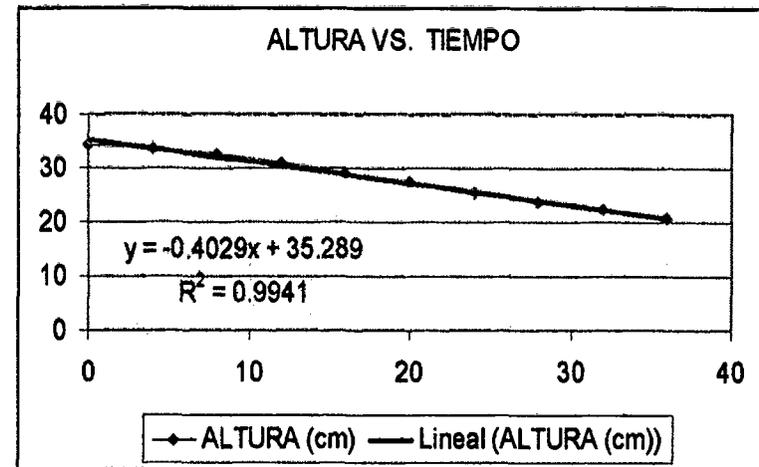
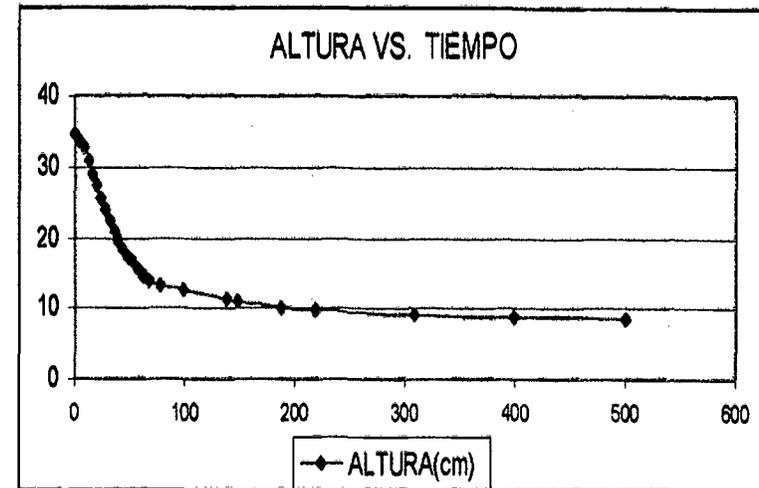
DAM : Drenaje Acido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.50      | 56          | 15.64      |
| 4           | 33.69      | 60          | 14.96      |
| 8           | 32.64      | 64          | 14.45      |
| 12          | 30.90      | 68          | 14.00      |
| 16          | 29.03      | 78          | 13.26      |
| 20          | 27.30      | 98          | 12.58      |
| 24          | 25.50      | 138         | 11.22      |
| 28          | 23.80      | 148         | 10.88      |
| 32          | 22.27      | 188         | 10.20      |
| 36          | 20.74      | 218         | 9.86       |
| 40          | 19.38      | 308         | 9.15       |
| 44          | 18.36      | 398         | 8.77       |
| 48          | 17.37      | 500         | 8.43       |
| 52          | 16.59      |             |            |

GRAFICA 7



## PRUEBA # 8

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 20 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 12 (mL/L)

| PRUEBA 8    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb    | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52  | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 10  | 0.010 | 0.1 < | 0.120 | 0.1 < | 0.01 | 0.34                        | 24.76 | 3.000                               | -                                    | 0.420                             | -                                  |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4   | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L : mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

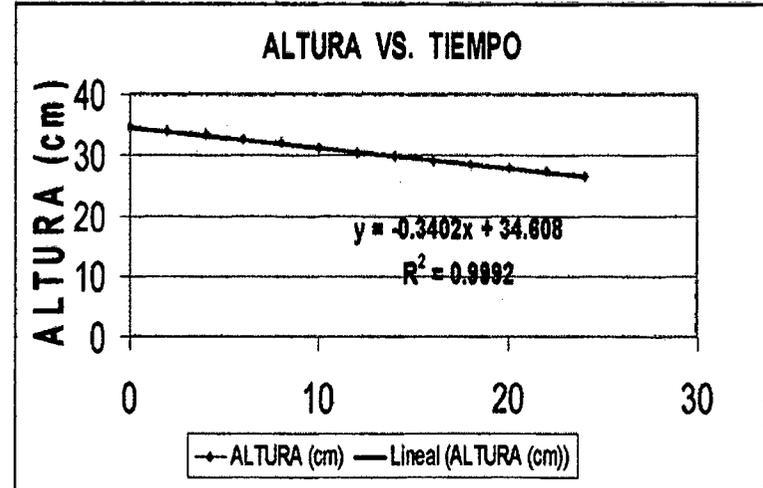
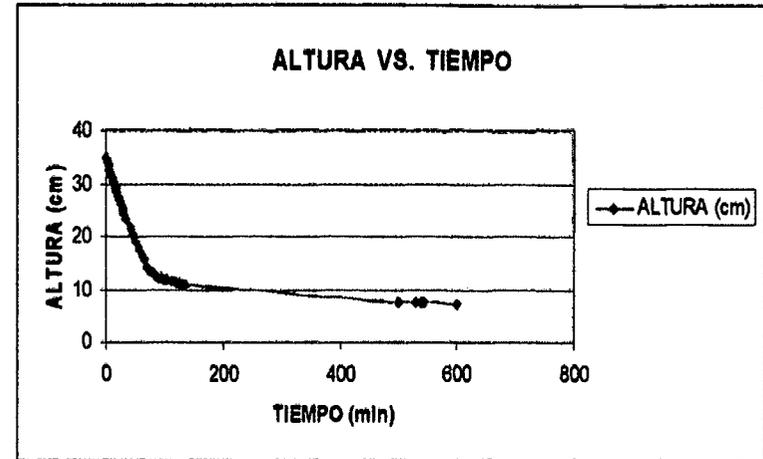
DAM : Drenaje Acido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 65          | 15.64      |
| 2           | 34.00      | 70          | 14.11      |
| 4           | 33.32      | 75          | 13.43      |
| 6           | 32.57      | 80          | 13.09      |
| 8           | 31.96      | 85          | 12.58      |
| 10          | 31.11      | 90          | 12.24      |
| 12          | 30.43      | 95          | 12.07      |
| 14          | 29.75      | 100         | 11.90      |
| 16          | 29.07      | 105         | 11.73      |
| 18          | 28.46      | 110         | 11.53      |
| 20          | 27.85      | 115         | 11.36      |
| 22          | 27.20      | 120         | 11.22      |
| 24          | 26.52      | 125         | 11.02      |
| 26          | 25.84      | 130         | 10.85      |
| 28          | 25.16      | 135         | 10.74      |
| 30          | 24.55      | 140         | 7.65       |
| 35          | 23.12      | 500         | 7.55       |
| 40          | 21.59      | 530         | 7.48       |
| 45          | 20.23      | 540         | 7.45       |
| 50          | 18.87      | 545         | 7.44       |
| 55          | 17.68      | 600         | 7.22       |
| 60          | 16.60      |             |            |

GRAFICA 8



## 1.2 NEUTRALIZACIÓN: LECHADA DE CAL PREPARADO CON AGUA DE MINA

### PRUEBA # 1

#### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
 Velocidad de Agitación : 300 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

#### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
 Velocidad de Agitación : 30 RPM  
 Volumen de Muestra de Agua : 1L  
 Temperatura : 11-13°C

#### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 10.5 (mL/L)  
 Soda Caustica (10M) : 0.20 (mL/L)

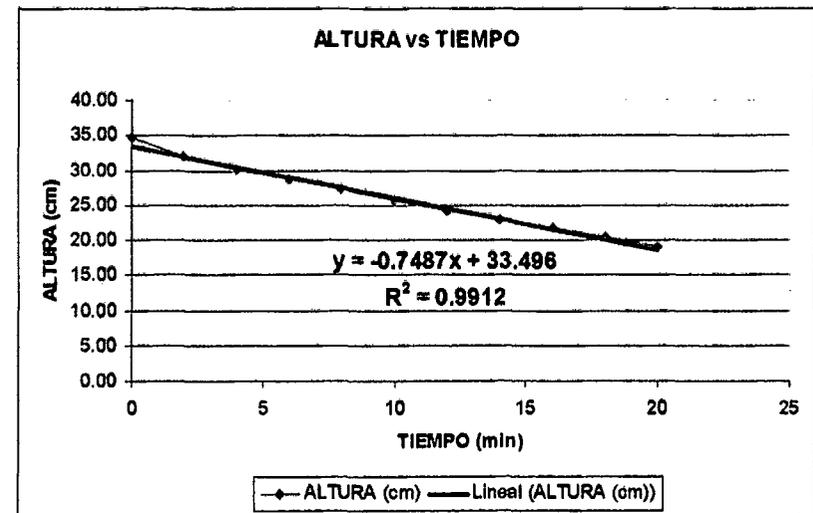
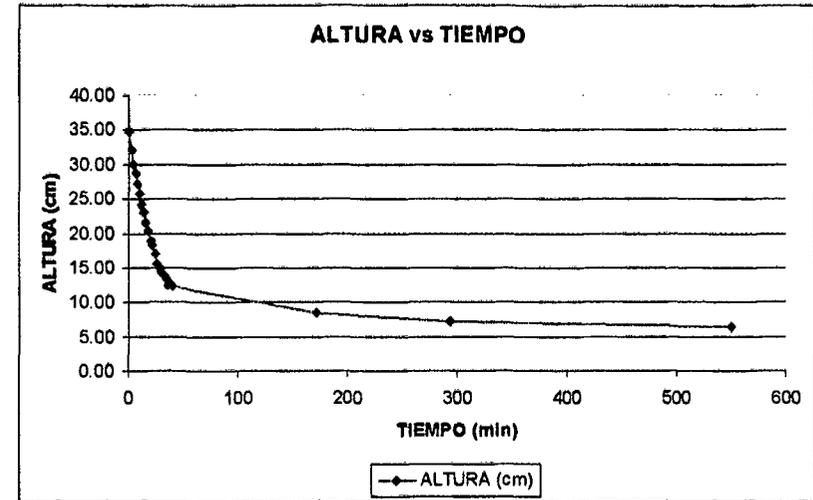
| PRUEBA 1    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As    | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08  | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.10 | 0.312 | 0.985 | 0.314 | 0.1< | 0.014 | 0.75                        | 19.00 | 2.625                               | 0.08                              | 0.368                             | 0.041                              |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0   |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
 DAM: Drenaje Ácido de Mina  
 Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.60      | 24          | 17.07      |
| 2           | 31.96      | 26          | 15.64      |
| 4           | 30.04      | 28          | 14.96      |
| 6           | 28.73      | 30          | 14.42      |
| 8           | 27.13      | 32          | 13.94      |
| 10          | 25.67      | 34          | 13.26      |
| 12          | 24.13      | 36          | 12.58      |
| 14          | 22.95      | 38          | 12.51      |
| 16          | 21.62      | 40          | 12.24      |
| 18          | 20.40      | 172         | 8.50       |
| 20          | 18.87      | 294         | 7.14       |
| 22          | 18.16      | 550         | 6.46       |

GRAFICA 1



## PRUEBA # 2

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 20 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 11.5 (mL/L)

| PRUEBA 2    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As    | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|-------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08  | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 6.58 | 0.320 | 0.108 | 0.298 | 0.1< | 0.012 | 0.52                        | 19.00 | 2.875                               | -                                 | 0.403                             | -                                  |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0   |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

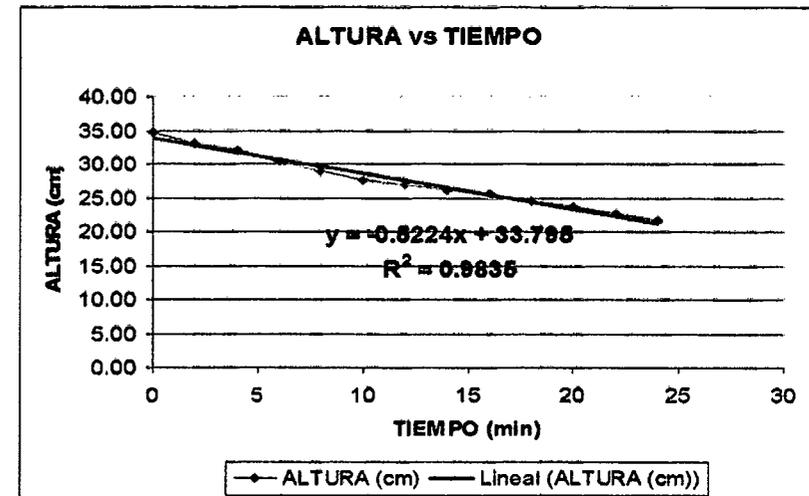
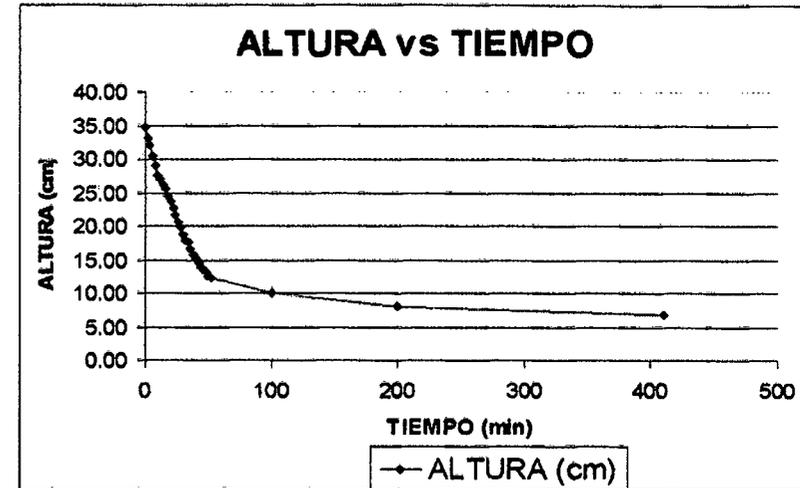
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.70      | 30          | 18.70      |
| 2           | 33.15      | 32          | 17.70      |
| 4           | 31.96      | 34          | 17.55      |
| 6           | 30.43      | 36          | 16.46      |
| 8           | 28.90      | 38          | 15.78      |
| 10          | 27.60      | 40          | 15.13      |
| 12          | 26.98      | 42          | 14.45      |
| 14          | 26.18      | 44          | 13.94      |
| 16          | 25.42      | 46          | 13.53      |
| 18          | 24.58      | 48          | 13.09      |
| 20          | 23.74      | 50          | 12.55      |
| 22          | 22.61      | 52          | 12.24      |
| 24          | 21.59      | 100         | 10.10      |
| 26          | 20.54      | 200         | 8.00       |
| 28          | 19.72      | 410         | 6.68       |

GRAFICA 2



### PRUEBA # 3

#### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 12 (mL/L)

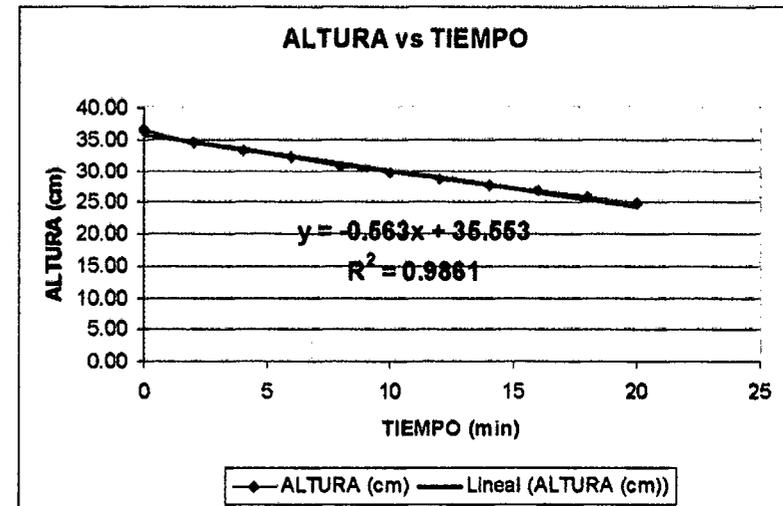
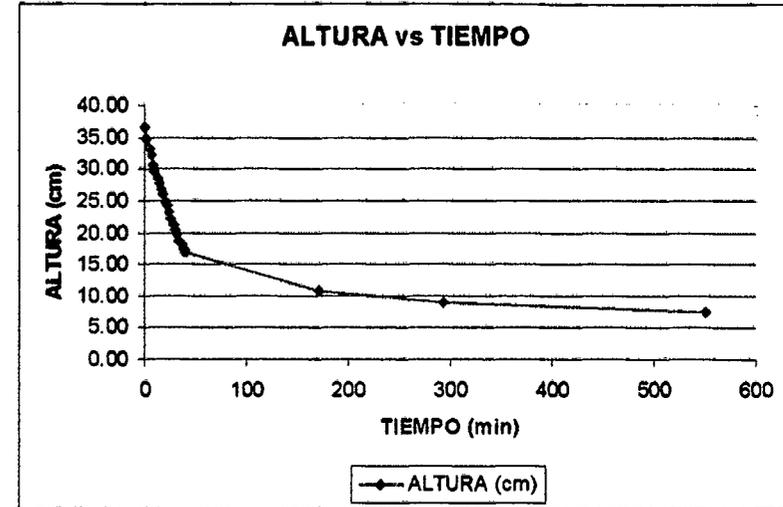
| PRUEBA 3    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 7.00 | 0.298 | 0.092 | 0.286 | 0.1< | 0.01 | 0.56                        | 21.00 | 3.000                               | -                                    | 0.420                             | -                                  |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina  
DAM: Drenaje Ácido de Mina  
Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.50      | 24          | 23.18      |
| 2           | 34.55      | 26          | 22.11      |
| 4           | 33.20      | 28          | 21.17      |
| 6           | 32.18      | 30          | 20.34      |
| 8           | 30.59      | 32          | 19.62      |
| 10          | 29.50      | 34          | 18.72      |
| 12          | 28.60      | 36          | 18.00      |
| 14          | 27.70      | 38          | 17.28      |
| 16          | 26.78      | 40          | 16.92      |
| 18          | 25.88      | 172         | 10.80      |
| 20          | 24.84      | 294         | 9.00       |
| 22          | 24.12      | 550         | 7.34       |

GRAFICA 3



#### PRUEBA # 4

#### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 15 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

#### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 12.5 (mL/L)

| PRUEBA 4    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m3) | Consumo NaOH (Kg/m3) | Costo de Cal (\$/m3) | Costo de NaOH (\$/m3) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                      | -                    | -                    | -                     |
| DAM final   | 7.43 | 0.292 | 0.083 | 0.278 | 0.1< | 0.01 | 0.35                        | 22.00 | 3.125                  | -                    | 0.438                | -                     |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                        |                      |                      |                       |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

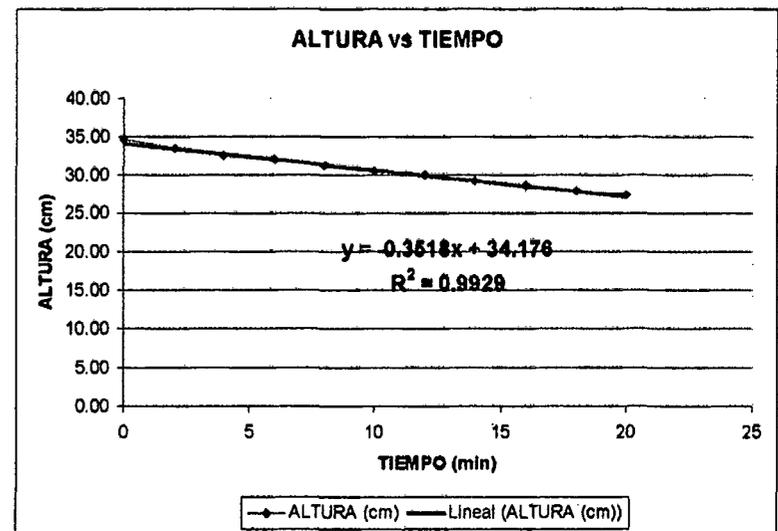
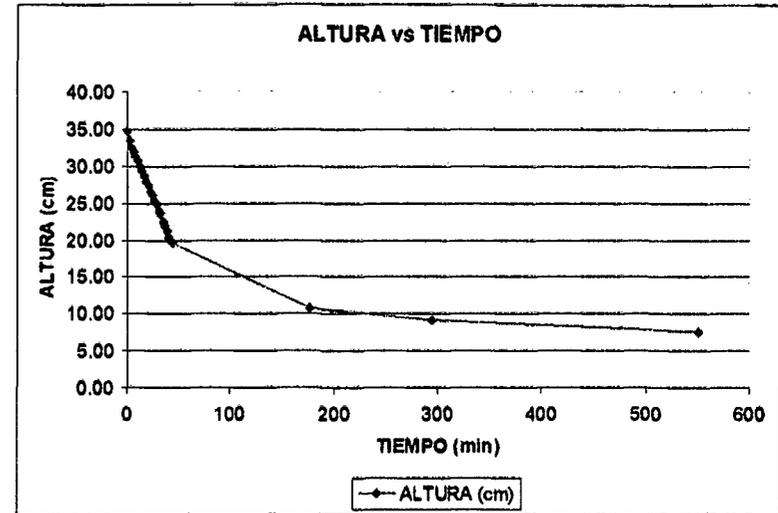
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.66      | 26          | 25.26      |
| 2           | 33.42      | 28          | 24.68      |
| 4           | 32.47      | 30          | 23.77      |
| 6           | 31.91      | 32          | 23.43      |
| 8           | 31.28      | 34          | 22.44      |
| 10          | 30.60      | 36          | 21.93      |
| 12          | 29.92      | 38          | 21.08      |
| 14          | 29.24      | 40          | 20.23      |
| 16          | 28.56      | 42          | 19.72      |
| 18          | 27.88      | 44          | 19.55      |
| 20          | 27.30      | 176         | 10.71      |
| 22          | 26.55      | 294         | 9.18       |
| 24          | 25.94      | 550         | 7.48       |

GRAFICA 4



## PRUEBA # 5

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 11.0 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.20 (mL/L)

| PRUEBA 5    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.0 | 0.278 | 0.061 | 0.234 | 0.1< | 0.01 | 0.81                        | 18.00 | 2.750                               | 0.08                                 | 0.385                             | 0.041                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

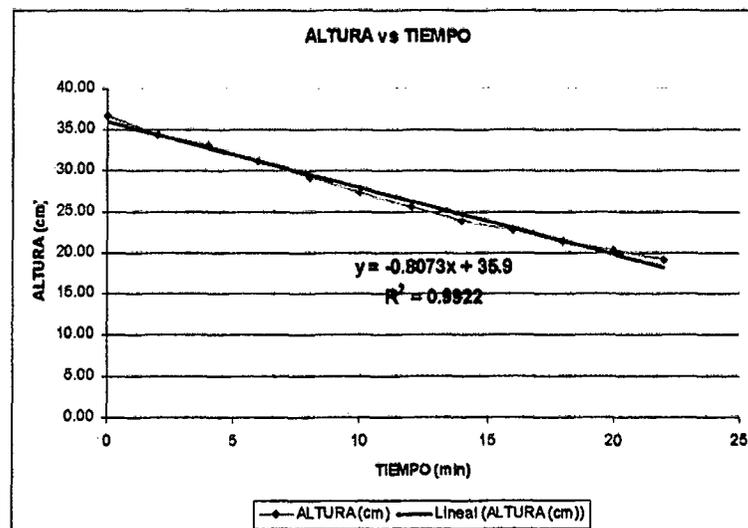
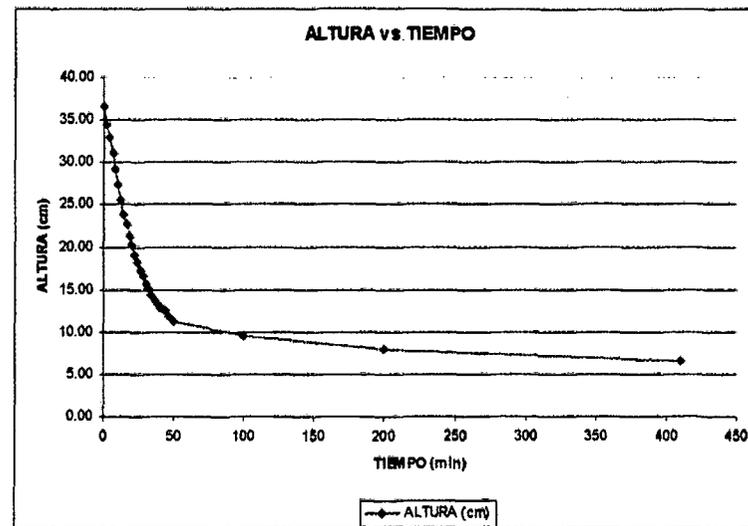
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 15.77      |
| 2           | 34.38      | 32          | 15.08      |
| 4           | 32.94      | 34          | 14.40      |
| 6           | 31.10      | 36          | 13.68      |
| 8           | 29.16      | 38          | 13.32      |
| 10          | 27.36      | 40          | 12.89      |
| 12          | 25.56      | 42          | 12.68      |
| 14          | 23.90      | 44          | 12.53      |
| 16          | 22.68      | 46          | 11.81      |
| 18          | 21.31      | 48          | 11.48      |
| 20          | 20.16      | 50          | 11.10      |
| 22          | 19.08      | 100         | 9.47       |
| 24          | 18.29      | 200         | 7.80       |
| 26          | 17.28      | 410         | 6.47       |
| 28          | 16.56      |             |            |

GRAFICA 5



## PRUEBA # 6

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 20 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 13 (mL/L)

| PRUEBA 6    | PH   | Cu    | Fe    | Zn     | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|--------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25  | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.45 | 0.267 | 0.064 | 0.24.1 | 0.1< | 0.01 | 0.34                        | 22.60 | 3.250                               | -                                    | 0.455                             | -                                  |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0    | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

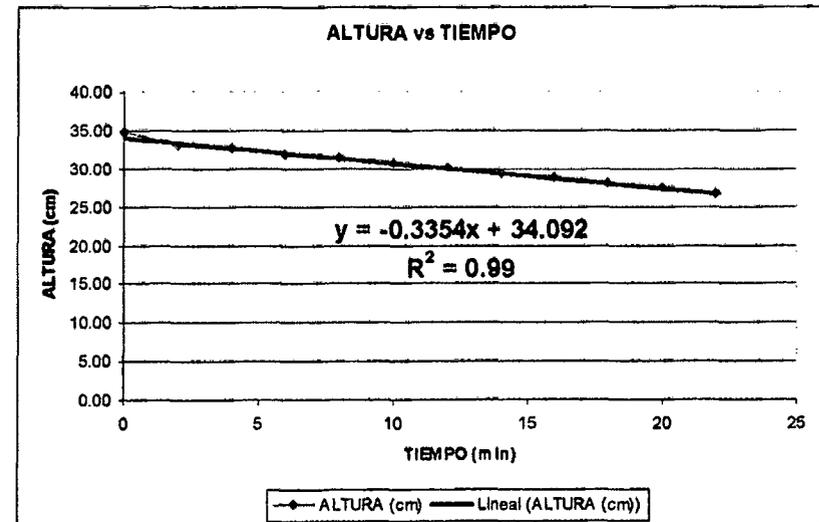
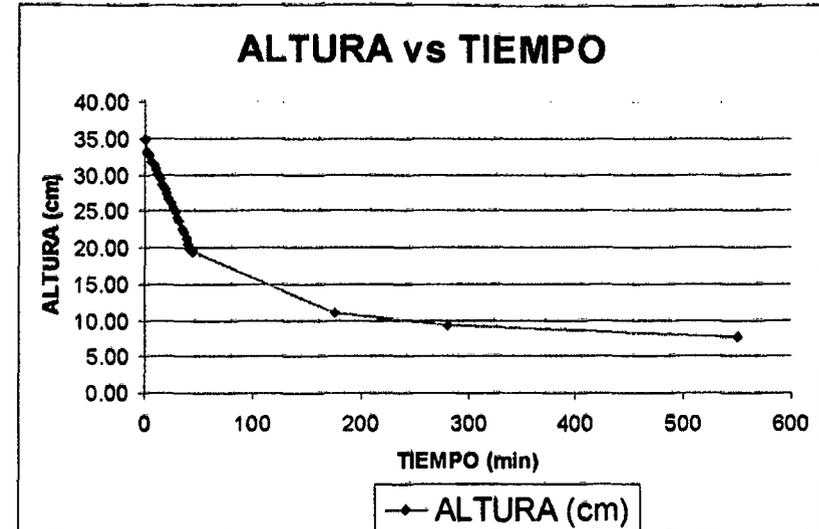
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.70      | 26          | 25.43      |
| 2           | 33.00      | 28          | 24.82      |
| 4           | 32.64      | 30          | 23.94      |
| 6           | 31.80      | 32          | 23.60      |
| 8           | 31.45      | 34          | 22.61      |
| 10          | 30.77      | 36          | 22.10      |
| 12          | 30.09      | 38          | 21.25      |
| 14          | 29.41      | 40          | 20.40      |
| 16          | 28.73      | 42          | 19.89      |
| 18          | 28.05      | 44          | 19.38      |
| 20          | 27.47      | 176         | 10.88      |
| 22          | 26.72      | 280         | 9.35       |
| 24          | 26.11      | 550         | 7.65       |

GRAFICA 6



## PRUEBA # 7

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1/2 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 10 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 11.0 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.40 (mL/L)

| PRUEBA 7    | PH   | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo de NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5  | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52 | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                    | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 8.73 | 0.183 | 0.032 | 0.211 | 0.1< | 0.01 | 0.60                        | 20.00 | 2.750                               | 0.16                                 | 0.385                             | 0.082                              |
| LMP         | 6-9  | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4  | 1.0  |                             |       |                                     |                                      |                                   |                                    |

Observación: mL/L: mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

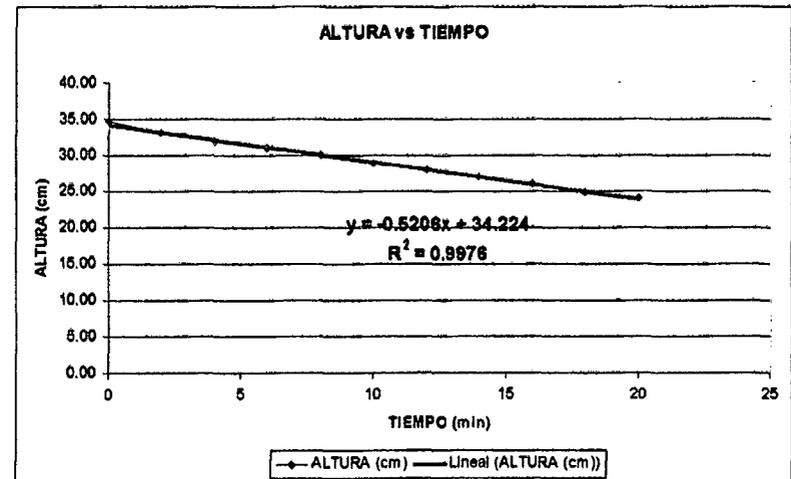
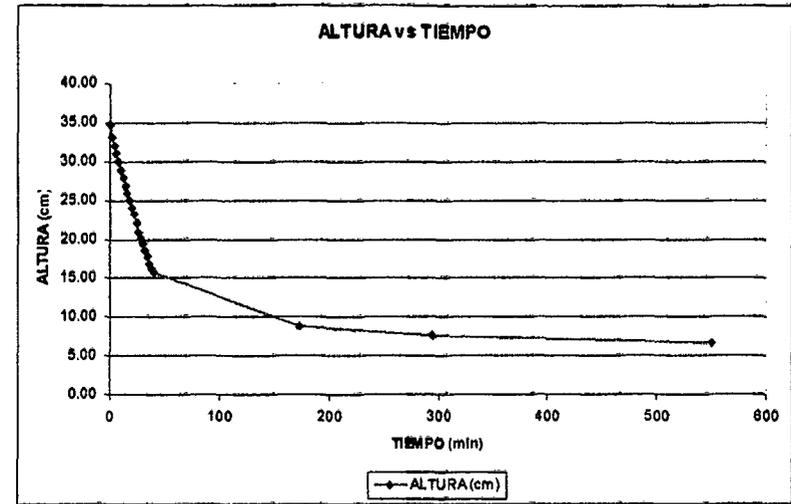
DAM: Drenaje Ácido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 34.65      | 24          | 22.10      |
| 2           | 33.05      | 26          | 20.88      |
| 4           | 31.96      | 28          | 20.06      |
| 6           | 31.04      | 30          | 19.38      |
| 8           | 29.99      | 32          | 18.56      |
| 10          | 28.90      | 34          | 17.68      |
| 12          | 27.95      | 36          | 16.83      |
| 14          | 26.89      | 38          | 16.15      |
| 16          | 25.91      | 40          | 15.64      |
| 18          | 24.89      | 172         | 8.84       |
| 20          | 23.97      | 294         | 7.58       |
| 22          | 23.15      | 550         | 6.63       |

GRAFICA 7



## PRUEBA # 8

### PARÁMETROS: NEUTRALIZACIÓN

Tiempo de Agitación : 1 min.  
Velocidad de Agitación : 300 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### PARÁMETROS: COAGULACIÓN

Tiempo de Agitación : 20 seg.  
Velocidad de Agitación : 30 RPM  
Volumen de Muestra de Agua : 1L  
Temperatura : 11-13°C

### Dosificación

Lechada de Cal (25%) : 12 (mL/L)  
Soda Caustica (10M) : 0.20 (mL/L)

| PRUEBA 8    | PH  | Cu    | Fe    | Zn    | Pb    | As   | Velocidad de Sed. (cm/min.) | %Lodo | Consumo de Cal (Kg/m <sup>3</sup> ) | Consumo NaOH (Kg/m <sup>3</sup> ) | Costo de Cal (\$/m <sup>3</sup> ) | Costo de NaOH (\$/m <sup>3</sup> ) |
|-------------|-----|-------|-------|-------|-------|------|-----------------------------|-------|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| DAM Inicial | 2.5 | 70.12 | 985.4 | 11.25 | 0.52  | 0.08 | -                           | -     | -                                   | -                                 | -                                 | -                                  |
| DAM final   | 9.5 | 0.143 | 0.010 | 0.168 | 0.1 < | 0.01 | 0.55                        | 23.00 | 3.000                               | 0.08                              | 0.420                             | 0.041                              |
| LMP         | 6-9 | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.4   | 1.0  |                             |       |                                     |                                   |                                   |                                    |

Observación: mL/L : mL de Lechada de Cal /Litro de Agua de Mina

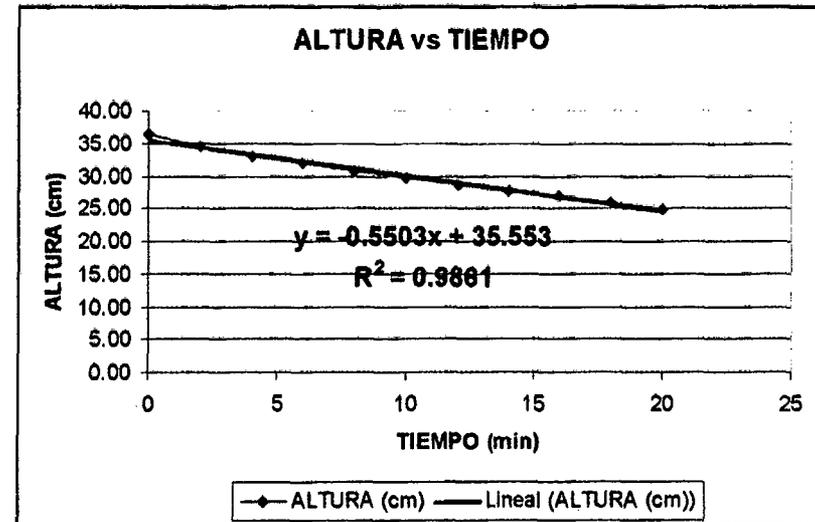
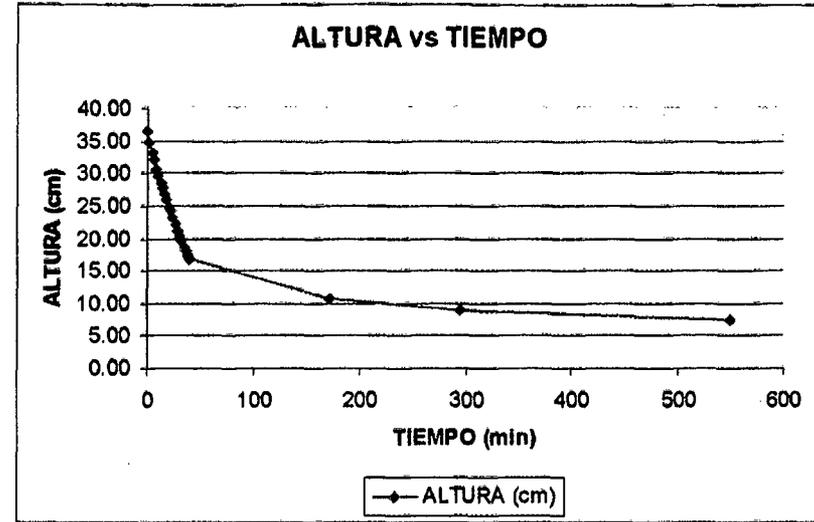
DAM : Drenaje Acido de Mina

Composición Química: ppm

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.50      | 24          | 23.18      |
| 2           | 34.55      | 26          | 22.11      |
| 4           | 33.00      | 28          | 21.17      |
| 6           | 32.00      | 30          | 20.34      |
| 8           | 30.59      | 32          | 19.62      |
| 10          | 29.52      | 34          | 18.72      |
| 12          | 28.62      | 36          | 18.00      |
| 14          | 27.72      | 38          | 17.28      |
| 16          | 26.78      | 40          | 16.92      |
| 18          | 25.88      | 172         | 10.80      |
| 20          | 24.84      | 294         | 9.00       |
| 22          | 24.12      | 550         | 7.34       |

GRAFICA 8



## 2. PRUEBAS DEL CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO POR INHIBICIÓN DE BACTERIAS

La alimentación del bactericida se hizo en forma diaria durante 20 días

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 1       | Nivel 7  | 2.50     | 70.64            | 510.44           | 581.08   |
| 1       | Nivel 8  | 5.10     | 275.12           | 613.33           | 888.45   |
| 1       | Nivel 9  | 3.10     | 200.55           | 899.45           | 1100.00  |
| 1       | Nivel 10 | 3.76     | 150.32           | 850.53           | 1000.85  |

| Nº Días | U.M.N    | PH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 2       | Nivel 7  | 3.65     | 140.03           | 429.97           | 570.00   |
| 2       | Nivel 8  | 5.62     | 300.85           | 554.84           | 855.69   |
| 2       | Nivel 9  | 3.87     | 350.23           | 667.97           | 1018.20  |
| 2       | Nivel 10 | 4.12     | 228.36           | 749.84           | 978.20   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 3       | Nivel 7  | 4.77     | 220.36           | 345.12           | 565.48   |
| 3       | Nivel 8  | 6.14     | 400.58           | 199.54           | 600.12   |
| 3       | Nivel 9  | 4.13     | 500.45           | 399.67           | 900.12   |
| 3       | Nivel 10 | 4.58     | 420.36           | 535.24           | 955.60   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 4       | Nivel 7  | 5.17     | 305.96           | 144.27           | 450.23   |
| 4       | Nivel 8  | 6.45     | 376.85           | 3.38             | 380.23   |
| 4       | Nivel 9  | 4.76     | 590.45           | 189.80           | 780.25   |
| 4       | Nivel 10 | 4.98     | 578.63           | 206.57           | 785.20   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 5       | Nivel 7  | 5.60     | 370.58           | 19.94            | 390.52   |
| 5       | Nivel 8  | 6.79     | 315.00           | 5.04             | 320.04   |
| 5       | Nivel 9  | 4.98     | 630.25           | 55.07            | 685.32   |
| 5       | Nivel 10 | 5.21     | 650.25           | 50.87            | 701.12   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 6       | Nivel 7  | 5.98     | 295.25           | 4.80             | 300.05   |
| 6       | Nivel 8  | 7.01     | 260.45           | 19.87            | 280.32   |
| 6       | Nivel 9  | 5.32     | 560.35           | 28.01            | 588.36   |
| 6       | Nivel 10 | 5.66     | 595.41           | 25.65            | 621.06   |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 7       | Nivel 7  | 6.07     | 245.78           | 4.28             | 250.06   |
| 7       | Nivel 8  | 7.45     | 225.04           | 5.00             | 230.04   |
| 7       | Nivel 9  | 5.58     | 476.21           | 6.31             | 482.52   |
| 7       | Nivel 10 | 5.98     | 463.70           | 12.15            | 475.85   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 8       | Nivel 7  | 7.65     | 185.05           | 5.00             | 190.05   |
| 8       | Nivel 8  | 7.92     | 183.04           | 4.98             | 188.02   |
| 8       | Nivel 9  | 5.84     | 354.86           | 5.61             | 360.47   |
| 8       | Nivel 10 | 6.25     | 360.36           | 8.22             | 368.58   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 9       | Nivel 7  | 7.87     | 166.94           | 3.08             | 170.02   |
| 9       | Nivel 8  | 8.02     | 154.64           | 3.85             | 158.49   |
| 9       | Nivel 9  | 6.03     | 215.80           | 4.25             | 220.05   |
| 9       | Nivel 10 | 6.47     | 207.82           | 6.25             | 214.07   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 10      | Nivel 7  | 7.98     | 148.11           | 2.12             | 150.23   |
| 10      | Nivel 8  | 8.24     | 139.11           | 3.19             | 142.30   |
| 10      | Nivel 9  | 6.43     | 174.79           | 3.77             | 178.56   |
| 10      | Nivel 10 | 6.68     | 147.86           | 4.50             | 152.36   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 11      | Nivel 7  | 8.08     | 135.00           | 1.85             | 136.85   |
| 11      | Nivel 8  | 8.47     | 121.45           | 2.78             | 124.23   |
| 11      | Nivel 9  | 6.66     | 152.07           | 2.95             | 155.02   |
| 11      | Nivel 10 | 6.82     | 139.23           | 3.10             | 142.33   |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 12      | Nivel 7  | 8.34     | 98.77            | 1.23             | 100.00   |
| 12      | Nivel 8  | 8.64     | 94.07            | 1.95             | 96.02    |
| 12      | Nivel 9  | 6.88     | 107.88           | 2.08             | 110.23   |
| 12      | Nivel 10 | 6.98     | 97.10            | 2.35             | 96.45    |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 13      | Nivel 7  | 8.58     | 77.15            | 0.85             | 78.00    |
| 13      | Nivel 8  | 8.78     | 71.33            | 0.72             | 72.05    |
| 13      | Nivel 9  | 6.96     | 88.25            | 0.98             | 89.23    |
| 13      | Nivel 10 | 7.05     | 77.13            | 1.12             | 78.25    |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 14      | Nivel 7  | 8.74     | 62.02            | 0.000            | 62.02    |
| 14      | Nivel 8  | 8.91     | 54.25            | 0.000            | 54.25    |
| 14      | Nivel 9  | 7.12     | 65.23            | 0.000            | 65.23    |
| 14      | Nivel 10 | 7.28     | 69.32            | 0.000            | 69.32    |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 15      | Nivel 7  | 8.87     | 49.56            | 0.000            | 49.56    |
| 15      | Nivel 8  | 9.03     | 42.56            | 0.000            | 42.56    |
| 15      | Nivel 9  | 7.38     | 50.02            | 0.000            | 50.02    |
| 15      | Nivel 10 | 7.49     | 48.12            | 0.000            | 48.12    |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 16      | Nivel 7  | 9.00     | 28.45            | 0.000            | 28.45    |
| 16      | Nivel 8  | 9.15     | 24.56            | 0.000            | 24.56    |
| 16      | Nivel 9  | 7.61     | 36.12            | 0.000            | 36.12    |
| 16      | Nivel 10 | 7.64     | 37.89            | 0.000            | 37.89    |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 17      | Nivel 7  | 9.13     | 10.23            | 0.000            | 10.23    |
| 17      | Nivel 8  | 9.35     | 7.56             | 0.000            | 7.56     |
| 17      | Nivel 9  | 7.78     | 12.02            | 0.000            | 12.02    |
| 17      | Nivel 10 | 7.82     | 11.85            | 0.000            | 11.85    |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 18      | Nivel 7  | 9.20     | 3.36             | 0.000            | 3.36     |
| 18      | Nivel 8  | 9.50     | 2.78             | 0.000            | 2.78     |
| 18      | Nivel 9  | 7.95     | 6.36             | 0.000            | 6.36     |
| 18      | Nivel 10 | 7.98     | 5.45             | 0.000            | 5.45     |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 19      | Nivel 7  | 9.53     | 0.95             | 0.000            | 0.95     |
| 19      | Nivel 8  | 9.75     | 0.88             | 0.000            | 0.88     |
| 19      | Nivel 9  | 8.15     | 1.11             | 0.000            | 1.11     |
| 19      | Nivel 10 | 8.23     | 1.02             | 0.000            | 1.02     |

| Nº Días | U.M.N    | pH final | Fe <sup>2+</sup> | Fe <sup>3+</sup> | Fe Total |
|---------|----------|----------|------------------|------------------|----------|
| 20      | Nivel 7  | 9.88     | 0.56             | 0.000            | 0.56     |
| 20      | Nivel 8  | 9.92     | 0.72             | 0.000            | 0.72     |
| 20      | Nivel 9  | 8.45     | 0.99             | 0.000            | 0.99     |
| 20      | Nivel 10 | 8.52     | 0.88             | 0.000            | 0.88     |

Composición química: ppm

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

### 3. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE NEUTRALIZACION METODO PROPUESTO

| Nº PRUEBA | PH    | Cu    | Fe    | Zn    | Pb   | Ar   | velocidad de sed. (cm./min) | %Lodo Cal 25%(L/m3) | Lechada de Cal 25%(L/m3) | Consumo de Cal(Kg/m3) | Consumo NaOH(Kg/m3) | Costo de Cal (\$/m3) | Costo de NaOH(\$/m3) |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----------------------------|---------------------|--------------------------|-----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| 1         | 6.500 | 0.120 | 0.860 | 0.236 | 0.1< | 0.1< | 0.56                        | 24.00               | 5.00                     | 1.25                  | 0.00                | 0.175                | 0.000                |
| 2         | 7.550 | 0.090 | 0.062 | 0.200 | 0.1< | 0.1< | 0.84                        | 18.00               | 5.00                     | 1.25                  | 0.08                | 0.175                | 0.041                |
| 3         | 8.700 | 0.065 | 0.043 | 0.185 | 0.1< | 0.1< | 0.57                        | 22.00               | 7.00                     | 1.75                  | 0.00                | 0.245                | 0.000                |
| 4         | 9.700 | 0.020 | 0.006 | 0.120 | 0.1< | 0.1< | 0.89                        | 15.00               | 7.00                     | 1.75                  | 0.08                | 0.245                | 0.041                |

Fuente: Elaboración propia, Laboratorio de la CIA Minera

Composición Química: ppm

Concentración de la lechada de cal = 25% (en peso)

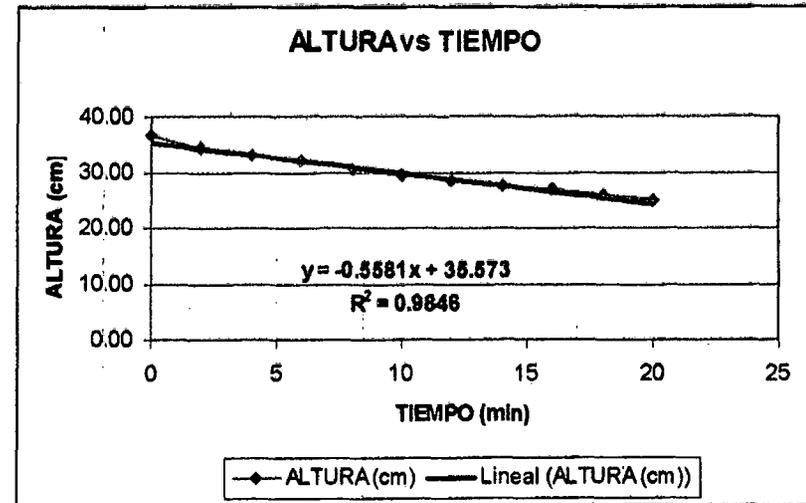
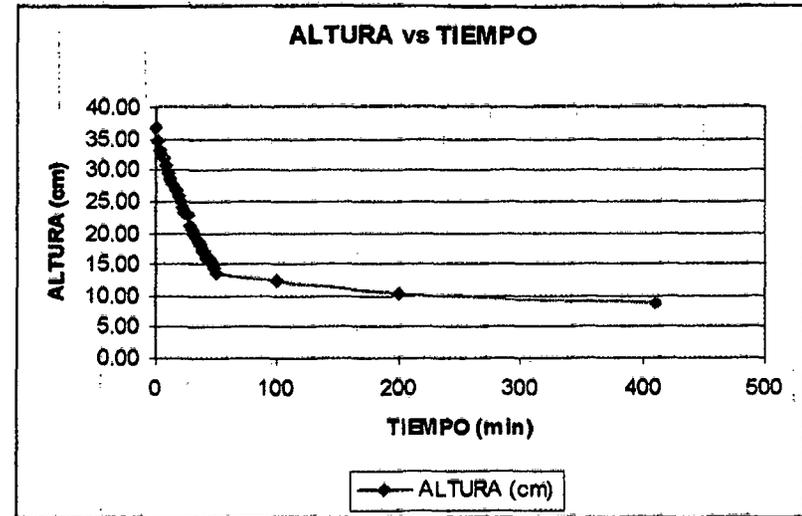
Concentración del hidróxido de sodio = 10 Molar

### PRUEBA N° 1

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 20.32      |
| 2           | 34.52      | 32          | 19.60      |
| 4           | 33.00      | 34          | 18.70      |
| 6           | 31.98      | 36          | 17.98      |
| 8           | 30.57      | 38          | 17.26      |
| 10          | 29.50      | 40          | 16.90      |
| 12          | 28.60      | 42          | 15.95      |
| 14          | 27.70      | 44          | 15.53      |
| 16          | 26.76      | 46          | 14.96      |
| 18          | 25.86      | 48          | 14.29      |
| 20          | 24.82      | 50          | 13.62      |
| 22          | 24.10      | 100         | 12.20      |
| 24          | 23.15      | 200         | 10.35      |
| 26          | 22.90      | 410         | 8.80       |
| 28          | 21.15      |             |            |

Grafica 1

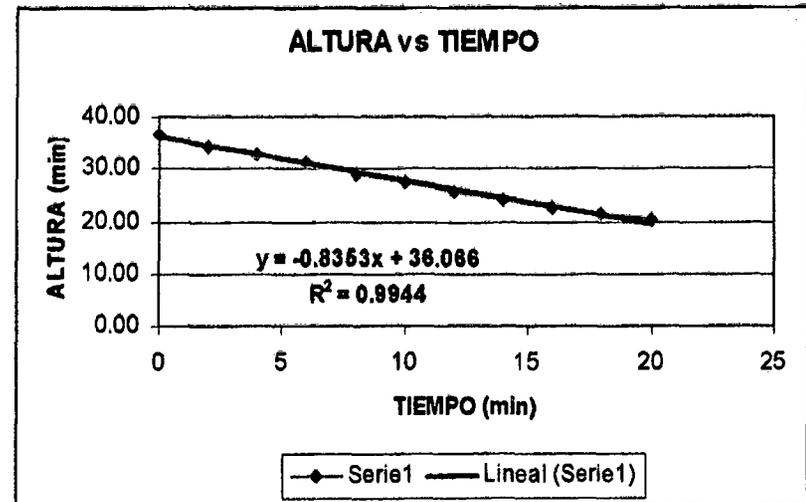
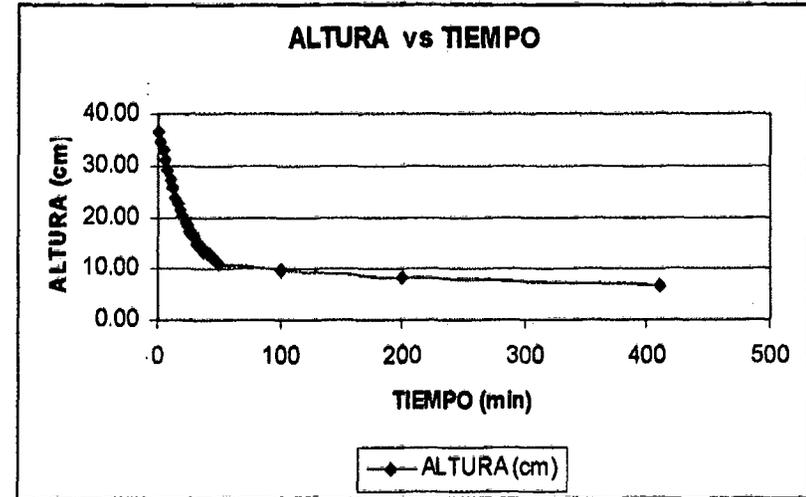


## PRUEBA N° 2

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 15.73      |
| 2           | 34.38      | 32          | 14.86      |
| 4           | 32.92      | 34          | 14.36      |
| 6           | 31.10      | 36          | 13.64      |
| 8           | 29.12      | 38          | 13.28      |
| 10          | 27.32      | 40          | 12.85      |
| 12          | 25.52      | 42          | 12.64      |
| 14          | 23.86      | 44          | 12.47      |
| 16          | 22.64      | 46          | 11.77      |
| 18          | 21.27      | 48          | 11.44      |
| 20          | 20.12      | 50          | 10.88      |
| 22          | 18.96      | 100         | 9.75       |
| 24          | 18.25      | 200         | 8.23       |
| 26          | 17.24      | 410         | 6.70       |
| 28          | 16.52      |             |            |

Grafica 2

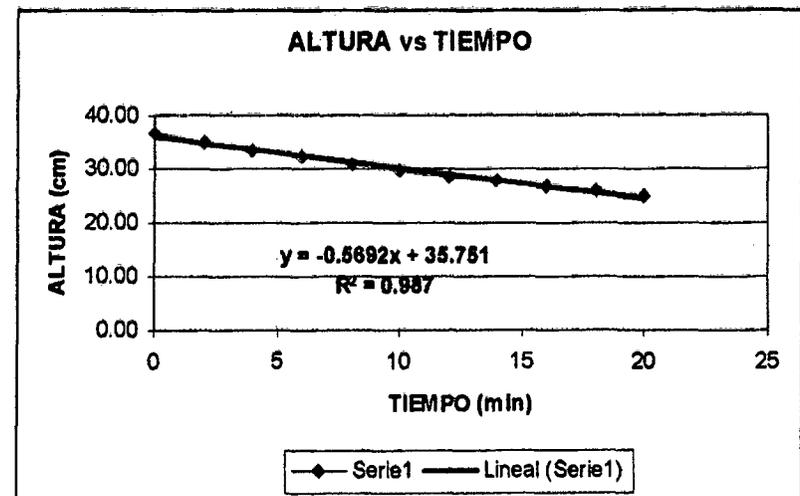
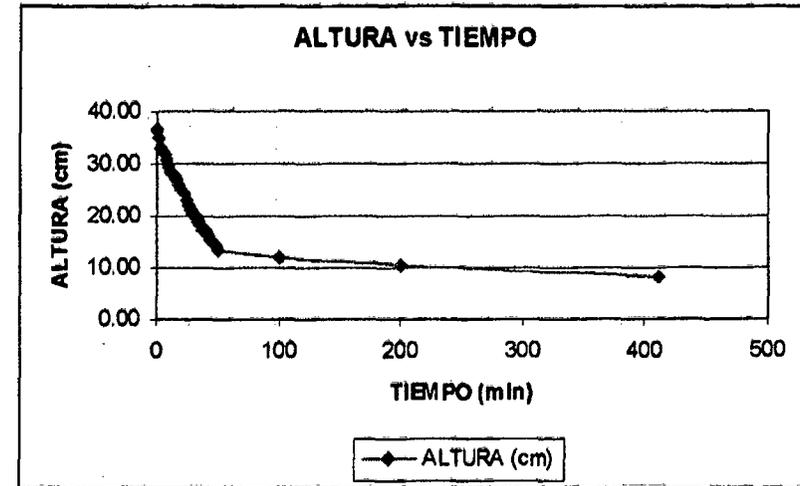


### PRUEBA N° 3

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 20.31      |
| 2           | 34.86      | 32          | 19.59      |
| 4           | 33.15      | 34          | 18.69      |
| 6           | 32.05      | 36          | 17.97      |
| 8           | 30.85      | 38          | 17.25      |
| 10          | 29.48      | 40          | 16.87      |
| 12          | 28.58      | 42          | 16.00      |
| 14          | 27.68      | 44          | 15.50      |
| 16          | 26.74      | 46          | 14.92      |
| 18          | 25.84      | 48          | 14.27      |
| 20          | 24.82      | 50          | 13.58      |
| 22          | 24.09      | 100         | 11.80      |
| 24          | 23.15      | 200         | 10.20      |
| 26          | 22.07      | 410         | 8.12       |
| 28          | 21.14      |             |            |

Grafica 3

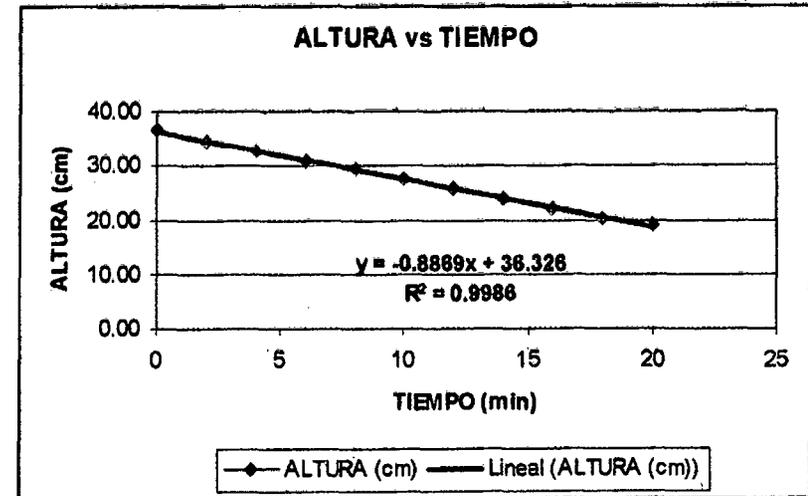
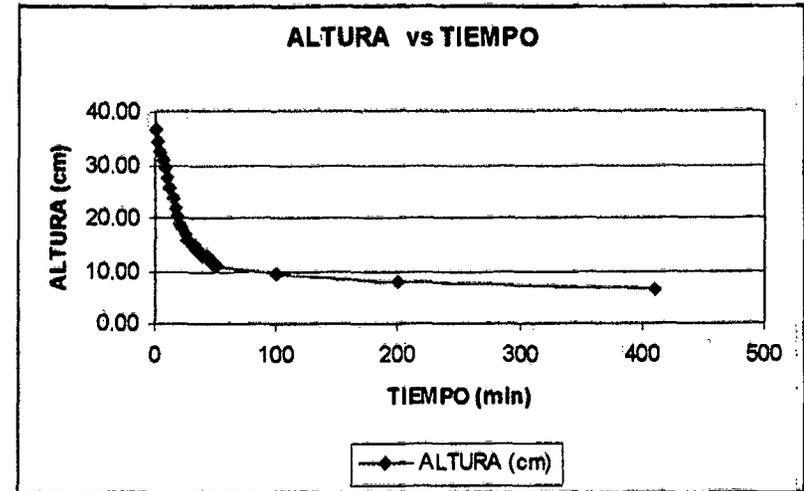


### PRUEBA N° 4

Datos para el cálculo de la velocidad de sedimentación

| Tiempo(min) | Altura(cm) | Tiempo(min) | Altura(cm) |
|-------------|------------|-------------|------------|
| 0           | 36.60      | 30          | 15.00      |
| 2           | 34.50      | 32          | 14.55      |
| 4           | 32.50      | 34          | 14.05      |
| 6           | 31.00      | 36          | 13.60      |
| 8           | 29.45      | 38          | 13.20      |
| 10          | 27.50      | 40          | 12.80      |
| 12          | 25.60      | 42          | 12.68      |
| 14          | 23.70      | 44          | 12.53      |
| 16          | 21.88      | 46          | 11.81      |
| 18          | 20.30      | 48          | 11.48      |
| 20          | 19.00      | 50          | 11.10      |
| 22          | 18.00      | 100         | 9.47       |
| 24          | 17.00      | 200         | 7.80       |
| 26          | 16.00      | 410         | 6.24       |
| 28          | 15.50      |             |            |

Grafica 4



#### 4. ESPECIFICACIONES DEL TANQUE DE AGITACION

Proporción geométrica para un sistema de agitación estándar:

$$(H/D)_{TK} = 1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$H_{ag}/D_{TK} = 1/3 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$H_{ag}+H_L = H_N \quad \dots\dots\dots (3)$$

$H_{ag}$  : altura del agitador

$D_{TK}$  : diámetro del tanque

$H_L$  : altura del liquido por encima del agitador

$H_N$  : altura total del liquido (altura base)

De la ecuación (2) teórico

$H_{ag}$  : 0.70m

$H_N$  : 1.00m

#### Tanque de preparación de lechada de cal

Diámetro : 2.10m

Altura total : 2.10m

Volumen total : 7.30m<sup>3</sup>

Diámetro de descarga: 0.1016m

**El volumen útil de trabajo es el 90% del volumen total:**

|                |   |                    |
|----------------|---|--------------------|
| Volumen útil   | : | 6.50m <sup>3</sup> |
| Volumen muerto | : | 0.80m <sup>3</sup> |
| Altura muerta  | : | 0.22m              |
| Altura útil    | : | 1.88m              |

### **Cantidad de lechada a dosificar**

➤ Vaciado total del tanque (100%)

Altura útil : 1.88m

Volumen útil : 6.50m<sup>3</sup>

➤ Alimentación de cal : 1.75 kg.de cal/ m<sup>3</sup> x 6.5m<sup>3</sup> = 11.375 kg.de cal

Flujo de efluente a tratar: 16 L/S = 57.6 m<sup>3</sup>/h

De acuerdo a las Condiciones Óptimas de operación de la ALTERNATIVA B, calculamos la cantidad de lechada de alimentación al tanque.

### **Condiciones Óptimas**

Lechada de cal 25% = 1.75 L/m<sup>3</sup>

Consumo de NaOH (Molar) = 0.08 Kg/m<sup>3</sup>

### **Calculo de la alimentación**

Cantidad de lechada por hora: 1.75 L/m<sup>3</sup> x 16L/S = 0.1008 m<sup>3</sup>/h

Cantidad de lechada por día: 2.42 m<sup>3</sup>/día

### Tiempo de vaciado (por la ecuación de continuidad)

|                       |   |           |
|-----------------------|---|-----------|
| Descarga abierta 100% | : | 6.0 min.  |
| Descarga abierta 75%  | : | 10.0 min. |
| Descarga abierta 50%  | : | 22.0 min. |
| Descarga abierta 25%  | : | 88.0 min. |

### Vaciado parcial del tanque (38%)

|                              |   |  |
|------------------------------|---|--|
| Altura útil                  | : | 0.80m  |
| Volumen útil                 | : | 2.77m <sup>3</sup>   |
| Alimentación de cal          | : | 1.75 kg. de cal/m <sup>3</sup> x 2.77m <sup>3</sup> = 4.85 kg.de cal |
| Flujo de efluente a tratar   | : | 16 L/S = 57.6 m <sup>3</sup> /h                                      |
| Cantidad de lechad por hora: | : | 0.1008 m <sup>3</sup> /hora  |
| Cantidad de lechada por día: | : | 2.42 m <sup>3</sup> /día   |

### Tiempo de descarga (por la ecuación de continuidad)

|                       |   |           |
|-----------------------|---|-----------|
| Descarga abierta 100% | : | 1.24 min. |
| Descarga abierta 75%  | : | 2.21 min. |
| Descarga abierta 50%  | : | 5.00 min. |
| Descarga abierta 25%  | : | 20.0 min. |

## **XVII. ANEXOS**

### **BASE LEGAL**

#### **DECRETO LEY N° 17752. LEY GENERAL DE AGUAS**

##### **TITULO II: De la Conservación y Preservación de las Aguas**

##### **CAPITULO I: DE LA CONSERVACIÓN**

**Artículo 43°.-** Las Administraciones Técnicas de los distritos de riego están obligadas a formular el inventario de las obras de captación, medición, distribución y control que sean necesarias dentro de su jurisdicción para lograr una eficiente, adecuada y racional utilización de las aguas. Este inventario será elevado anualmente a la Dirección General de Aguas e Irrigación, la que lo revisará y determinará la prioridad de las obras a ejecutarse, para la formulación de la programación zonal y nacional.

**Artículo 44°.-** Una vez determinada la programación a que se refiere el artículo anterior, se precisarán las obras cuyo estudio y ejecución deba realizar la zona agraria correspondiente, y aquellas que por su magnitud, importancia, fuente de financiación forman parte de un plan integral nacional, cuyo estudio y ejecución corresponde a la Dirección General de Aguas e Irrigación.

**Artículo 46°.-** Los recursos hídricos provenientes de las filtraciones propias de los sistemas de avenamiento y otros cuando su volumen se considere utilizable para uso agrícola, serán sometidos por la Autoridad de Aguas de la Zona, a un previo análisis, para poderlos incorporar al plan de riego si resultasen aptos para ello.

**Artículo 48°.-** Todo usuario está obligado a cumplir con los reglamentos de operación, distribución y vigilancia del sistema, distrito o sector al que pertenezca así como a cualquier disposición que dicte la Autoridad de Aguas;

utilizar las aguas que le han sido otorgadas sin perjuicio de terceros y evitar que ellas discurran desbordando los cauces.

**Artículo 54°.-** Cuando en aplicación del artículo 19 de la Ley General de Aguas se dictaren medidas o realizaran obras que pudieran variar el abastecimiento de las napas subterráneas, la Autoridad de Aguas deberá tener en cuenta esta circunstancia para los efectos de las disponibilidades de agua.

## **CAPÍTULO II: DE LA PRESERVACIÓN**

**Artículo 57°.-** Ningún vertimiento de residuos sólidos, líquidos o gaseosos podrá ser efectuado en las aguas marítimas o terrestres del país, sin la previa aprobación de la Autoridad Sanitaria.

**Artículo 59°.-** En concordancia con lo dispuesto por el Art. 54 de la Ley, el Ministerio de Energía y Minas, previo a la Autorización para la instalación de plantas concentradoras de minerales o canchas para relaves, solicitará el informe de la Autoridad Sanitaria.

**Artículo 61°.-** Todo vertimiento de residuos a las aguas marítimas o terrestres del país, deberá efectuarse previo tratamiento, lanzamiento submarino o alejamiento adecuado, de acuerdo a lo dispuesto por la Autoridad Sanitaria y contando previamente con la licencia respectiva.

## **TITULO III: De los Usos de las Aguas**

### **CAPITULO I: DISPOSICIONES GENERALES**

**Artículo 83°.-** Todos los usos de las aguas cualquiera que sea su fuente, se encuentran sujetos a las fluctuaciones de las disponibilidades originadas por causas naturales, así como a las provenientes de la aplicación de la Ley General de Aguas y el presente Reglamento, lo que define su carácter aleatorio.

**Artículo 84°.-** En concordancia con los planes nacionales, regionales y zonales de desarrollo y en función del interés social, el Estado otorgará los usos de las aguas de conformidad con el siguiente orden de preferencias:

- a. Para el abastecimiento de poblaciones.
- b. Para cría y explotación de animales.
- c. Para agricultura.
- d. Para usos energéticos, industriales y mineros.
- e. Para otros usos.

El Poder Ejecutivo podrá variar este orden preferencial sólo en cuanto se refiera a los incisos c), d) y e), previos los estudios que demuestren tal conveniencia e informes del Consejo Superior de Aguas, del Instituto Nacional de Planificación y voto aprobatorio del Consejo de Ministros.

#### **CAPITULO IV: DE LOS USOS ENERGETICOS, INDUSTRIALES Y MINEROS**

**Artículo 144°.-** El Director General de Aguas, Suelos e Irrigaciones, podrá otorgar licencias para el uso de aguas destinadas a fines mineros, considerando el siguiente orden de preferencias:

Para explotaciones consideradas en los planes nacionales o regionales de desarrollo, o aquellos que por ser destinadas a mercados internacionales o al del "Pacto Andino" se consideren fuente de ingreso de divisas;

- a. Para explotaciones de materiales metálicos o compuestos químicos que constituyan materia prima o parte importante para el desarrollo de ciertas industrias que el Estado esté empeñado en promover; y
- b. Para las demás explotaciones mineras.

**Artículo 145°.-** Queda terminantemente prohibido, de acuerdo a lo dispuesto por la Ley General de Aguas, que como consecuencia de las explotaciones mineras, se contaminen o polucionen los recursos de agua y las tierras agrícolas o potencialmente cultivables, así como a los cultivos que pudieran existir dentro de la zona de influencia de estas explotaciones, mediante la eliminación o evacuación de sustancias sólidas, líquidas o gaseosas.

**Artículo 146°.-** El Ministerio de Salud, en coordinación con el Ministerio de Energía y Minas, deberá velar por el cumplimiento de lo dispuesto en el artículo anterior y las disposiciones, pertinentes de la Ley General de Aguas, dictando las disposiciones, aplicando las medidas y adoptando las providencias necesarias para ello, pudiendo solicitar, en caso necesario, que la Autoridad de Aguas suspenda temporalmente los suministros de aguas; y en caso extremo la revocación de la licencia del uso del agua respectivo.

**Artículo 147°.-** Las empresas mineras están obligadas a suministrar la dotación de agua potable necesaria para satisfacer las necesidades primarias, de los obreros y empleados que residan en los campamentos de la empresa, siendo responsables de los fenómenos de contaminación y polución que produzcan dichos centros poblados.

**Artículo 148°.-** Los concesionarios mineros que debido a sus labores alumbren aguas subterráneas, deberán poner tal hecho en conocimiento de la Dirección General de Aguas e Irrigación, si fueran aguas con sustancias minerales en solución, susceptibles de aprovechamiento podrán simultáneamente solicitar el permiso, autorización o licencia para su uso, acompañando toda la información sobre el volumen y análisis químicos completos para su aprovechamiento y clasificación.

**Artículo 149°.-** Las concesiones mineras de cualquier naturaleza, que se ubiquen en los cauces o álveos de las aguas o comprendan parte de éstos se sujetarán a las indicaciones y disposiciones que dicte la Autoridad de Aguas de la jurisdicción correspondiente, a fin de que dichas explotaciones no interfieran los usos públicos de las aguas ni alteren perjudicialmente las condiciones de

dichos cauces o álveos variando el curso normal de las aguas, poniendo en peligro la estabilidad de las márgenes las obras en ellas concluidas o el normal abastecimiento de los usos establecidos.

**Artículo 150°.-** La Autoridad de minería por propia iniciativa, o a pedido de la de Aguas o de la Sanitaria, exigirá que los residuos minerales sean depositados en lugares especiales o "canchas de relave", o sean evacuados por otros sistemas, de manera se evite la contaminación o polución de las aguas o tierras agrícolas de actual, futura o factible explotación.

Las explotaciones mineras que disponen de "Cancha de Relave" contarán con los elementos necesarios para el control y seguridad, a fin de que no constituyan un peligro potencialmente previsible para los recursos naturales, especialmente de aguas destinadas al abastecimiento de poblaciones.

**Artículo 151°.-** Los estudios y obras que deban realizarse para el almacenamiento, derivación, captación, conducción y evacuación de las aguas destinadas a la generación de energía así como a las explotaciones industriales y mineras, requieren de la previa aprobación de la Dirección General de Aguas e Irrigación del Ministerio de Agricultura y Pesquería.

**Artículo 152°.-** Los usos de agua para generación de energía, aprovechamientos industriales y explotaciones mineras, son específicas, diferentes entre sí y a todos los demás usos que dicha generación o explotaciones requieran, por lo que deberán ser solicitados en forma separada.

**Artículo 153°.-** Las tarifas que deberán pagar los usuarios de las aguas destinadas a la generación de energía, usos mineros o industriales, se fijarán anualmente por el Ministro de Agricultura y Pesquería de acuerdo a lo dispuesto en el presente Reglamento.

## **LEY N° 28611 LEY GENERAL DEL AMBIENTE, CAPÍTULO 3 GESTIÓN AMBIENTAL**

### **Artículo 24°.- Del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental**

**24.1** Toda actividad humana que implique construcciones, obras, servicios y otras actividades, así como las políticas, planes y programas públicos susceptibles de causar impactos ambientales de carácter significativo, está sujeta, de acuerdo a ley, al Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental – SEIA, el cual es administrado por la Autoridad Ambiental Nacional. La ley y su reglamento desarrollan los componentes del Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental.

**24.2** Los proyectos o actividades que no están comprendidos en el Sistema Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental, deben desarrollarse de conformidad con las normas de protección ambiental específicas de la materia.

### **Artículo 25°.- De los Estudios de Impacto Ambiental**

Los Estudios de Impacto Ambiental – EIA, son instrumentos de gestión que contienen una descripción de la actividad propuesta y de los efectos directos o indirectos previsibles de dicha actividad en el medio ambiente físico y social, a corto y largo plazo, así como la evaluación técnica de los mismos. Deben indicar las medidas necesarias para evitar o reducir el daño a niveles tolerables e incluirá un breve resumen del estudio para efectos de su publicidad. La ley de la materia señala los demás requisitos que deban contener los EIA.

### **Artículo 26°.- De los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental**

**26.1** La autoridad ambiental competente puede establecer y aprobar Programas de Adecuación y Manejo Ambiental – PAMA, para facilitar la adecuación de una actividad económica a obligaciones ambientales nuevas, debiendo asegurar su debido cumplimiento en plazos que establezcan las respectivas normas, a través de objetivos de desempeño ambiental explícitos, metas y un cronograma de avance de cumplimiento, así como las medidas de prevención, control, mitigación, recuperación y eventual compensación que corresponda. Los informes sustentatorios de la definición de plazos y medidas

de adecuación, los informes de seguimiento y avances en el cumplimiento del PAMA, tienen carácter público y deben estar a disposición de cualquier persona interesada.

**26.2** El incumplimiento de las acciones definidas en los PAMA, sea durante su vigencia o al final de éste, se sanciona administrativamente, independientemente de las sanciones civiles o penales a que haya lugar.

#### **Artículo 27°.- De los planes de cierre de actividades**

Los titulares de todas las actividades económicas deben garantizar que al cierre de actividades o instalaciones no subsistan impactos ambientales negativos de carácter significativo, debiendo considerar tal aspecto al diseñar y aplicar los instrumentos de gestión ambiental que les correspondan de conformidad con el marco legal vigente. La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con las autoridades ambientales sectoriales, establece disposiciones específicas sobre el cierre, abandono, post-cierre y postabandono de actividades o instalaciones, incluyendo el contenido de los respectivos planes y las condiciones que garanticen su adecuada aplicación.

#### **Artículo 28°.- De la Declaratoria de Emergencia Ambiental**

En caso de ocurrencia de algún daño ambiental súbito y significativo ocasionado por causas naturales o tecnológicas, el CONAM, en coordinación con el Instituto Nacional de Defensa Civil y el Ministerio de Salud u otras entidades con competencia ambiental, debe declarar la Emergencia Ambiental y establecer planes especiales en el marco de esta Declaratoria. Por ley y su reglamento se regula el procedimiento y la declaratoria de dicha Emergencia.

#### **Artículo 29°.- De las normas transitorias de calidad ambiental de carácter especial**

La Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con las autoridades competentes, puede dictar normas ambientales transitorias de aplicación específica en zonas ambientalmente críticas o afectadas por desastres, con el propósito de contribuir a su recuperación o superar las situaciones de

emergencia. Su establecimiento, no excluye la aprobación de otras normas, parámetros, guías o directrices, orientados a prevenir el deterioro ambiental, proteger la salud o la conservación de los recursos naturales y la diversidad biológica y no altera la vigencia de los ECA y LMP que sean aplicables.

### **Artículo 30°.- De los planes de descontaminación y el tratamiento de pasivos ambientales**

**30.1** Los planes de descontaminación y de tratamiento de pasivos ambientales están dirigidos a remediar impactos ambientales originados por uno o varios proyectos de inversión o actividades, pasados o presentes. El Plan debe considerar su financiamiento y las responsabilidades que correspondan a los titulares de las actividades contaminantes, incluyendo la compensación por los daños generados, bajo el principio de responsabilidad ambiental.

**30.2** Las entidades con competencias ambientales promueven y establecen planes de descontaminación y recuperación de ambientes degradados. La Autoridad Ambiental Nacional establece los criterios para la elaboración de dichos planes.

**30.3** La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con la Autoridad de Salud, puede proponer al Poder Ejecutivo el establecimiento y regulación de un sistema de derechos especiales que permita restringir las emisiones globales al nivel de las normas de calidad ambiental. El referido sistema debe tener en cuenta:

- a) Los tipos de fuentes de emisiones existentes;
- b) Los contaminantes específicos;
- c) Los instrumentos y medios de asignación de cuotas;
- d) Las medidas de monitoreo; y
- e) La fiscalización del sistema y las sanciones que correspondan.

### **Artículo 31°.- Del Estándar de Calidad Ambiental**

**31.1** El Estándar de Calidad Ambiental – ECA, es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su

condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

**31.2** El ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas. Es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

**31.3** No se otorga la certificación ambiental establecida mediante la Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, cuando el respectivo EIA concluye que la implementación de la actividad implicaría el incumplimiento de algún Estándar de Calidad Ambiental. Los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental también deben considerar los Estándares de Calidad Ambiental al momento de establecer los compromisos respectivos.

**31.4** Ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los estándares nacionales de calidad ambiental, con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas jurídicas o naturales, a menos que se demuestre que existe causalidad entre su actuación y la trasgresión de dichos estándares. Las sanciones deben basarse en el incumplimiento de obligaciones a cargo de las personas naturales o jurídicas, incluyendo las contenidas en los instrumentos de gestión ambiental.

### **Artículo 32°.- Del Límite Máximo Permisible**

**32.1** El Límite Máximo Permisible – LMP, es la medida de la concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

**32.2** El LMP guarda coherencia entre el nivel de protección ambiental establecido para una fuente determinada y los niveles generales que se establecen en los ECA. La implementación de estos instrumentos debe

asegurar que no se exceda la capacidad de carga de los ecosistemas, de acuerdo con las normas sobre la materia.

### **Artículo 33°.- De la elaboración de ECA y LMP**

**33.1** La Autoridad Ambiental Nacional dirige el proceso de elaboración y revisión de ECA y LMP y, en coordinación con los sectores correspondientes, elabora o encarga, las propuestas de ECA y LMP, los que serán remitidos a la Presidencia del Consejo de Ministros para su aprobación mediante Decreto Supremo.

**33.2** La Autoridad Ambiental Nacional, en el proceso de elaboración de los ECA, LMP y otros estándares o parámetros para el control y la protección ambiental debe tomar en cuenta los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) o de las entidades de nivel internacional especializadas en cada uno de los temas ambientales.

**33.3** La Autoridad Ambiental Nacional, en coordinación con los sectores correspondientes, dispondrá la aprobación y registrará la aplicación de estándares internacionales o de nivel internacional en los casos que no existan ECA o LMP equivalentes aprobados en el país.

**33.4** En el proceso de revisión de los parámetros de contaminación ambiental, con la finalidad de determinar nuevos niveles de calidad, se aplica el principio de la gradualidad, permitiendo ajustes progresivos a dichos niveles para las actividades en curso.

**DECRETO SUPREMO N° 016-93-EM. REGLAMENTO DEL TITULO DECIMO QUINTO DEL TEXTO UNICO ORDENADO DE LA LEY GENERAL DE MINERIA. SOBRE TODO EL MEDIO AMBIENTE.**

**Artículo 2°.- Definiciones.-** Para los efectos de este Reglamento se define lo siguiente:

**Autoridad Competente.-** Ministerio de Energía y Minas

**Contaminante Ambiental.-** Toda materia o energía que al incorporarse y/o actuar en el medio ambiente, degrada su calidad original a un nivel que afecta la salud, el bienestar humano y pone en peligro los ecosistemas.

**Contaminación Ambiental.-** Acción que resulta de la introducción por el hombre, directa o indirectamente en el medio ambiente, de contaminantes, que tanto por su concentración, al superar los niveles máximos permisibles establecidos, como por el tiempo de permanencia, hagan que el medio receptor adquiera características diferentes a las originales, perjudiciales, o nocivas a la naturaleza, a la salud y a la propiedad.

**Estudio de Impacto Ambiental (EIA).-** Estudios que deben efectuarse en proyectos para la realización de actividades en concesiones mineras, de beneficio, de labor, general y de transporte minero, que deben evaluar y describir los aspectos físico - naturales, biológicos socio - económicos y culturales en el área de influencia de proyectos, con la finalidad de determinar las condiciones existentes y capacidades del medio, analizar la naturaleza, magnitud de prever los efectos y consecuencias de la realización del proyecto, indicando medidas de previsión y control a aplicar para lograr un desarrollo armónico entre las operaciones de la industria minera y el medio ambiente.

**Ley.-** Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería, aprobado por Decreto Supremo N°014-92.EM, del 2 de junio de 1992, y sus modificatorias.

**Nivel Máximo Permisible.-** Nivel de concentración de uno o más contaminantes, por debajo del cual no se prevé riesgo para la salud, el bienestar humano y los ecosistemas. Este nivel lo establece la Autoridad Competente y es legalmente exigible.

**Plan de Cierre.-** Medidas que debe adoptar el titular de la actividad minera antes del cierre de operaciones, para evitar efectos adversos al medio ambiente producidos por los residuos sólidos, líquidos o gaseosos que puedan existir o puedan aflorar en el corto, mediano y largo plazo.

**Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA).**- Programa que contiene las acciones e inversiones necesarias para incorporar a las operaciones minero – metalúrgicas los adelantos tecnológicos y/o medidas alternativas que tengan como propósito reducir o eliminar las emisiones y/o vertimientos para poder cumplir con los niveles máximos permisibles establecidos por la Autoridad Competente.

**Protección Ambiental.**- Conjunto de Acciones de orden científico, tecnológico, legal, humano, social y económico que tiene por objetivo proteger el entorno natural, donde se desarrollan las actividades minero – metalúrgicas, y sus áreas de influencia, evitando su degradación a un nivel perjudicial que afecte la salud, el bienestar humano, la flora, la fauna o los ecosistemas.

**Programa de Monitoreo.**- Es el muestreo sistemático con métodos y tecnologías adecuada al medio en que se realiza el estudio, basados en normas de guías definidas por el Ministerio de Energía y Minas, para evaluar la presencia de contaminantes vertidos en el medio ambiente.

**Evaluación Ambiental Preliminar (EVAP).**- Es el estudio que se realiza antes de la elaboración que se esta generando por la actividad minero – metalúrgica.

**Auditor Ambiental .**- Es toda persona natural o jurídica, inscrita en la Dirección General de Minería, de acuerdo al Decreto Supremo N° 012-93-EM, dedicada a la fiscalización y verificación del cumplimiento de las normas de conservación del medio ambiente.

Cuando el Reglamento se refiere a “suscrito por un Auditor Ambiental” entiéndase que constituye un análisis especial realizado por el Auditor Ambiental que consiste en verificar lo expresado en el informe sobre Generación de Emisiones y/o Vertimientos de Residuos de la Industrias Minero – Metalúrgicos (Anexo 1), Evaluación Ambiental Preliminar (EVAP), Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), que realice el titular y otros a que se refiere el Reglamento o cuando la Autoridad lo requiera.

**“Definiciones incluidas por D.S N° 059-93-EM del 10-12-93”**

**Artículo 3°.- Objeto.-** El presente reglamento tiene por objetivo:

- a) Establecer las acciones de previsión y control de deben realizarse para armonizar el desarrollo de las actividades minero – metalúrgicas con la protección del medio ambiente.
- b) Proteger el medio ambiente de los riesgos resultantes de los agentes nocivos que pudiera generar la actividad minera metalúrgica, evitando sobrepasen los niveles máximos permisibles.
- c) Fomentar el empleo de nuevas técnicas y procesos relacionados con el mejoramiento del medio ambiente.

**Artículo 4°.- Autoridad competente.-** La autoridad competente en materia ambiental del sector minero – metalúrgico es el Ministerio de Energías y Minas, que será el único ente gubernamental encargado de:

- 1.- Fijar las políticas de protección del medio ambiente para las actividades minero – metalúrgicas dictar la normatividad correspondiente.
- 2.- Aprobar los Estudios de Impacto Ambiental y los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental y autorizar la ejecución de los mismos, para cada una de las unidades económicas administrativas.
- 3.- Suscribir con los titulares de la actividad minero – metalúrgicos convenios de estabilidad administrativa ambiental en base al Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o programa de adecuación ambiental (PAMA) que se apruebe.
- 4.- Fiscalizar el efecto ambiental producido por las actividades minero – metalúrgicos en los centros operativos y áreas de influencias, determinando la responsabilidad del titular, en caso de producirse una violación a las disposiciones de este Reglamento e imponiendo las sanciones provistas en él.

**Artículo 5°.-** El titular de la actividad minero – metalúrgica, es responsable por las emisiones, vertimientos y disposiciones de desechos al medio ambiente que se produzcan como resultados de los procesos efectuados en sus instalaciones. A este efecto es su obligación evitar e impedir que aquellos elementos y/o sustancias que por sus concentraciones y/o prolongada

permanecía puedan tener efectos adversos en el medio ambiente, sobrepasen los niveles máximos permisibles.

**Artículo 6°.-** Sin perjuicios de los establecidos en el Artículo 225° de la Ley, es obligación del titular poner en marcha y mantener programas de prevención y control contenidos en el Estudio de Impacto Ambiental y/o Programas de Adecuación y Manejo Ambiental, basados en sistemas adecuados de muestreo, análisis químico, físicos y mecánicos, que permitan evaluar y controlar en forma representativa los afluentes o residuos líquidos y sólidos, las emisiones gaseosas, los ruidos y otros que puedan generar su actividad, por cualquiera de sus procesos cuando estos pudieran tener un efecto negativo sobre el medio ambiente. Dichos programas de control deberán mantenerse actualizados, consignándoles en ellos la información referida al tipo y volumen de los afluentes o residuos y las concentraciones de las sustancias contenidas en estos.

El tipo, número y ubicación de los puntos de control estarán de acuerdo a las características geográficas de cada región donde se encuentra ubicado el centro productivo. Estos registros estarán a disposición de la autoridad competente cuando lo solicite, bajo responsabilidad.

**Artículo 8.-** Los titulares de la actividad minera nombrarán un auditor ambiental responsable del control ambiental de la empresa, quien tendrá como función identificar los problemas existentes y futuros, desarrollar planes de rehabilitación, definir metas para mejorarlo y controlar el mantenimiento de los programas ambientales.

**Artículo 10°.-** EL PAMA de las actividades de exploración y/o explotación en las operaciones de minado subterráneo y al cielo abierto deben identificar y completar el tratamiento de:

2. Calidad de flujo de aguas superficiales y subterráneas por descarga de aguas contaminadas (nitratos, metales pesados, acidez, etc.).

**Artículo 26°.-** En operaciones de minado subterráneo y a cielo abierto, los EIA y PAMA enfatizarán el cumplimiento de metas a base de normas para:

**3.** Calidad y flujo de las aguas superficiales y subterráneas.

**Artículo 27°.-** El Plan de Cierre para el área objeto de la concesión, para operaciones de minado subterráneo y a cielo abierto, debe contemplar normas relacionadas con:

**4.** Medidas para prevenir la contaminación de los cuerpos de agua.

## **RESOLUCION MINISTERIAL N° 011-96-EM/VMM. APRUEBAN LOS NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES PARA AFLUENTES LIQUIDOS MINERO – METALURGICOS**

### **Artículo 2°.- Niveles Máximos Permisibles**

Los Niveles Máximos Permisibles a los cuales se sujetarán las Unidades Minero- Metalúrgicas están señalados en el Anexo 1. Las Unidades Mineras en Operación y aquéllas que reinician sus operaciones podrán sujetarse a lo señalado en el Anexo 2, siguiendo lo establecido en el Decreto Supremo N° 016 -93-EM. Estos Anexos forman parte de la presente Resolución Ministerial.

### **Artículo 3°.- Ajuste gradual de los valores contemplados en el Anexo 2 hasta igualar los del Anexo 1**

Los valores establecidos en el Anexo 2, se ajustarán gradualmente hasta igualar a los Niveles Máximos Permisibles (Anexo 1), en un período no mayor de 10 años a partir de la entrada en vigencia de la presente Resolución Ministerial.

### **Artículo 4°.- Resultados analíticos no excederán los niveles contemplados en el Anexo 1 ó 2, según sea el caso.**

Los resultados analíticos obtenidos para cada parámetro regulado a partir de la muestra recogida del efluente minero-metalúrgico, no excederán en ninguna oportunidad los niveles establecidos en la columna "Valor en cualquier Momento" del Anexo 1 ó 2 según corresponda.

**Artículo 5°.- Concentraciones promedio anuales no excederán los niveles contemplados en el Anexo 1 ó 2, según sea el caso**

Las concentraciones promedio anuales, para cada parámetro regulado no excederán los niveles establecidos en la columna "Valor Promedio Anual" en el Anexo 1 ó 2 según corresponda.

**Artículo 6°.- Caso de los parámetros no regulados**

Los titulares mineros deberán asegurar que las concentraciones de los parámetros no regulados por la presente Resolución Ministerial, tales como cadmio, mercurio, cromo y otros, cumplan con las disposiciones legales vigentes en el país o demostrar técnicamente ante la autoridad competente, que su vertimiento al cuerpo receptor no ocasionará efectos negativos a la salud humana y al ambiente.

**Artículo 7°.- Establecimiento de un punto de control para cada efluente minero-metalúrgico**

Los titulares mineros están obligados a establecer en el EIA y/o PAMA o Declaración Jurada de PAMA, un punto de control en cada efluente líquido minero metalúrgico, a fin de determinar la concentración de cada uno de los parámetros regulados y el volumen de descarga en metros cúbicos por día, que será medido al momento de efectuar la toma de la muestra. Dicho punto de control deberá ser identificado de acuerdo a la ficha del Anexo 3 que forma parte de la presente Resolución Ministerial.

**Artículo 8°.- Eliminación o cambio de ubicación de los puntos de control**

Los titulares mineros podrán eliminar o cambiar la ubicación de uno o más puntos de control, previa aprobación de la Dirección General de Minería, con la opinión favorable de la Dirección General de Asuntos Ambientales, para lo cual será necesario presentar la documentación sustentatoria.

**Artículo 9°.- Determinación de la frecuencia de muestreo**

Para efectos de determinar la frecuencia de muestreo, de análisis químicos y de presentación de reportes, los titulares mineros serán clasificados de acuerdo

al volumen de descarga total de efluentes minero-metalúrgicos al cuerpo receptor, según la siguiente escala:

- a) Mayor de 300 metros cúbicos por día
- b) Entre 50 y 300 metros cúbicos por día
- c) Menor de 50 metros cúbicos por día

#### **Artículo 10°.- Resultado del Muestreo**

El resultado del muestreo será puesto en conocimiento de la Dirección General de Minería, a partir de la entrada en vigencia de la presente Resolución Ministerial, de acuerdo a la frecuencia de presentación de reportes que se indica en el Anexo 4 que forma parte de la presente Resolución.

#### **Artículo 11°.- Frecuencia de Análisis Químicos**

La frecuencia de análisis químicos de los efluentes minero - metalúrgicos se regirá por lo establecido en el Anexo 5 que forma parte de la presente Resolución.

#### **Artículo 12°.- Registro a ser llevado por los Titulares Mineros**

Los titulares mineros llevarán un registro según el formato especificado en el Anexo 6, de la presente Resolución Ministerial, el mismo que deberá ser presentado al Auditor Ambiental, cuando éste lo requiera.

#### **Artículo 13°.- Definiciones**

Para efectos de la presente Resolución Ministerial se tomará en consideración las siguientes definiciones:

**Efluentes Líquidos Minero-Metalúrgicos.-** Son los flujos descargados al ambiente, que provienen:

- a) De cualquier labor, excavación o trabajo efectuado en el terreno, o de cualquier planta de tratamiento de aguas residuales asociadas con labores, excavaciones o trabajos efectuados dentro de los linderos de la Unidad Minera.
- b) De depósitos de relaves u otras instalaciones de tratamiento que produzcan aguas residuales.

c) De concentradoras, plantas de tostación, fundición y refinerías, siempre que las instalaciones sean usadas para el lavado, trituración, molienda, flotación, reducción, lixiviación, tostación, sinterización, fundición, refinación, o tratamiento de cualquier mineral, concentrado, metal, o subproducto.

d) De campamentos propios.

e) De cualquier combinación de los antes mencionados.

**Muestra Puntual.-** Es el tipo de muestra, en un punto de control definido en el Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua para el Subsector Minería.

**Parámetro Regulado.-** Son aquellos parámetros que se encuentran definidos en los Anexos 1 y 2 de la presente Resolución Ministerial.

**Punto de Control.-** Ubicación aprobada por la autoridad competente, establecida de acuerdo a los criterios del Protocolo de Monitoreo de Aguas; descrita de acuerdo a la ficha del Anexo 3.

**Unidad Minera en Operación.-** Es aquella Concesión y/o Unidad Económica Administrativa (UEA) que se encontraba en operación antes de la entrada en vigencia del Decreto Supremo N° 016 -93-EM.

**Unidad Minera que reinicia Operaciones.-** Es aquella Concesión y/o Unidad Económica Administrativa (UEA) que vuelve a operar tras haber estado paralizada antes de la entrada en vigencia del Decreto Supremo N° 016-93-EM.

**Unidad Minera Nueva.-** Es aquella Concesión y/o Unidad Económica Administrativa (UEA) que comienza a operar con posterioridad a la entrada en vigencia del Decreto Supremo N° 016 -93-EM.

**Concentración Promedio Anual.-** Es la media aritmética de los resultados analíticos obtenidos durante un año calendario.

## ANEXO 1

### NIVELES MAXIMOS PERMISIBLES DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERO-METALURGICAS EN OPERACION

| PARAMETRO                  | VALOR EN CUALQUIER MOMENTO | VALOR PROMEDIO ANUAL      |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| ph                         | Mayor que 6 y Menor que 9  | Mayor que 6 y Menor que 9 |
| Sólidos suspendidos (mg/l) | 50                         | 25                        |
| Plomo (mg/l)               | 0.4                        | 0.2                       |
| Cobre (mg/l)               | 1.0                        | 0.3                       |
| Zinc (mg/l)                | 3.0                        | 1.0                       |
| Fierro (mg/l)              | 2.0                        | 1.0                       |
| Arsénico (mg/l)            | 1.0                        | 0.5                       |
| Cianuro total (mg/l) *     | 1.0                        | 1.0                       |

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

CIANURO TOTAL, equivalente a 0.1 mg/l de Cianuro Libre y 0.2 mg/l de Cianuro Fácilmente disociable en ácido.

## ANEXO 2

### VALORES MAXIMOS DE EMISION PARA LAS UNIDADES MINERAS QUE REINICIAN OPERACIONES

| PARAMETRO                  | VALOR EN CUALQUIER MOMENTO     | VALOR PROMEDIO ANUAL           |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| ph                         | Mayor que 5.5 y Menor que 10.5 | Mayor que 5.5 y Menor que 10.5 |
| Sólidos suspendidos (mg/l) | 100                            | 50                             |
| Plomo (mg/l)               | 1                              | 0.5                            |
| Cobre (mg/l)               | 2                              | 1                              |
| Zinc (mg/l)                | 6                              | 3                              |
| Fierro (mg/l)              | 5                              | 2                              |
| Arsénico (mg/l)            | 1                              | 0.5                            |
| Cianuro total (mg/l)       | 2                              | 1                              |

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

### ANEXO 3

#### FICHA DE IDENTIFICACION PUNTO DE CONTROL

|                                |
|--------------------------------|
| Nombre :                       |
| Coordenadas U.T.M. ( ± 100 m): |
| Descripción (Ubicación):       |

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

**Nota:** La descripción deberá realizarse tomando como referencia accidentes Topográficos y/o instalaciones que permitan determinar la ubicación del punto de control.

### ANEXO 4

#### FRECUENCIA DE MUESTREO Y PRESENTACION DE REPORTE

| VOLUMEN TOTAL DE EFLUENTE         | FRECUENCIA DE MUESTREO | FRECUENCIA DE PRESENTACIÓN DE REPORTE |
|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| Mayor que 300 m <sup>3</sup> /día | Semanal                | Trimestral (1) y                      |
| 50 a 300 m <sup>3</sup> /día      | Trimestral             | Semestral (2)                         |
| Menor que 50 m <sup>3</sup> /día  | Semestral              | Anual (3)                             |

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

**Nota:** (1) Ultimo día hábil de los meses de marzo, junio, setiembre y diciembre

(2) Ultimo día hábil de los meses de junio y diciembre

(3) Ultimo día hábil del mes de junio

Los reportes del mes de junio estarán contenidos en el Anexo 1 del Decreto

Supremo N° 016-93-EM.

## ANEXO 5

### FRECUENCIA DE ANALISIS QUIMICO

| PARAMETRO           | EFLUENTE<br>MAYOR QUE 300<br>m <sup>3</sup> /día | EFLUENTE<br>DE 50 A 300 m <sup>3</sup> /día | EFLUENTE<br>MENOR QUE 50<br>m <sup>3</sup> /día |
|---------------------|--|---|---|
| PH                  | Semanal  | Trimestral                                  | Semestral                                       |
| Sólidos suspendidos | Semanal  | Trimestral                                  | Semestral                                       |
| Pb, Cu, Zn, Fe, As  | Mensual  | Trimestral                                  | Semestral                                       |
| CN total            | Semestral  | Quincenal                                   | Trimestral                                      |

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

## ANEXO 6

### RESULTADOS ANALITICOS

Nombre Compañía/Unidad :

Tipo de muestreo : (puntual o automático)

Punto de muestreo:

Cuerpo de agua Recepto : (nombre)

| Fecha y hora de Muestreo      | :                       |
|-------------------------------|-------------------------|
| Código de la muestra          | :                       |
| Nombre del laboratorio        | :                       |
| Flujo en el punto de muestreo | :(m <sup>3</sup> / día) |
| PARAMETROS                    | RESULTADOS ANALITICOS   |
| pH (unidades estándar)        |                         |
| Sólidos suspendidos (mg/l)    |                         |
| Plomo(disuelto) (mg/l)        |                         |
| Cobre (disuelto) (mg/l)       |                         |
| Zinc (disuelto) (mg/l)        |                         |
| Fierro (disuelto) (mg/l)      |                         |
| Arsénico (disuelto) (mg/l)    |                         |
| Cianuro Total (mg/l)          |                         |

Firma del Titular o Representante Legal:.....

Fuente: Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM (13.ene.1996)

## ANEXO 7

### GESTION AMBIENTAL EN ACTIVIDADES MINERAS

#### Consideraciones para el Plan de Cierre

*Alyson Warhust y Ligia Noronha señalan que "El principal objetivo de la planificación de cierre es reducir la extensión del daño ambiental y la generación de residuos, a través de la reducción del lapso de tiempo entre la ocurrencia del daño y la remediación...." (3)*

El Plan de Abandono se contempla en los Sistemas de Manejo Ambiental, con el propósito de que la zona sea rehabilitada. Los problemas a corto y largo plazo, con respecto al drenaje ácido en las minas, han demostrado que pueden ser graves a nivel ambiental y económico, si no se realiza la necesaria planificación y manejo de ingeniería antes del cierre.

El cierre de mina, no sólo se refiere al momento en que termina toda actividad minera, sino también al cierre de todos los componentes que se encuentran en ella, en particular, con la generación del drenaje ácido, los más relevantes son las acumulaciones de masivos residuos mineros que provienen de las operaciones de extracción, y procesamiento de minerales, tales como estériles, los minerales de baja ley, rípios de lixiviación, relaves y escorias.

La planificación de los requerimientos técnicos y financieros para asegurar la protección del medio ambiente al cierre de la mina constituye un componente esencial del desarrollo y la operación minera. Se incluye las siguientes medidas para una rehabilitación de área intervenida por la actividad minera:

---

**3** *Alyson Warhust y Ligia Noronha Article titulado "Integrated Environmental Management Through Planning for Closure from the Outset: The Challenges" Capítulo 2 del libro Environmental Policy in Mining: Corporate Strategy and Planning for Closure, A. Warhust y L. Noronha, 1999.*

- 1.- El almacenamiento de relaves producidos en la fase de concentración en una superficie de material impermeable.
- 2.- La neutralización de ácidos metales pesados y materiales radioactivos presentes en las canchas de relaves y en la roca expuesta en la mina.
- 3.- La estabilización y cobertura de relaves y otros desechos.
- 4.- La cobertura de toda la superficie alterada por la actividad con su capa de tierra original.
- 5.- La reforestación con especies nativas.
- 6.- El traslado fuera del sitio de toda la maquinaria, equipos, insumos y otros elementos introducidos durante el proyecto.

Los objetivos específicos del cierre de minas, consisten en asegurar y garantizar que la salud y seguridad de las personas no sean comprometidas, y minimizar el daño ambiental.

### **Desarrollo Sostenible Cierre de Mina y Recuperación**

La creciente conciencia del público acerca del estado del ambiente ha probado ser una fuerza que cambiara la industria minera. Los términos y las condiciones en las cuales la compañía es capaz de desarrollar, operar y cerrar la mina refleja los significantes cambios en la actitud del público con respecto a los impactos sociales, económicos y ambientales de la minería (Brevik et al., 1997; Carbón, 1997; Cragg et al.1997- op.cit; Cordes, 1997)<sup>(4, 5, 6)</sup>.

---

<sup>4</sup> Brevik, T. et al. (1997). *Mining: Changing the focus for a sustainable future. Industry and Environment. UNEP. v. 20, n. 4, p.3.*

<sup>5</sup> Carbon, B. (1997). *Sustainable Development and the evolving agenda for environmental protection in the mining industry. Industry and Environment. UNEP. v. 20, n. 4, p. 10-13.*

<sup>6</sup> Cordes, J. (1997). *Mining and the Environment: Driving forces for change. Industry and Environmental.*

- 1.- El almacenamiento de relaves producidos en la fase de concentración en una superficie de material impermeable.
- 2.- La neutralización de ácidos metales pesados y materiales radioactivos presentes en las canchas de relaves y en la roca expuesta en la mina.
- 3.- La estabilización y cobertura de relaves y otros desechos.
- 4.- La cobertura de toda la superficie alterada por la actividad con su capa de tierra original.
- 5.- La reforestación con especies nativas.
- 6.- El traslado fuera del sitio de toda la maquinaria, equipos, insumos y otros elementos introducidos durante el proyecto.

Los objetivos específicos del cierre de minas, consisten en asegurar y garantizar que la salud y seguridad de las personas no sean comprometidas, y minimizar el daño ambiental.

### **Desarrollo Sostenible Cierre de Mina y Recuperación**

La creciente conciencia del público acerca del estado del ambiente ha probado ser una fuerza que cambiara la industria minera. Los términos y las condiciones en las cuales la compañía es capaz de desarrollar, operar y cerrar la mina refleja los significantes cambios en la actitud del público con respecto a los impactos sociales, económicos y ambientales de la minería (Brevik et al., 1997; Carbón, 1997; Cragg et al.1997- op.cit; Cordes, 1997)<sup>(4, 5, 6)</sup>.

---

<sup>4</sup> Brevik, T. et al. (1997). *Mining: Changing the focus for a sustainable future. Industry and Environment. UNEP. v. 20, n. 4, p.3.*

<sup>5</sup> Carbon, B. (1997). *Sustainable Development and the evolving agenda for environmental protection in the mining industry. Industry and Environment. UNEP. v. 20, n. 4, p. 10-13.*

<sup>6</sup> Cordes, J. (1997). *Mining and the Environment: Driving forces for change. Industry and Environmental.*

La demanda del público de que la industria sea más sostenible está forzando a muchas compañías a reexaminar sus prácticas de negocios.

Una propuesta que ha sido tenida en cuenta para simplificar el problema es el entender la minería como un temporal uso de la tierra. La minería es considerada sostenible solo en el contexto de sus efectos sobre el ecosistema circundante y si la comunidad local es sostenible. Dado este punto de vista, esto naturalmente implica que el acto de recuperación asume una importancia crítica cuando se reestablece la sustentabilidad tanto del ecosistema como de la comunidad que han sido impactados por la minería (Powter et al., 1991) <sup>(7)</sup>

### **Situación en América Latina**

Uno de los principales obstáculos para implementar el cierre de minas y plan de Recuperación es que muchas compañías han estado en operación mucho antes de la existencia de las regulaciones de Recuperación. Como consecuencia, estas compañías comúnmente no están estructuradas para asumir el costo adicional asociado con la Recuperación. Debido a los cambios que la nueva legislación ambiental demanda de estos proyectos, algunos observadores de América Latina tienen la sensación de que muchos de los planes de cierre y Recuperación preparados por las compañías mineras fueron escritos solo para cumplir con los requerimientos burocráticos.

Muchos de los artículos identificados en la base de datos señalan que es de extrema importancia aquel cierre de operaciones sea considerada desde la etapa inicial del proyecto minero. Solo después de desarrollar un claro entendimiento del alcance de los requerimientos finales de la Recuperación se puede analizar la factibilidad real del proyecto.

---

*7 Powter, C.B. and Chymko, N. (1991). The Relationship between reclamation and sustainable development. Proceedings of the Fifteenth Annual B.C. Mine Reclamation Symposium, Kamloops, BC. June 24-28, 1991. Ed. British Columbia Technical and Research Committee on Reclamation and Canadian Land Reclamation Association.*

## ANEXO 8

### ESBOZO DE UN PLAN DE CIERRE TÍPICO <sup>(8)</sup>

#### 1. Introducción

- Ubicación de la Mina
- Objetivos del Plan de Cierre
- Requerimientos del Plan de Cierre

#### 2.0 Componentes del Proyecto

##### 2.1 Descripción del Proyecto

Tasas de Producción, Vida útil de la Mina. Proceso de Minado, Procesamiento del mineral, Cronograma.

##### 2.1.1 Instalaciones de Desechos de la Mina

Sobrecarga y Desmonte, Mineral agotado, Depósitos de relaves, Pozas de Aguas residuales y Pozas de Procesamiento, Rellenos, Disposición de Aguas Cloacales.

##### 2.1.2 Sistemas de Manejo de Agua

Abastecimiento de agua, Estructuras de derivación, Control de agua de lluvia, Pozas de Sedimentación, Puntos de descarga, Plantas de tratamiento.

---

<sup>8</sup> *Guía Ambiental para el Cierre y Abandono de Minas, Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA)*

### **2.1.3 Estructuras Accesorias**

Edificios y talleres, Suministro de energía, Caminos de acceso y de transporte, Equipo de procesamiento, Almacenamiento de sustancias químicas y combustible, Almacenamiento de explosivos.

### **3.0 Criterios para el Cierre**

Estabilidad física, Criterios de diseño para el agua de lluvia, Criterios para la calidad del agua, Criterios para la calidad del aire, Uso de la tierra.

### **4.0 Actividades de Cierre para la Estabilidad Física y Química**

Minas a tajo abierto/subterráneas, Pilas de sobrecapa y desmonte, Depósitos de relaves, Pilas de mineral agotado, Derivaciones del agua superficial, Áreas de Procesamiento.

### **5.0 Cronograma de Actividades de Cierre**

Cierre concurrente, Actividades de cierre al final de las labores mineras.

### **6.0 Monitoreo en el período de Postcierre**

Calidad del agua, Calidad del aire, Estabilidad Física, éxito de la Rehabilitación.

### **7.0 Costos Estimados del Cierre**

Actividades de cierre simultáneas con operaciones, Costos de cierre al final de las labores mineras.

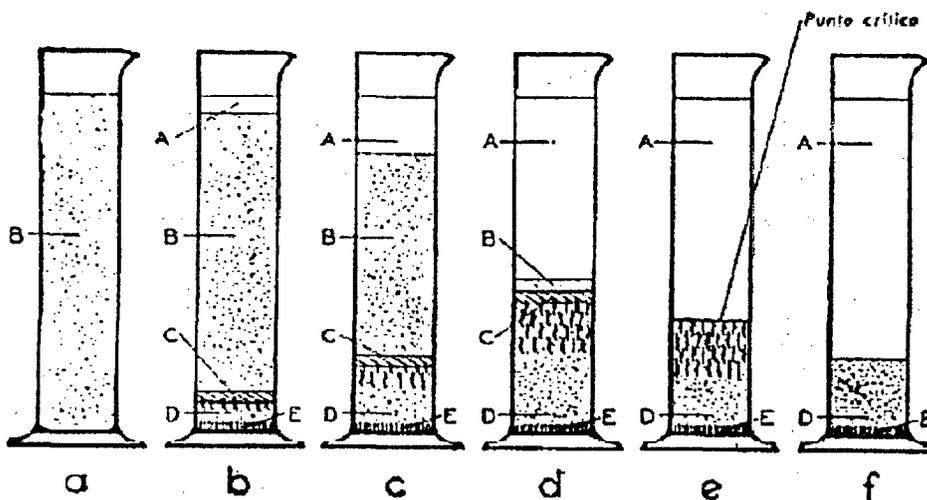
## ANEXO 9

### DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN METODO GRAFICO

#### Ensayos discontinuos de sedimentación

Los ensayos discontinuos de sedimentación se realizan a escala de laboratorio y tienen como finalidad la determinación de la velocidad de sedimentación de los sólidos de una suspensión.

La experimentación consiste en llenar una probeta, de 1 litro de capacidad, con la suspensión, seguidamente se agita para homogeneizar y se deja en reposo. Con el paso del tiempo se perciben cuatro zonas debido a la concentración de los sólidos que sedimentan.



Probetas típicas de sedimentación de suspensiones concentradas

A: Zona superior de líquido claro, libre de partículas sólidas.

B: Zona de alimentación, la suspensión se mantiene a una concentración similar a la inicial.

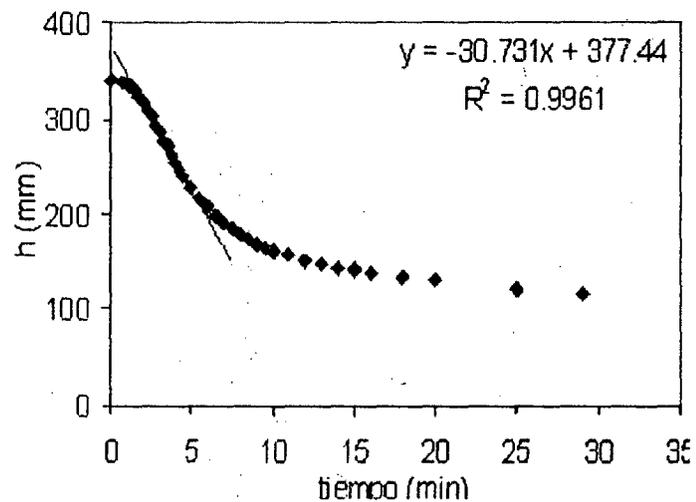
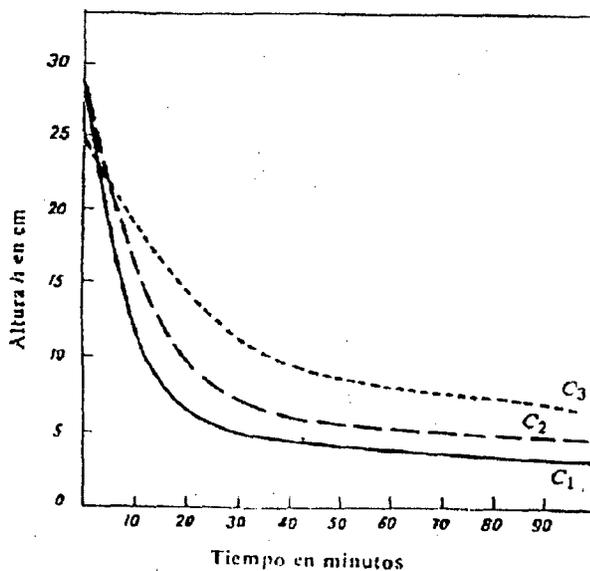
C: Zona de espesamiento, de alta concentración de sólidos, es posible observar líneas de corrientes de líquidos desplazándose hacia arriba.

D: Zona inferior de comprensión, la sedimentación se va compactando.

Periódicamente se toman la altura que sobre la probeta definen las líneas de separación del líquido clarificado y la suspensión; y se anota el tiempo transcurrido.

La curva relaciona la altura del límite entre la zona A y B frente al tiempo. Durante la primera etapa de la sedimentación la velocidad es constante, a medida que el sólido se acumula en la zona D, la velocidad de sedimentación disminuye y desciende continuamente hasta que se alcanza la altura final, a tiempo infinito.

La velocidad de sedimentación se corresponde con la pendiente del tramo recto de la curva. La velocidad de sedimentación es la pendiente de la tangente a la curva en la zona inicial (que es prácticamente recta). La velocidad de sedimentación se determina por cálculo estadístico.



Determinación de las velocidades de sedimentación a partir de la curva de sedimentación discontinua.