

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA

FACULTAD DE GEOLOGÍA, GEOFÍSICA Y MINAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS



Asignatura: Asesoría de tesis

Proyecto Capstone

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE NEUTRALIZACIÓN PARA EL TRATAMIENTO
Y RECUPERACIÓN DE AGUAS ÁCIDAS DE LA MINA SAN CRISTÓBAL DE
LA COMPAÑÍA MINERA VOLCÁN.**

OBLITAS TACO ALEXANDER

RONDON ZEBALLOS JIMENA

VELA PORTOCARRERO NEYVER

SIPAUCAR KUIRO MARILIZ

ASESOR: ING. REYNALDO CANAHUA LOZA

AREQUIPA - PERÚ

2019

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar de la generación de aguas acidas, a través de recopilación de datos históricos, estudios que se hicieron anteriormente en la mina San Cristóbal de Compañía Volcan S.A.A.

La revisión de sistema de recuperación de agua de mina y labores, actualmente existe un sistema de bombeo de recuperación que son depositados en el reservorio Yahaira, pero no existe un tratamiento apropiado y/o una planta de tratamiento de las misma.

El caudal de agua con la cual llevaremos a cabo nuestra investigación es de 12 litros/ segundo, dato de la capacidad del sistema de bombeo.

Como material neutralizante analizamos con un carbonato ya que se demuestra que el agua recuperada es acida con un pH que fluctúa de 2 – 4. el carbonato es la cal, que abunda en la zona y por último analizamos su costo para la evaluación económica.

Palabras clave: Aguas acidas, labores de minado, bombeo de recuperación, costos

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the generation of acid waters, through the collection of historical data, studies that were previously carried out in the San Cristóbal mine of Compañía Volcan S.A.A.

The revision of the mine and labor water recovery system, currently there is a recovery pumping system that is deposited in the Yahaira reservoir, but there is no appropriate treatment and / or a treatment plant for them.

The water flow with which we will carry out our research is 12 liters / second, given the capacity of the pumping system.

As neutralizing material we analyze with a carbonate since it is shown that the recovered water is acidic with a pH that fluctuates from 2 - 4. the carbonate is lime, which is abundant in the area and finally we analyze its cost for economic evaluation.

Key words: Acid waters, mining work, recovery pumping, costs

INDICE GENERAL

CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 TITULO Y UBICACION	1
1.1.1 Título	1
1.1.2 Ubicación	1
1.2 ACCESIBILIDAD.....	3
1.3 JUSTIFICACION	3
1.4 FORMULACION Y DEFINICION DEL PROBLEMA.....	3
1.4.1 Definición de problema	3
1.4.2 Formulación del problema.....	3
1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	4
1.5.1 Alcance	4
1.5.2 Limitaciones	4
1.6 VARIABLES E INDICADORES	4
1.6.1 Variables independientes.....	4
1.6.2 Variables dependientes.....	4
1.6.3 Indicadores.....	4
1.7 OBJETIVOS	4
1.7.1 Objetivo general.....	4
1.7.2 Objetivos específicos	5
1.8 FORMULACION DE HIPOTESIS.....	5
1.8.1 Hipótesis general	5
CAPITULO II.....	6
MARCO TEORICO	6
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION.....	6
2.2 MECANISMOS DE GENERACION DE AGUAS ACIDAS.....	6
2.2.1 Formulación de ecuaciones Químicas	7
2.3 PREVENCION Y CONTROL DE DRENAJE ACIDOS	10
2.3.1 Métodos de barreras.....	10
2.3.2 Métodos químicos.....	11
2.3.3 Métodos de Inhibición Bacteriana	12
2.4 CARACTERIZACION DE AGUAS DE MINA	13
2.4.1 Acidez de aguas de mina.....	14
2.4.2 Medida de acidez de aguas de mina.	17
2.4.3 Fases mineralógicas en aguas acidas de mina	18
2.5 SISTEMA DISPONIBLE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS..	19
2.5.1 Tratamiento por método químico activos de drenaje de ácidos.....	20
2.5.2 Tratamiento por método pasivo de drenaje de ácidos	25

2.5.3	Tratamiento de aguas de mina de flujos subterráneos	27
CAPITULO III	.....	29
MATERIAL DE ESTUDIO	.....	29
3.1	FISIOGRAFÍA.....	29
3.1.1	Clima	29
3.1.2	Flora y fauna	29
3.1.3	Hidrología.....	30
3.2	GEOLOGÍA	30
3.2.1	Geología local	30
3.2.2	Geología regional.....	30
3.2.3	Geología Económica.....	31
3.2.4	Estructuras geológicas.....	31
3.3	RESERVAS Y RECURSOS	33
3.3.1	Reservas	33
3.3.2	Recursos	34
3.4	MINERIA	36
3.4.1	Método de explotación	36
3.4.2	Perforación.....	36
3.4.3	Sostenimiento	36
3.4.4	Suministro de Agua en la Mina	37
CAPITULO IV	.....	39
METODOLOGIA DE INVESTIGACION	.....	39
4.1	TIPO DE INVESTIGACION.....	39
4.2	NIVEL DE INVESTIGACION.....	39
4.3	METODO DE INVESTIGACION	39
4.3.1	Plan de trabajo	39
4.4	CRITERIOS DE EXCLUSION E INCLUSION	39
4.4.1	Criterios de inclusión.....	39
4.4.2	Criterios de exclusión.....	39
4.5	VALIDACIÓN DE Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS	40
4.6	POBLACION, MUESTRA Y MUESTREO	40
4.6.1	Población	40
4.6.2	Muestra	40
4.6.3	Muestreo	40
4.7	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	40
CAPITULO V	.....	41
DESARROLLO DEL TEMA DE TESIS	.....	41
5.1	METODOLOGIA PARA PREDECIR LA GENERACION ACIDA.....	41
5.1.1	Predicción de la generación acida mediante ensayos estáticos	42

5.1.2	Ensayos cinéticos	42
5.1.3	Modelización matemática.....	43
5.2	CONCENTRACION TIPICA DE DEL DE MINA (DAM).....	44
5.3	FASES EN EL TRATAMIENTO QUÍMICO CONVENCIONAL DE DRENAJES ÁCIDOS	45
5.3.1	Eliminación de sólidos en suspensión por decantación	46
5.3.2	Neutralización química de las aguas ácidas	47
5.4	PRESENTACIÓN Y MUESTREO DE MUESTRAS DE MATERIAL NEUTRALIZANTE	49
5.5	DISEÑO DE MICROPLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS.....	49
5.5.1	Requerimiento de agua en mina	49
5.5.2	Esquema de bombeo de agua en el reservorio Yahaira.....	50
5.5.3	Diseño de sistema de tratamiento de aguas acidez	51
5.5.4	Diseño de sistema de tratamiento de aguas acidez	51
CAPITULO VI	.....	52
ANALISIS DE RESULTADOS	.....	52
6.1	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS	52
6.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS.....	56
6.3	ANALISIS ECONOMICO.....	60
6.3.1	Costos Comunes.....	61
6.3.2	Costo Utilizando Materiales Neutralizadores de la Zona	62
6.3.3	Costo Utilizando Materiales Neutralizadores Adquiridos a Proveedores Externos.....	63
6.3.4	Costo total de neutralización por muestra alcalina utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos (US \$ / ton).....	64
6.4	ANALISIS DE DISEÑO DE PLANTA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AMD	65
6.4.1	Etapa 1	65
6.4.2	Etapa 2.....	65
6.4.3	Etapa 3.....	65
CONCLUSIONES	.....	66
RECOMENDACIONES	.....	67
BIBLIOGRAFIA	.....	68

INDICE DE PLANOS

Plano 1:1:Ubicacion mina San Cristóbal. _____ 2

INDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 4-1:Formación de aguas acidas en mina.</i>	<i>6</i>
<i>Ilustración 4-2:Sustancias mas utilizadas para la generacion de aguas acidas.</i>	<i>12</i>
<i>Ilustración 4-3:Bacteria Promac.</i>	<i>13</i>
<i>Ilustración 4-4:Fuentes de generación de residuos y drenajes ácidos.</i>	<i>14</i>
<i>Ilustración 4-5:Oxidacion de la pirita.....</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4-6:Reacciones que caracterizan la oxidación de un sulfuro en la generación de aguas ácidas.</i>	<i>15</i>
<i>Ilustración 4-7:Acidithiobacillus ferrooxidans transformando el Fe²⁺ (ferroso) a Fe³⁺ (férrico) color naranja.</i>	<i>16</i>
<i>Ilustración 4-8:Fase mineralógica ferrosa.</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 4-9:Fase mineralógica ferrica.</i>	<i>18</i>
<i>Ilustración 4-10:Fase mineralógica aluminica.</i>	<i>19</i>
<i>Ilustración 4-11:Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas.....</i>	<i>23</i>
<i>Ilustración 4-12:Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso HDS.</i>	<i>24</i>
<i>Ilustración 4-13:Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso de neutralización coagulación-decantación (NCD), (Villachica, 2005).</i>	<i>25</i>
<i>Ilustración 4-14:Rango óptimo de aplicación de los sistemas de tratamiento de aguas ácidas.</i>	<i>26</i>
<i>Ilustración 4-15:Circulación del agua a través de un canal revertido de caliza y construido en una escombrera restaurada.</i>	<i>27</i>
<i>Ilustración 4-16:Sistema de una barrera reactiva permeable.</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 4-17:Tipos de barreras reactivas permeables.....</i>	<i>28</i>
<i>Ilustración 10-1:Relacion entre los potenciales de neutralización y acidez de residuos mineros.</i>	<i>44</i>
<i>Ilustración 10-2:Eliminación de sólidos en suspensión por decantación.</i>	<i>46</i>
<i>Ilustración 10-3:tratamiento más común utilizado en el tratamiento de aguas ácidas.....</i>	<i>48</i>
<i>Ilustración 10-4:Esquemas de bombeo de agua en el reservorio yahaira Fuente JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA.....</i>	<i>50</i>
<i>Ilustración 12-1::Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 3.</i>	<i>53</i>
<i>Ilustración 12-2:Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 7.</i>	<i>55</i>

INDICE DE GRAFICAS

GRAFICA 4-1:Reporte elaborado de Análisis Químico Cía. Minerco Mercantil del Perú S.A	7
GRAFICA 4-2:Agentes empleados para la eliminación de iones metálicos pesados por precipitación.	22
GRAFICA 6-1:Reservas de Mineral Mina San Cristóbal -2016.	34
GRAFICA 8-1:Zonas de muestreo.	40
GRAFICA 10-1:Fuentes de información de la generación del potencial ácido en minas.	43
GRAFICA 10-2:Clasificación ácida/base de rocas mediante ensayos estáticos (Environment Australia, 1997).	44
GRAFICA 10-3:Tabla composición química de muestras de relaves -"Análisis Químico ICP – SGS GQ1005019-22(Pesos) – Anexos"	45
GRAFICA 10-4:Muestras de Relave recolectadas que presentan un alto potencial de generación ácida.	48
GRAFICA 10-5:Resultados de Análisis de Laboratorio a muestras de material neutralizante referenciales tomadas de informe de ensayo ambiental.	49
GRAFICA 10-6:consumos de agua de equipos por una labor por guardia Fuente JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA.	50
GRAFICA 12-1:Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 3.	53
GRAFICA 12-2:Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 7.	54
GRAFICA 12-3:la mineralogía de las muestras estudiadas en términos de especies.	57
GRAFICA 12-4:Criterios de Evaluación de los Resultados del conteo Ácido Base – MEM.	58
GRAFICA 12-5:Caracterización Ácido / Base de los relaves analizados.	59
GRAFICA 12-6:Vinculación de dos tipos de exámenes (químico mineralógico y estático).	60
GRAFICA 12-7:Costo fijo de cada partida común.	61
GRAFICA 12-8:Costos por tonelada de la caliza.	62
GRAFICA 12-9:Costo por tonelada del desmonte.	62
GRAFICA 12-10:Utilizando cal-viva al 90%	64
GRAFICA 12-11:Utilizando cal hidratada al 87%.	64
GRAFICA 12-12:Costo utilizando cal viva al 90%	64
GRAFICA 12-13:Costo utilizando cal hidratada al 87%	64

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 TITULO Y UBICACION

1.1.1 Título

ESTUDIO DE GENERACION DE AGUAS ACIDAS Y SU NESECIDAD DE NEUTRALIZACION - EN LA MINA SAN CIRSTOBAL DE “VOLCÁN COMPAÑÍA MINERA S.A.A.”

1.1.2 Ubicación

La mina San Cristóbal, políticamente está ubicada en el distrito de Yauli, provincia del mismo nombre, del departamento de Junín Geográficamente se encuentra en el flanco este de la Cordillera Occidental de los Andes centrales del Perú; a 110 Km. en línea recta, de la ciudad de Lima.

LIMITES

- ◆ Por el norte, con la unidad de producción Carahuacra.
- ◆ Por el sureste, con la Unidad de Producción de Anda chagua.
- ◆ Por el este, con la Comunidad Campesina de Huayhuay.
- ◆ Por el sur, con la laguna de Páncar.
- ◆ Por el oeste, con la laguna de Pomacocha

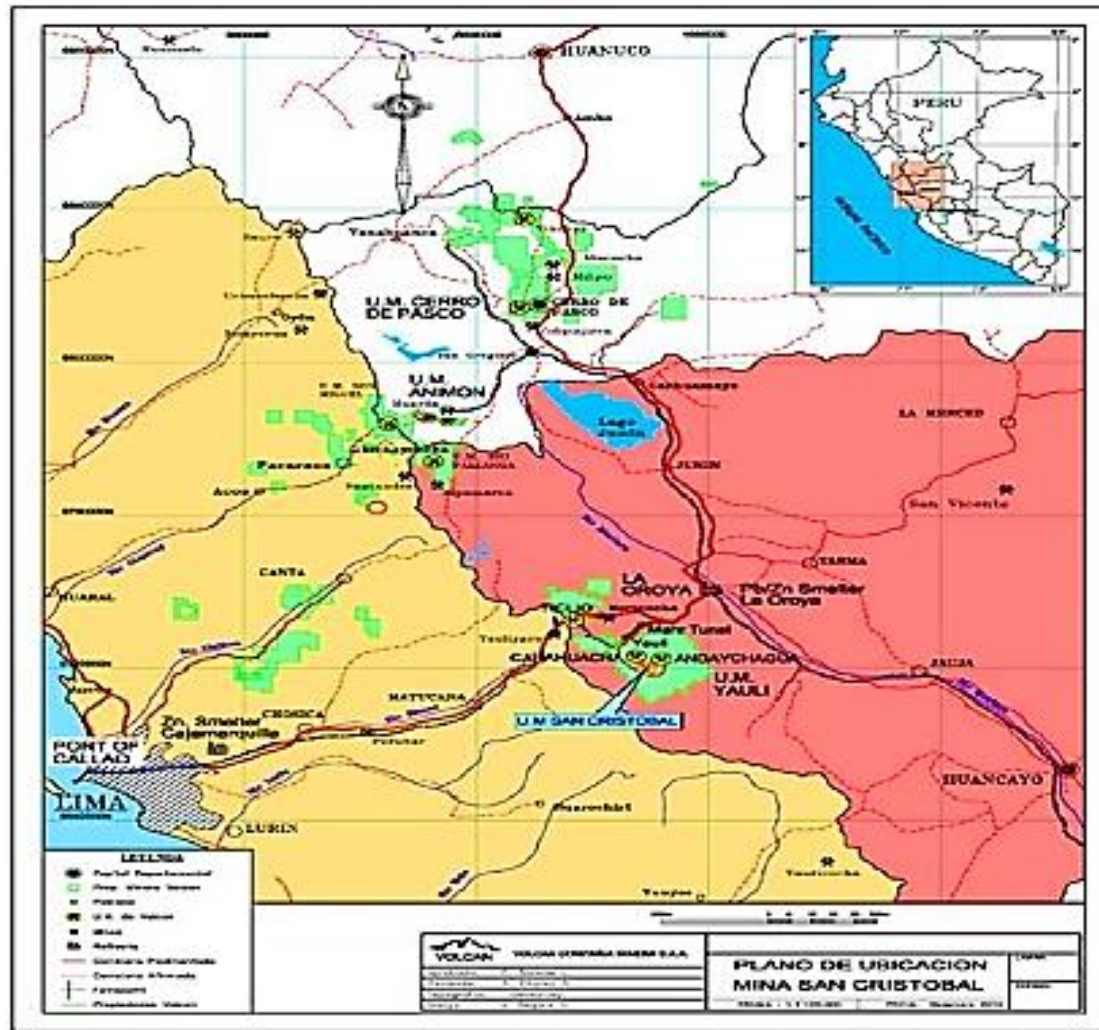
Sus coordenadas geográficas son:

76° 05' 00” de longitud Oeste 11° 43' 00” de latitud Sur.

Coordenadas UTM: Zona: 18 L Norte: 8 780 225,37 m

Este: 344 384, 38 m

Elevación: 4700 msnm



Plano 0:1:Ubicacion mina San Cristóbal.

1.2 ACCESIBILIDAD

La altitud media del distrito es de 4,700 m. sobre el nivel del mar. La mina San Cristóbal es fácilmente accesible, utilizando la carretera central, de la cual, cerca de la localidad de Pachachaca, parte un ramal de 20 kilómetros que conduce a San Cristóbal además, el ferrocarril central tiene una estación en Yauli a 12 kilómetros del área.

1.3 JUSTIFICACION

Lo que se busca en este trabajo es hacer un análisis detallado y confiable que permita determinar el potencial de generación ácida de una muestra de relave. De esta manera, puede ayudarnos a determinar los procedimientos a seguir para la neutralización de agentes contaminantes. Para este trabajo se tomará en cuenta la legislación actual vigente (límites máximos permisibles).

1.4 FORMULACION Y DEFINICION DEL PROBLEMA

1.4.1 Definición de problema

- i. ¿En la región de Junín se tiene minas que generan aguas acidas?
- ii. ¿Existe un estudio de análisis de neutralización y tratamiento de estas aguas acidas de mina?
- iii. ¿En cuánto tiempo se haría el tratamiento?
- iv. ¿Cuánto nos costaría al neutralizar con caliza u otro carbonato?

1.4.2 Formulación del problema

PROBLEMA	CAUSAS	EFFECTOS
Las aguas acidas son toxicas y dañinas para la vida, cual es tratamiento que se hace en la mina "YAULI-VOLCAN COMPAÑÍA S.A.A."	Falta de conocimiento profundo del tratamiento y neutralización del DAM.	Rehuso de las aguas acidas ya tratadas en otras actividades y su utilización en el medio ambiente de manera más amigable.

Tabla 0-1: Formulación del problema.

1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES

1.5.1 Alcance

Este estudio abarca al análisis de las aguas acidas en la mina San Cristóbal de “YAULI-VOLCAN COMPAÑÍA S.A.A.” y sus unidades de trabajo.

1.5.2 Limitaciones

El trabajo no se desarrollará en otras minas ya que la información es diferente según su ubicación de la mina, factores meteorológicos, clima, etc.

1.6 VARIABLES E INDICADORES

1.6.1 Variables independientes

- ◆ Caracterización del material presente en el drenaje acido.
- ◆ Clima, Flora y Fauna

1.6.2 Variables dependientes

- ◆ Geometría y volumen de del drenaje acido.
- ◆ Ph y potencial de acidez.
- ◆ Cantidad del material neutralizante a utilizar.

1.6.3 Indicadores

- ◆ Nivel de ph.
- ◆ Nivel del potencial de acidez.
- ◆ Concentración de material neutralizante.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo general

Determinar la capacidad de agua ácida que se genera, para el tratamiento y neutralización utilizando un material apropiado.

1.7.2 Objetivos específicos

- ◆ Calcular el nivel de concentración de acidez del drenaje ácido.
- ◆ Hallar el nivel de pH y potencial de acidez.
- ◆ Analizar las soluciones más adecuadas para la neutralización y remediación de los impactos ambientales del relave considerado, tomando en cuenta costos y cantidades necesarias de los insumos.

1.8 FORMULACION DE HIPOTESIS

1.8.1 Hipótesis general

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

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION

La mayor contaminación ambiental que se produce en la mina San Cristóbal es cansada por el drenaje ácido de sus bocaminas, las cuales descargan sus aguas contaminadas directamente a los ríos Carnhuacra y Yauli (principal tributario del río Mantaro). Estas aguas presentan una elevada cantidad de metales pesados y 1m aspecto ferroso y turbio por el elevado contenido de sólidos en suspensión; lo cual hace que no existan flora y fauna acuática en estos ríos. En este trabajo analizaremos el problema ambiental que produce el drenaje ácido de mina (mina subterránea), mas no así los que se producen en superficie (botaderos de desmonte, cancha de relaves, tajos abiertos, etc.) (MOSTACERO, 2000)

2.2 MECANISMOS DE GENERACION DE AGUAS ACIDAS

La formación de aguas ácidas tiene lugar a partir de la oxidación química de los sulfuros, acelerada en muchos casos por la acción bacteriana. Los principales elementos que intervienen son: los sulfuros reactivos, el oxígeno y el agua (vapor o líquida), y como elemento catalizador las bacterias.

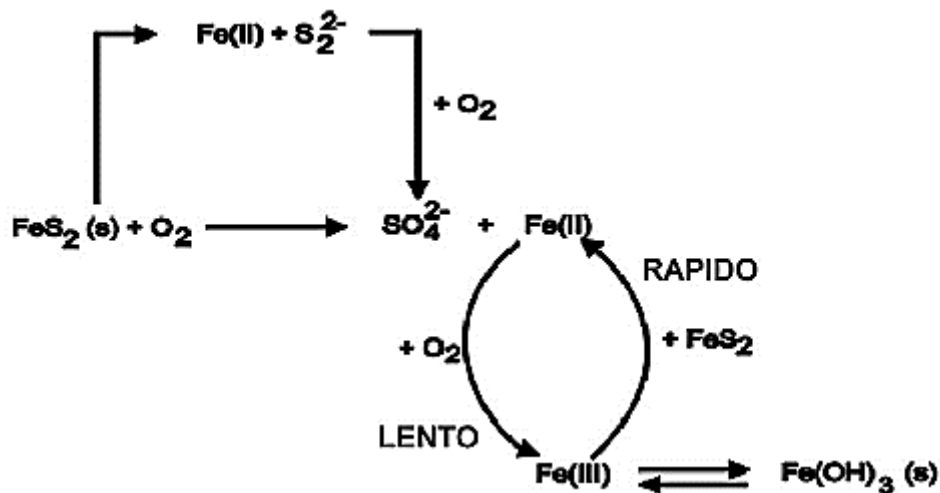


Ilustración 0-1: Formación de aguas ácidas en mina.

Velocidad de reacción es una variable muy importante, pues si el proceso ocurre muy lentamente el efecto sobre el medio puede ser despreciable. Sin embargo, si la generación de aguas ácidas es rápida el problema se agrava, ya que se producirá la contaminación del entorno.

Esta variable, la velocidad de reacción, depende de numerosos factores como temperatura, cantidad de sulfuros, granulometría, presencia de agua, aire y bacterias. Ciertas especies mineralógicas son más reactivas que otras; por ejemplo, la marcasita, que tiene la misma fórmula química que la pirita, es muy inestable y puede generar rápidamente aguas ácidas. Los sulfuros de otros metales (plomo, cinc o cobre) son generalmente menos reactivos que los de hierro.

2.2.1 Formulación de ecuaciones Químicas

Los diversos yacimientos con posibilidades de explotación, contienen minerales de composición química variable.

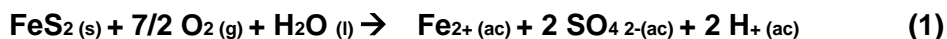
Una composición típica de la Compañía Minera, reportado por el Laboratorio de Análisis Químico Cía. Minerco Mercantil del Perú S.A es el siguiente:

Pb	5,52%	(Sulfuro)	Na ₂ O	0,80%
Pb	0,85%	(Oxido)	MgO	0,60%
Ag	1,29	Oz/Tn	CaO	3,00%
Zn	6,14%	(Sulfuro)	CO ₂	4,90%
Zn	0,40%	(Oxido)	H ₂ O	9,30%
Cd	0,25%		Insol	3,00%
Fe	5,70%		As	Trazas
Mn	6,20%		Bi	Id.
S	15,80%		N	Id.
S	0,20%	(Elemento)	P	Id.
Cl	0,20%		SO ₃	Id.
O	4,40%		Cu	0,00
Al ₂ O ₃	3,40%			

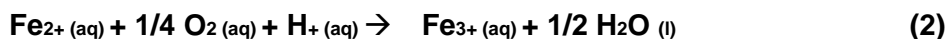
GRAFICA 0-1:Reporte elaborado de Análisis Químico Cía. Minerco Mercantil del Perú S.A

2.2.1.1 Reacción general para la formación de Drenaje Ácido de mina (DAM):

La reacción general que controla el proceso de formación de drenaje ácido es la siguiente:

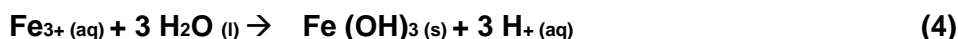


En presencia de oxígeno, el hierro ferroso sufre la reacción:



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

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



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

Consecuentemente, la evaluación de las especies minerales que constituyen las muestras de relave es de vital importancia. Así por ejemplo, especies minerales como la pirita, FeS_2 , galena, PbS , arsenopirita, FeAsS , enargita, Cu_3AsS_4 , esfalerita (con inclusiones de hierro o cadmio), $\text{Zn}_{1-x}\text{Cd}_x\text{S}$, pueden reaccionar al ser expuestos a agentes atmosféricos.

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

- **Sulfato de Cobre (CuSO₄):** Es un compuesto tóxico por ingestión, induce el vómito y resulta irritante ante un contacto prolongado con la piel.
- **Ácido Arsénico (H₃AsO₄):** sus usos industriales se ven reducidos por su alta toxicidad, entre los pocos encontramos: como preservante de maderas, como biocidas, agentes para dar acabados en vidrio y metal, etc.
- **Sulfato de Plomo (PbSO₄):** este producto es tóxico ante la inhalación, ingesta o inclusive al contacto con la piel, se le describe como un “veneno acumulativo”.
- **Sulfato Ferroso (II) (FeSO₄):** entre los principales usos industriales se encuentran: como agente reductor del cromato en el cemento, colorante de tintas, horticultura, etc.
- **Sulfato Férrico (III) (Fe₂ (SO₄)₃):** se usa como coagulante para desechos industriales y en pigmentos. Además actúa como agente oxidante en contacto con los minerales.
- **Ion (H⁺):** Principal ion que genera la acidez en la fuente de agua (drenaje ácido).
- **Ácido Sulfúrico (H₂SO₄):** La industria que más utiliza el ácido sulfúrico es la de los fertilizantes.
- **Iones Metálicos (Fe²⁺, Zn²⁺, Cd²⁺, etc.):** Estos iones metálicos pueden acarrear problemas graves a la salud de los seres humanos si son consumidas directamente de las fuentes acuosas (agua contaminada), como enfermedades a los sistemas respiratorios y/o nerviosos.

Todos estos productos resultan nocivos para el hombre sea cual sea su vía de ingreso al organismo (consumo directo del agua, uso para fines agrícolas, para regadío de terrenos, para uso común, etc.) y su presencia

en las muestras de relave analizadas o de sus elementos principales que podrían producirlos demuestran peligros potenciales para los efluentes líquidos con los que se podría mezclar el relave minero.

2.3 PREVENCIÓN Y CONTROL DE DRENAJE ÁCIDOS

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

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

2.3.1 Métodos de barreras

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

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

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

2.3.2 Métodos químicos

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

2.3.2.1 Adición de materiales alcalinos.

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

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



Ilustración 0-2: Sustancias más utilizadas para la generación de aguas ácidas.

Las sustancias más utilizadas suelen ser: hidróxido sódico o sosa cáustica (NaOH), calcita o caliza (CaCO_3), cal (CaO , Ca(OH)_2), hidróxido de aluminio (Al(OH)_3) y carbonato sódico (Na_2CO_3).

2.3.2.2 Adición de fosfatos.

La adición de fosfatos a los estériles y residuos de mina ralentiza la oxidación de los sulfuros, debido a la formación de fosfatos de hierro insolubles como $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ y FePO_4 que hacen disminuir la concentración de hierro férrico disponible para la reacción con los sulfuros como la pirita.

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

2.3.3 Métodos de Inhibición Bacteriana

La presencia de bacterias como el *Thiobacillus ferrooxidans* y otras que contribuyen a la oxidación del hierro influyen fuertemente en la generación ácida, pero si se logra eliminar estos microorganismos se puede llegar a

reducir hasta en un 50% el proceso de acidificación. Entre los bactericidas de mayor efectividad para inhibir la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*, se encuentran los surfactantes aniónicos, entre ellos el más eficaz y económico utilizado es el sodio lauril sulfato (SLS) aplicado mediante riego por aspersión, y los ácidos orgánicos.

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



Ilustración 0-3: Bacteria Promac.

2.4 CARACTERIZACION DE AGUAS DE MINA

La geoquímica de las aguas ácidas de mina es un fenómeno complejo al haber diversos procesos físicos, químicos y biológicos jugando un papel importante en la producción liberación, movilidad y atenuación de los contaminantes, comprende una serie de procesos, como: la oxidación de la pirita; y otros sulfuros; la oxidación e hidrólisis del hierro disuelto y otros metales; la capacidad neutralizadora de la ganga, mineral y roca encajante; la capacidad neutralizadora

de las aguas bicarbonatadas; la disponibilidad de oxígeno; la disponibilidad de agua líquida o en forma vapor; la localización y forma de zonas permeables en relación con las vías de flujo; las variaciones climáticas (diarias, estacionales o episodios de tormentas); la formación de eflorescencias y su redisolución; el calentamiento por conducción y radiación del calor generado en diversas reacciones exotérmicas (oxidación de la pirita, disolución de sales solubles y la dilución de un ácido concentrado); la temperatura; la acción de catálisis de las bacterias; la adsorción microbiana de metales; la precipitación y disolución de minerales durante el transporte; adsorción y desorción de metales durante el transporte; foto reducción del hierro; la formación de complejos orgánicos y los procesos micro ambientales sobre superficies o entorno a organismos.

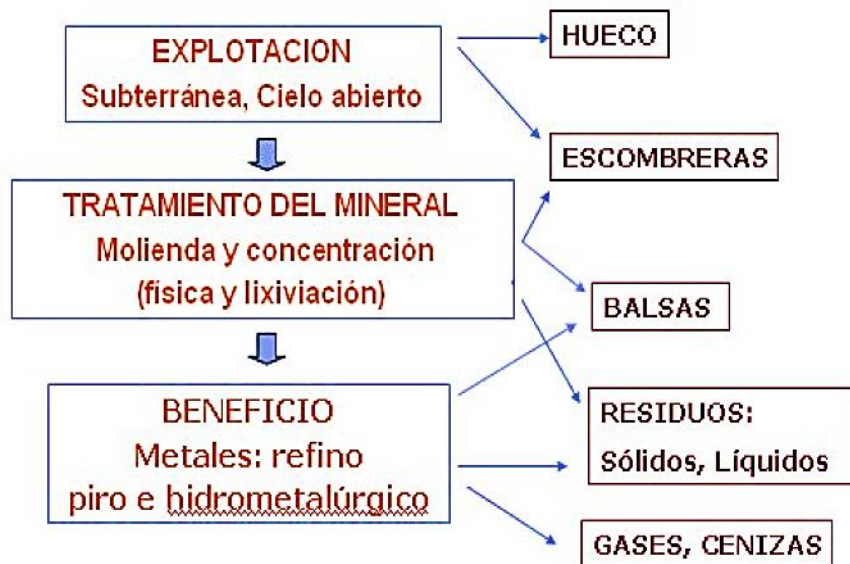


Ilustración 0-4: Fuentes de generación de residuos y drenajes ácidos.

2.4.1 Acidez de aguas de mina.

La consecuencia directa de la actividad minera al llevar a cabo la explotación de un yacimiento es la *geodisponibilidad* de materiales hacia el medioambiente, al dejar disponibles ciertos elementos que antes no lo estaban, o lo estaban de forma mucho más limitada. Cabe destacar no obstante, que muchos yacimientos minerales, particularmente los de menas sulfuradas, son en sí fuentes naturales de contaminación ambiental. Esto depende en gran medida de si son o no aflorantes, de su

La presencia de hierro ferroso (Fe^{2+}) en los drenajes de mina indica que las reacciones químicas están en un nivel intermedio dentro de una serie de reacciones que en conjunto están representadas en la reacción general (Ec.1) y que corresponde a la oxidación de la pirita.

En la reacción 2 (Ec.2) la pirita es oxidada por oxígeno y genera 2 moles de acidez por cada mol de pirita, el azufre es oxidado a sulfato y se libera Fe^{2+} . La Ec.3 puede ser guiada por varias especies de bacterias oxidantes de Fe y S (*Thiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y otras), que convierten el Fe^{2+} a Fe^{3+} (Fig.25), esta reacción se produce a pH bajos y consume un mol de acidez. Las bacterias del género *Acidithiobacillus* (previamente conocidas como *Thiobacillus*) requieren CO_2 disuelto, O_2 , una forma reducida de Fe o de S, N y P para su metabolismo, para ello, producen enzimas que catalizan las reacciones de oxidación y usan la energía liberada para transformar carbono inorgánico en materia celular.

La hidrólisis del Fe^{3+} se produce fundamentalmente a pH 2,7 y precipita en forma de hidróxido férrico, generando 3 moles de acidez (Ec.5). A pH bajo el ratio de oxidación de la pirita es controlado por la concentración de Fe^{3+} porque interactúa con las superficies reactivas de los sulfuros con mayor eficacia que el oxígeno, por tanto, en la Ec.4 el Fe^{3+} producido en la Ec.3 oxida a la pirita en ausencia de oxígeno y forma 16 moles de acidez.

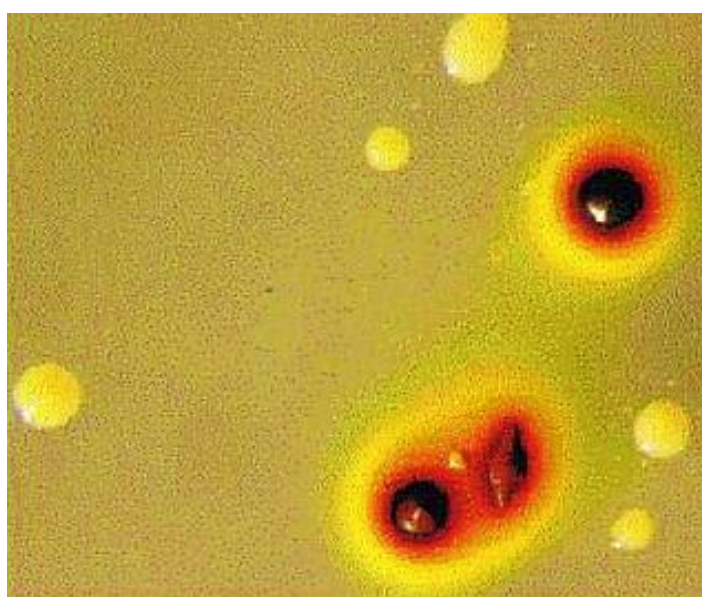
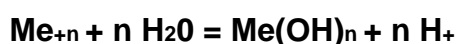


Ilustración 0-7: *Acidithiobacillus ferrooxidans* transformando el Fe^{2+} (ferroso) a Fe^{3+} (férrico) color naranja.

2.4.2 Medida de acidez de aguas de mina.

La *acidez total* representa la concentración de iones hidrógenos libres (los que definen el pH), más los hidrogeniones que se pueden generar por oxidación e hidrólisis de los metales que contiene la solución, tales como Fe, Al, Mn, Zn, etc, y que se pueden representar mediante la siguiente reacción:



Que una solución presente acidez o alcalinidad está en función de que predomine en ella su acidez total o su alcalinidad total, hablándose entonces con más precisión de soluciones con *acidez* o *alcalinidad neta*.

Acidez/alcalinidad neta = acidez total – alcalinidad total

La acidez estimada con la expresión anterior se expresa como mg/l de CaCO₃ equivalente, las concentraciones de metales en mg/l y 50 es el factor de conversión de mili equivalentes (meq) de acidez a mg/l de CaCO₃ equivalente. En el caso del pH se considera que la concentración de iones H⁺ es igual a 10^{-pH}. Además, hay que tener en cuenta que la acidez total así calculada no considera el efecto de los iones complejos, frecuentes a pH neutros, y que no producen acidez.

Teniendo en cuenta la acidez o alcalinidad de un drenaje de mina y elegir el dispositivo de tratamiento más adecuado, se ha confeccionado una clasificación agrupándolas en cinco subcategorías.

Clasificación de los drenajes de mina (Bigatel, et al. 1998).

SUB-CATEGORÍAS	DESCRIPCIÓN	RANGO DE ACIDEZ O ALCALINIDAD
1	Muy ácido	Acidez Neta > 300 mg/l como CaCO ₃
2	Moderadamente ácido	100 ≤ Acidez Neta ≤ 300 mg/l como CaCO ₃
3	Débilmente ácido	0 ≤ Acidez Neta < 100 mg/l como CaCO ₃
4	Débilmente alcalino	Alcalinidad Neta < 80 mg/l como CaCO ₃
5	Fuertemente alcalino	Alcalinidad Neta ≥ 80 mg/l como CaCO ₃

Tabla 0-1: Clasificación de los drenajes de mina (Bigatel, et al. 1998).

2.4.3 Fases mineralógicas en aguas acidas de mina

En función del pH-Eh y el contenido de oxígeno, las fases hidroquímicas predominantes en los drenajes de mina son ferrosa, férrica y alumínica, suelen tener las siguientes características:

Fase ferrosa: pH 1,4 a 3,8; Eh 400 a 650 mV, oxígeno disuelto 0 a 40%, color del agua verde.



Ilustración 0-8: Fase mineralógica ferrosa.

Fase férrica: pH 2 a 3,5; Eh 650 a 800 mV, oxígeno disuelto 70 a 100%, color del agua ocre-amarillo.

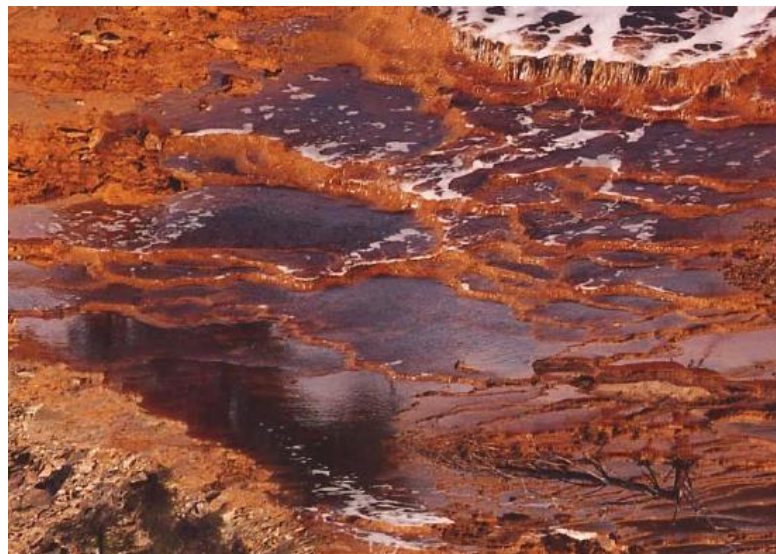


Ilustración 0-9: Fase mineralógica ferrica.

Fase aluminica: pH 3,8 a 5,2; Eh 500 mV, saturado de oxígeno, y color del agua blanco.



Ilustración 0-10:Fase mineralógica aluminica.

2.5 SISTEMA DISPONIBLE PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS

Los sistemas de recogida dependen de si las aguas ácidas son superficiales o subterráneas. En las primeras se utilizan cunetas, diques y pequeños embalses en los fondos de las explotaciones, mientras que para las segundas se recurre a zanjas de drenaje, muros de intercepción, pozos, galerías y otros. La mayoría de estos sistemas requieren de un cierto mantenimiento a largo plazo para garantizar su funcionamiento.

Generalmente los procesos de tratamientos de drenajes ácidos se basan en la eliminación y el aislamiento de metales y aniones metálicos de las aguas.

Algunos de ellos incluyen las técnicas de precipitación que suelen ser bastante efectivas para conseguir la calidad deseada de los efluentes.

Por lo general los métodos de tratamiento de aguas ácidas de mina se clasifican en dos grandes grupos:

1. **Métodos activos**, que precisan de una operación continuada, como sucede en una planta química de tratamiento de aguas ácidas.

El tratamiento de aguas de mina utilizando métodos químicos mediante la adición de sustancias alcalinas, tiene un coste elevado sobre todo cuando se trata de grandes volúmenes. Además, requiere un control y mantenimiento de las instalaciones de aireación y mezclado, así como de un almacenamiento adecuado de los lodos con carga metálica.

- 2. Métodos pasivos**, en los que la intervención del hombre es mínima, tal como sucede con los humedales, drenajes anóxicos calizos, sistemas de producción de alcalinidad y otros.

El objetivo principal de los métodos de tratamiento de las aguas ácidas es la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes como sólidos en suspensión, arseniatos, antimoniatos y otros.

2.5.1 Tratamiento por método químico activos de drenaje de ácidos

Se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoníaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados. Estos metales precipitan como hidróxidos insolubles en un intervalo de pH que suele estar comprendido entre 8,5 a 10. El hierro ferroso se convierte en hidróxido ferroso a pH superior a 8,5 y el manganeso se transforma en insoluble cuando el pH es superior a 9,5.

La mayoría de sistemas de tratamiento activo para aguas ácidas de mina están basados en la precipitación de hidróxidos, que se realiza en un proceso de tres pasos:

- ◆ Oxidación (para convertir Fe_{2+} en Fe_{3+})
- ◆ Dosis con álcalis, especialmente $Ca(OH)_2$ pero también con $Na(OH)_2$, $NaHCO_3$ y otras sustancias.
- ◆ Sedimentación.

Los tratamientos químicos más comunes utilizados en instalaciones para tratar aguas ácidas de mina, son los siguientes:

a. Tratamiento con cal

Se suele utilizar cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que es particularmente útil para tratar grandes caudales en condiciones de alta acidez. Como la cal hidratada es hidrófoba, para conseguir una buena mezcla con el agua, se precisa de un dispositivo de agitación.

Los lodos que se obtienen presentan una gran cantidad de sulfato cálcico, que desde los decantadores pueden bombearse a una balsa de almacenamiento o en algunos casos, escurrir el agua en filtros prensa para una manipulación más cómoda de los sólidos.

Esta técnica tiene una limitación cuando se requiere alcanzar un pH muy alto para precipitar metales como el manganeso.

b. Tratamiento con caliza/cal

La caliza CaCO_3 es un material más barato que la cal y más fácil de manipular que otros productos químicos. Se suele utilizar para elevar el pH hasta 4 ó 4,5 en una primera etapa de tratamiento.

Si se opta por éste tipo de tratamiento combinado, hay tener en cuenta que la caliza tiene una baja solubilidad y, además, existe el inconveniente de recubrirse de precipitados de sales o sulfatos formados a partir de los metales disueltos en el agua.

c. Tratamiento con sosa cáustica

Este método se ha utilizado en algunas ocasiones para pequeños caudales de drenajes de mina. El hidróxido sódico es muy soluble y eleva el pH de una forma muy rápida.

Los principales inconvenientes de este tipo de tratamiento son su alto coste y el peligro de su manipulación.

d. Tratamiento con carbonato sódico

Se ha utilizado sólo para drenajes de mina con pequeños caudales y muy bajas concentraciones de hierro. Su empleo es en forma de

briquetas, que se colocan en unos canales, a través de los cuales se hace pasar los efluentes ácidos.

AGENTE DE PRECIPITACIÓN	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Hidróxido cálcico	Bajo coste	Impurezas, proceso lento Precipita CaSO_4 , CaCO_3
Carbonato sódico	Soluble. Rápido	Coste superior
Hidróxido sódico	Limpio. Rápido	Coste relativamente alto
Amoníaco	Soluble. Rápido	Formación de complejos, nitrato amónico residual
Sulfuro sódico	Productos muy insolubles	Desprende H_2S
Ácido sulfúrico	Rápido. Bajo coste	Precipita CaSO_4
Ácido clorhídrico	Rápido. Limpio	Coste relativamente alto
Dióxido de carbono	Disponibles gases combustibles	

GRAFICA 0-2:Agentes empleados para la eliminación de iones metálicos pesados por precipitación.

2.5.1.1 Tratamiento tipo de aguas ácidas en una planta convencional

El proceso comienza con la entrada del agua ácida a la planta, a través de un canal donde se mide el caudal y el pH, pasa seguidamente a las cubas de neutralización donde se adiciona la lechada de cal hasta alcanzar un valor del pH entre 10 y 10,5; con el que se consigue que se formen los hidróxidos de hierro y manganeso. Estas cubas disponen de unos agitadores que garantizan una mezcla homogénea, transcurrido cierto tiempo.

En un depósito más pequeño se recogen las aguas de recirculación de los fangos del decantador y las aguas sucias procedentes del lavado de los filtros. Seguidamente el agua pasa por gravedad a los tanques de aireación, donde el oxígeno atmosférico se incorpora al agua mediante unas turbinas de agitación y se consigue la oxidación del hierro ferroso y el manganeso.

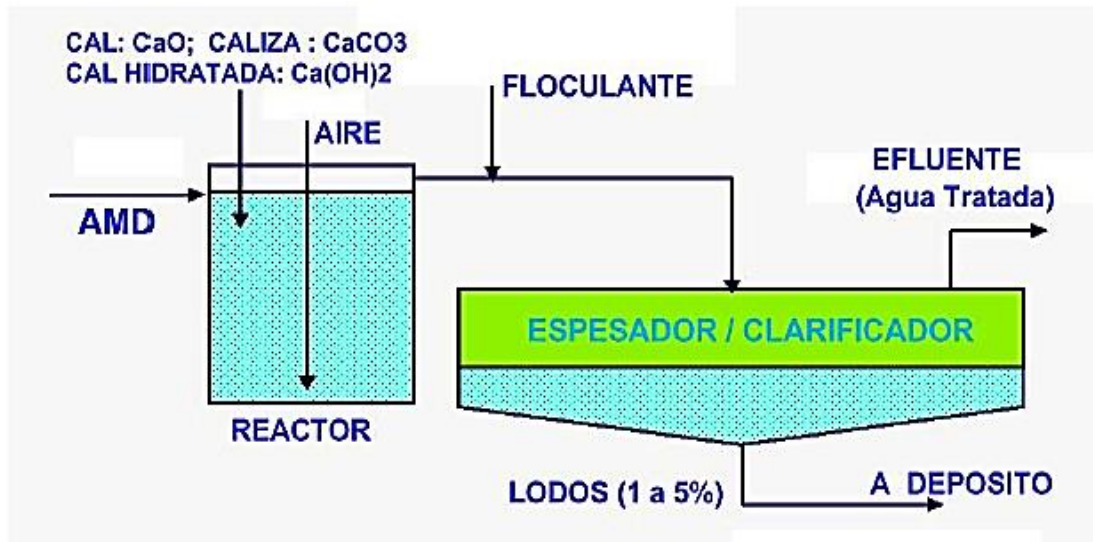


Ilustración 0-11: Esquema de una planta de tratamiento convencional para aguas ácidas.

2.5.1.2 Tratamiento de aguas ácidas en una planta HDS.

El paso de la sedimentación frecuentemente ofrece las oportunidades más importantes para intensificación del proceso de tratamiento en su totalidad. Eso es porque el proceso de sedimentación gobierna la densidad del lodo de hidróxidos producido, que a su vez controla el volumen de residuos que se precisa recoger. La sedimentación en un estanque clarificador de una planta convencional suele dar lodos con un contenido en sólidos de no mayor del 5% (en peso).

La optimización de la densidad y estabilidad de lodos basado en una nueva variedad de precipitación de hidróxidos, en la que la reacción es controlada y cada partícula de hidróxido de hierro es abrigada por una capa de sílice, es la principal incorporación en este sistema.

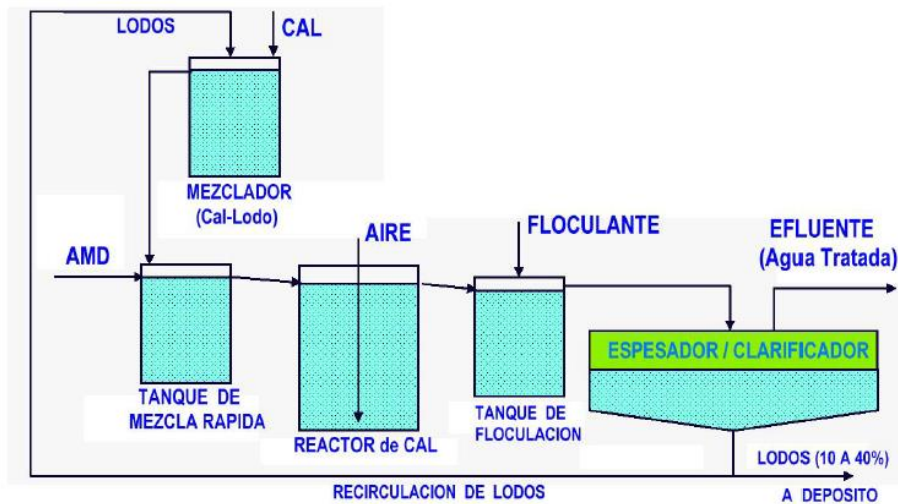


Ilustración 0-12: Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso HDS.

2.5.1.3 Tratamiento de aguas ácidas mediante el proceso NCD.

El procedimiento aprovecha la característica coloidal de los precipitados obtenidos al neutralizar aguas ácidas de minas y la energía cinética que el efluente genera durante su conducción por canal o tubería. El agente neutralizante se añade al canal de conducción, en forma soluble o finamente dividido en una pulpa, a una distancia aguas arriba del punto de descarga suficiente para proporcionar el tiempo de contacto requerido para completar las reacciones de neutralización y precipitación de metales disueltos.

Los sedimentos obtenidos pueden filtrarse fácilmente y obtener un depósito compacto y estable de la mezcla coagulante-precipitado que reduce notablemente el espacio requerido.

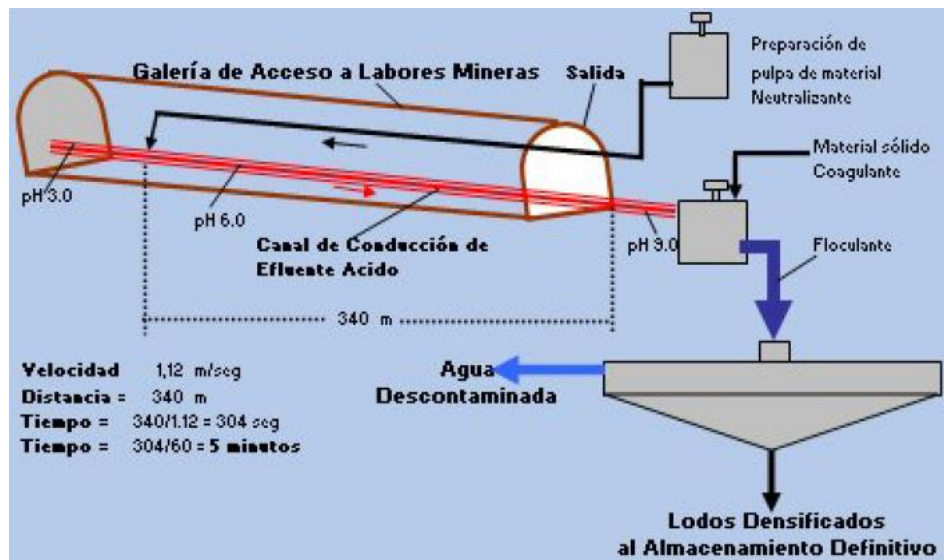


Ilustración 0-13: Planta de tratamiento de aguas ácidas por el proceso de neutralización coagulación-decantación (NCD), (Villachica, 2005).

2.5.2 Tratamiento por método pasivo de drenaje de ácidos

Considerando que los sistemas pasivos tienen mayor eficacia en el tratamiento de pequeños caudales, como los que se generan en minas abandonadas, conviene realizar primero la estabilización física y geotécnica de las estructuras mineras a clausurar, seguido de los trabajos de sellado y restauración para minimizar las descargas de efluentes.

Entre los métodos de tratamiento pasivo que podrían aplicarse, para flujos superficiales tenemos los humedales artificiales, drenajes anóxicos, balsas orgánicas y sistemas de producción alcalina; para flujos subterráneos las barreras reactivas permeables (PRB, *Permeable Reactive Barriers*), y para lagos mineros los bioprocesos anaerobios. El objetivo principal es la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes.

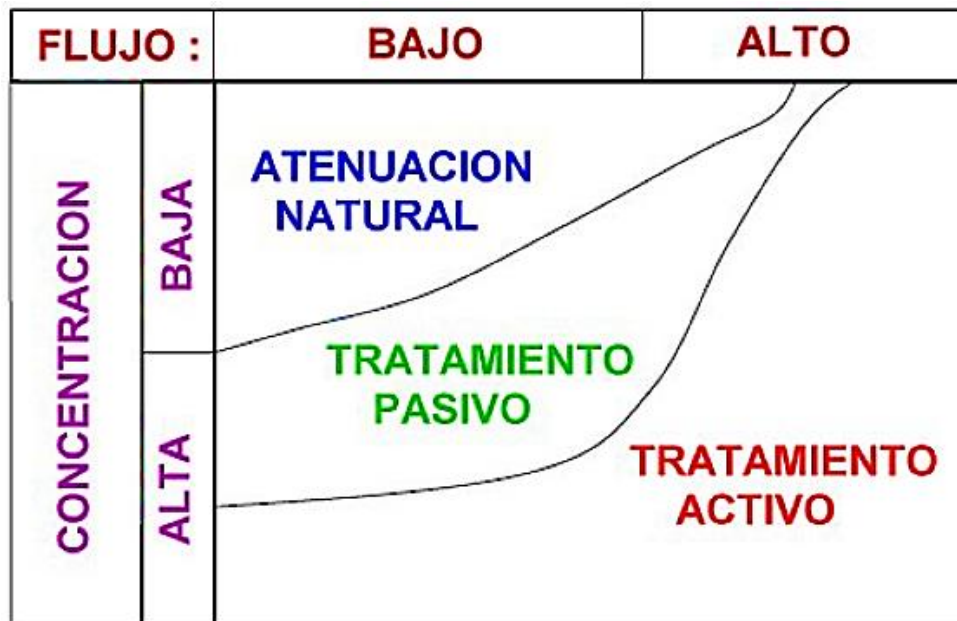


Ilustración 0-14: Rango óptimo de aplicación de los sistemas de tratamiento de aguas ácidas.

2.5.2.1 Canal o drenaje óxido calizo (OLC ó OLD).

Es un canal cuyo lecho está relleno de caliza por el que fluye el agua a tratar, cuyo objetivo es incrementar el pH y la alcalinidad para disminuir la acidez. El elevado contenido de oxígeno, produce la oxidación e hidrólisis del Fe y Al disueltos, que precipitan como oxihidróxidos. Su diseño está en función del tiempo de retención (t_r) y caudal a tratar (Q):

$$M_s = Q[(t_l \cdot C/x) + (t_r \cdot D/n)]$$

Donde:

M_s = cantidad de caliza requerida

t_l = vida del dispositivo

C = alcalinidad deseada en el efluente

x = pureza de la caliza (moles de carbonato)

D = densidad de partícula

n = porosidad del medio.



Ilustración 0-15: Circulación del agua a través de un canal revertido de caliza y construido en una escombrera restaurada.

2.5.3 Tratamiento de aguas de mina de flujos subterráneos

Barreras Reactivas permeables

Como cualquier otro tratamiento pasivo su objetivo es reducir la cantidad de sólidos disueltos (sulfatos y metales principalmente) e incrementar el pH. Su construcción consiste en hacer una zanja transversal al flujo, la cual se rellena con diversos tipos de materiales reactivos (caliza, materia orgánica, limaduras de Fe, etc.). Así, los procesos depuradores en el interior de la barrera son la reducción bacteriana de los sulfatos, la retención de los metales precipitando como sulfuros, y el incremento del Ph principalmente por disolución de la caliza.

Entre los materiales reactivos más corrientes que pueden emplearse están el hierro, la caliza y el carbono, activado o no. Los materiales reactivos se mezclan con arena para facilitar que el agua fluya a través de la barrera, en lugar de alrededor de ella.

La zanja o el embudo relleno se cubren con tierra, por lo que no resulta visible en la superficie.

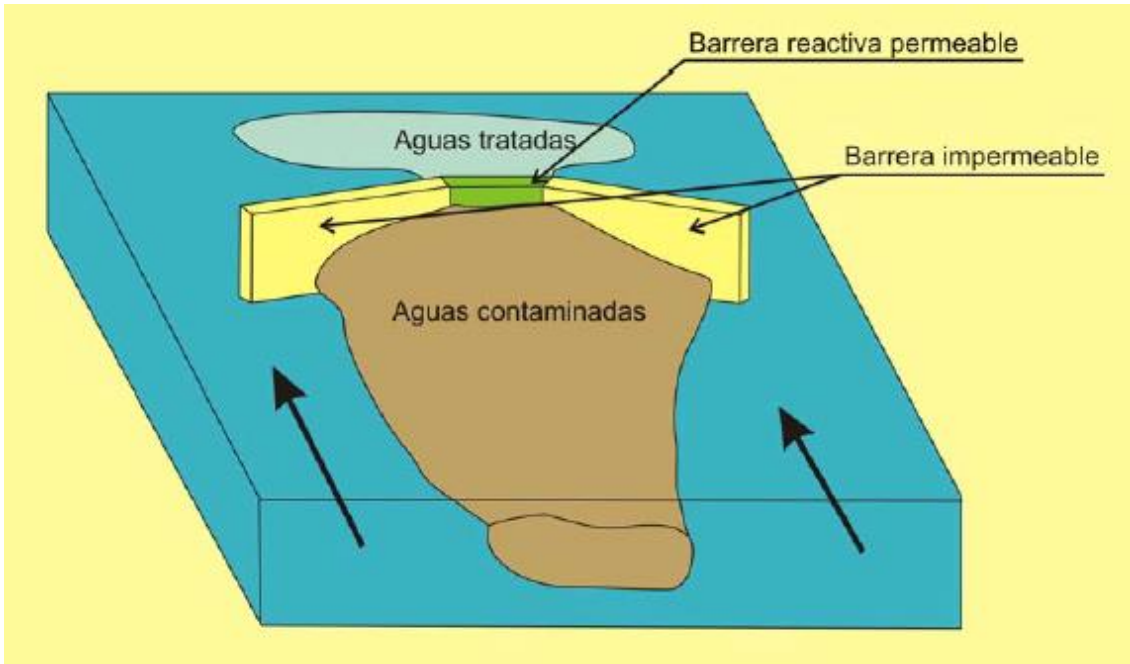


Ilustración 0-16: Sistema de una barrera reactiva permeable.

El relleno reactivo de la barrera es más poroso y de menor densidad que el suelo circundante, facilitando de esta forma que el agua fluya a través de ella y entre en contacto con las condiciones oxidantes o reductoras del sistema, favoreciendo en algunos casos la precipitación de metales y otras sustancias contaminantes, y en otros la retención por adherencia en el sistema. Cada tipo de relleno actúa por medio de procesos químicos diferentes, en función a la forma de interactuar con los flujos de aguas contaminadas las barreras se pueden agrupar en tres tipos: adsorción, precipitación y degradación.

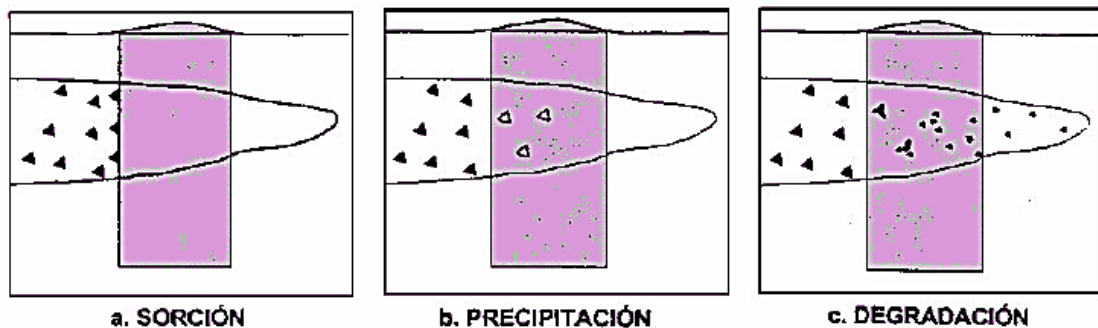


Ilustración 0-17: Tipos de barreras reactivas permeables.

CAPITULO III

MATERIAL DE ESTUDIO

3.1 FISIOGRAFÍA

3.1.1 Clima

3.1.1.1 Precipitación

Las precipitaciones tienen carácter estacional presentándose con mayor frecuencia y magnitud en el periodo de Diciembre a Abril (avenidas) y con menor intensidad en los meses de Junio a Septiembre (estiaje).

La precipitación media así obtenida para la cuenca del río Carahuacra es de 950 mm/año.

3.1.1.2 Temperatura

La temperatura media mensual varía de 13.6 °C a 00 °C, siendo su promedio mensual 6.8°C.

3.1.1.3 Evaporación

Para evaluar este parámetro en la zona del proyecto se consideró los registros de la estación San Cristóbal.

La evaporación media anual registrada en esta estación es 1100 mm/año.

3.1.1.4 Humedad Relativa

El promedio mensual de humedad relativa es de 74 % los valores promedio mensual varían desde 53 % hasta 100 %. Así mismo, los mayores valores en el año se presentan en los meses de Enero a Abril y los menores en los meses de Julio a Septiembre.

3.1.2 Flora y fauna

3.1.2.1 Flora

El pajonal de puna: Vastas superficies de pampas, fondos de Valle y laderas moderadas entre los 3 800 y 4 500 m.s.n.m. están cubiertas por gramíneas conocidas como "Paja" o "Ichu" de los géneros Stipa, Festuca, Calamagrostis, etc.

3.1.2.2 Fauna

Las especies más representativas de la fauna son: Mamíferos: "Vicuffa", "Zorro andino", "cuy silvestre" y "gatos silvestres". Entre las aves podemos seflalar a los Fringilidos, la "Lechuza de los arenales", los "Pamperos", el "Pito", el "Puco Puco", etc. Entre los Reptiles podemos mencionar a las lagartijas.

Las Aves anidan en estos barrancos rocosos como la "China linda", el "Aguilucho cordillerano", la "Bandurria" y el "Yanavico" que frecuentan lugares húmedos para alimentarse.

3.1.3 Hidrología

Durante el reconocimiento de campo se han identificado los cursos de agua así como los límites de la cuenca correspondiente. La cuenca del río Carahuacra tiene su nacimiento en la Laguna Polvorín y finalmente como afluente del río Yauli.

Se han identificado las características hidrofisiográficas, destacando la pendiente del terreno así como la cobertura vegetal existente.

3.2 GEOLOGÍA

3.2.1 Geología local

El domo de Yauli consiste en una "ventana estructural" situada en los Andes centrales donde existen importantes operaciones polimetálicas como las de Volcán. Los distritos mineros de Morococha y San Cristóbal, ubicados en Yauli y considerados de clase mundial, presentan mineralogías relacionadas a sistemas epitermales polimetálicos, cuerpos de reemplazamiento y sistemas de vetas polimetálicas, así como mineralización relacionada a pórfidos y skarns, lo cual indica el gran potencial del área.

3.2.2 Geología regional

El distrito minero de San Cristóbal está localizado en la parte Sur-Oeste de una amplia estructura regional de naturaleza domática que abarca íntegramente los distritos de San Cristóbal y Morococha, conocida como

el Complejo Domal de Yauli (Imagen N° 3), que representa una ventana de formaciones Paleozoicas dentro de la faja intra-cordillerana de formaciones Mesozoicas.

El Paleozoico tiene dos pisos, el inferior formado por el grupo Excélsior y el superior por el grupo Mitú; el Excélsior está aflorando a lo largo del anticlinal de Chumpe en la parte oeste del domo y en el anticlinal de Ultimátum hacia el Este; el Mitú aflora en la mayor parte del domo. El margen está constituido por las formaciones mesozoicas: grupo Pucará, grupo Goyllarisquizga, grupo Machay y formación Jumasha. Cuerpos intrusivos y capas extrusivas testifican la actividad ígnea en la zona.

3.2.3 Geología Económica

La complejidad geológica del distrito ha dado lugar a la formación de una variedad de depósitos minerales que se extienden ampliamente en las rocas calizas y filitas. Después de la última etapa del plegamiento "Quechua" y la formación de las fracturas de tensión, vino el período de mineralización.

Soluciones residuales mineralizantes originadas probablemente de los stocks de monzonita cuarcífera, invadieron el área dando lugar a la formación de vetas, mantos y cuerpos.

Los minerales económicos que se explotan en la Mina San Cristóbal son: Galena, Esfalerita, Tetraédrica y calcopirita en menor cantidad y como ganga están representados el Cuarzo, piritita, Calcita y filita.

3.2.4 Estructuras geológicas.

3.2.4.1 Plegamiento.

La estructura regional dominante es el Domo de Yauli, que se extiende longitudinalmente en aproximadamente 35 kilómetros, desde San Cristóbal hasta Morococha, y transversalmente 10 kilómetros; el rumbo promedio de esta estructura es N 40° O; es asimétrico, su flanco este buza entre 30° y 40° mientras su flanco oeste buza entre 60° y 80°; está conformado por varios anticlinales y sinclinales, de los cuales los anticlinales más importantes son el de Chumpe y el de Yauli (Ultimátum);

sus ejes tienen un rumbo que varía entre N 35° y 40° O. El anticlinal Chumpe está en el extremo oeste, su flanco occidental tiene un buzamiento de 55° al SO, mientras que el oriental buza 30° al NE; el núcleo de este anticlinal está formado por rocas del grupo Excelsior; el flanco occidental está compuesto por calizas Pucará y areniscas Goyllarisquizga; en el flanco oriental se extienden las rocas del grupo Mitú por varios kilómetros y sobre éstas las del grupo Pucará. Es considerado como el extremo suroeste del Domo de Yauli, donde la mayor acción del plegamiento ha tenido lugar.

3.2.4.2 Fracturamiento

El fracturamiento en el área de San Cristóbal, parece ser el resultado de las fuerzas compresivas e intrusivas que dieron lugar a la formación del Domo de Yauli. Probablemente a fines del Cretácico, plegamiento "Peruano" fuerzas de compresión de dirección NE – SO comenzaron a formar el anticlinal Chumpe, a medida que las fuerzas de compresión aumentaban de intensidad durante el plegamiento "Incaico", los estratos inferiores de caliza resbalaron sobre los volcánicos subyacentes, dando lugar a la formación de repetidas fallas inversas acompañadas de pliegues de arrastre (Los sobre escurrimientos y fallas inversas encontrados al oeste de San Cristóbal, en las calizas del grupo Pucará, pueden pertenecer a este sistema, Szekely 1967). Fuerzas tensionales al cesar momentáneamente las compresivas dieron lugar a la formación de fracturas longitudinales paralelas al eje del anticlinal Chumpe, las cuales fueron posteriormente rellenadas por los diques de alaskita que ocurren en el núcleo de dicho anticlinal.

3.3 RESERVAS Y RECURSOS

3.3.1 Reservas

Es la parte económica y legalmente extraíble de un Recurso Mineral Medido o Indicado e incluye materiales de dilución y descuentos por las mermas que pueden ocurrir durante el minado. Requiere haber efectuado evaluaciones que pueden incluir estudios de pre factibilidad considerando los factores de minado, procesamiento, metalurgia, economía, mercadeo, legales, ambientales, sociales y gubernamentales asumidos en forma realista.

El término económico implica que se ha podido establecer o demostrar analíticamente que es posible una extracción o producción rentable, bajo hipótesis definidas de inversión. Las hipótesis deberán ser razonables, incluyendo los supuestos relacionados con los precios y costos que prevalecerán durante la vida del proyecto. La evaluación dinámica de las operaciones implica que un cálculo válido efectuado en un momento dado, puede cambiar significativamente cuando se dispone de nueva información.

El término legalmente implica que no debería haber incertidumbre en lo que respecta a los permisos necesarios para el minado y el procesamiento de los minerales, ni tampoco con la resolución de asuntos legales que estuvieran pendientes.

Se subdividen en orden de confianza creciente en Reservas Probables y Reservas Probadas:

3.3.1.1 Reservas de Mineral Probable.

Una Reserva Mineral Probable tiene menos confianza que una Reserva Mineral Probada y su estimado debe tener la calidad suficiente como para servir de base a decisiones sobre compromisos mayores de capital y al desarrollo final del yacimiento. Sin embargo, requiere mayor información para demostrar la continuidad geológica y su ley.

3.3.1.2 Reservas de Mineral Probadas.

Es la parte económicamente extraíble de un Recurso Mineral Medido e incluye los materiales de dilución y descuentos por mermas durante la explotación. La aplicación de la categoría de Reserva Mineral Probada implica el más alto grado de confianza en el estimado y se asume que existe suficiente información disponible para demostrar razonablemente la continuidad geológica y la ley.

3.3.1.3 Reservas

Las reservas estimadas para la mina San Cristóbal tuvieron un ligero descenso con respecto al año anterior debido a la disminución de la mineralización en las estructuras principales: sobre todo en las Vetas 722, 658, Split 658.

RESERVAS	TMS	A. Veta	A. Minado	Dilución	Dens Dil	% Zn	% Pb	% Cu	oz Ag/t	\$ VPT
Probada	5,543,863	2.32	3.36	43.9%	3.16	6.09	0.95	0.20	4.26	142.29
Probable	8,015,019	3.00	3.81	42.1%	3.18	6.28	0.83	0.18	3.51	131.16
Total general	13,558,882	2.70	3.63	42.9%	3.17	6.20	0.88	0.19	3.81	135.71

GRAFICA 0-1:Reservas de Mineral Mina San Cristóbal -2016.

3.3.2 Recursos

Son concentraciones de materiales sólidos, líquidos o gaseosos que existen de manera natural en la corteza terrestre en forma, cantidad y calidad tales que la extracción económica de un producto, a partir de la concentración, sea actual o potencialmente factible. La ubicación, cantidad, ley, características geológicas y continuidad de un Recurso Mineral se conocen o estiman e interpretan a partir de información, evidencias y conocimiento geológicos específicos, con alguna contribución de otras disciplinas.

Las declaraciones de Recursos Minerales, generalmente son documentos desactualizados que se ven afectados por la tecnología, la infraestructura,

los precios de metales y otros factores. Según cambien estos diversos factores, el material puede entrar o salir de la estimación de Recursos.

Las partes de un yacimiento que no tengan perspectivas razonables de extracción económica eventual, no deben incluirse en un Recurso Mineral.

3.3.2.1 Recurso Mineral Inferido

Parte de un Recurso Mineral para el cual el tonelaje, leyes y contenido mineral pueden estimarse con un bajo nivel de confianza. Se le infiere o asume de evidencia geológica /o de leyes asumidas, pero no verificadas. El estimado se basa en información reunida con técnicas adecuadas en lugares tales como afloramientos, zanjas, pozos, beneficios y taladros, la cual puede ser limitada o de calidad - fiabilidad incierta.

Se asume la continuidad geológica y puede o no estar respaldada por muestras representativas o evidencia geológica.

La confianza en el estimado es insuficiente como para aplicar parámetros técnicos y económicos, o realizar una evaluación económica de pre- factibilidad que merezca darse a conocer al público.

3.3.2.2 Recurso Mineral Indicado

Parte de un Recurso Mineral para el cual el tonelaje, densidades, forma, características físicas, leyes y contenido mineral pueden estimarse con un nivel de confianza razonable. El estimado se basa en la información de exploración, muestreo y pruebas reunidas con técnicas apropiadas de lugares tales como afloramientos, zanjas, pozos, beneficios y taladros. Los lugares están demasiado o inadecuadamente espaciados para confirmar la continuidad geológica y de leyes, pero sí lo suficientemente cercanos como para asumirlas. Se asume la continuidad geológica con muestras inadecuadamente espaciadas y que no permiten confirmar totalmente.

La confianza en el estimado pese a ser menor que en el caso de los Recursos Medidos, es suficientemente alta como para aplicar los parámetros técnicos y económicos para una posible evaluación de pre- factibilidad económica.

El estimado se basa en información de la exploración, muestreo e información reunida mediante técnicas apropiadas sobre afloramientos, trincheras, pozos, taladros y pruebas de beneficio.

3.4 MINERIA

3.4.1 Método de explotación

La tecnología de explotación empleada en las labores de desarrollo y explotación de la zona 2 y 3, es fruto de una paciente investigación de los métodos requeridos para la explotación en la compañía minera Volcán

- ◆ Unidad San Cristóbal
- ◆ Método de explotación Corte y Relleno Ascendente (Breasting, Bench and Fill).
- ◆ Método de explotación con Taladros Largos.

3.4.2 Perforación

Básicamente tiene dos aspectos, la perforación en labores de exploración, desarrollo y la perforación en los tajeos.

El primer caso se trata de frentes de 3.5m x 3.5m, llegando en las rampas y labores principales hasta 4.0m x 4.0m, en todos los casos el tipo de corte es quemado, la cantidad de los taladros perforados está en función a sección de la labor y tipo de roca. Y en los tajeos de la zona II y III se perfora con una malla de 1m x 1m los cuales pueden variar en función al ancho de la veta y cuerpo.

3.4.3 Sostenimiento

El objetivo de estas especificaciones es definir las modalidades y procedimientos ejecutivos que deberán ser aplicados, en la ejecución de las diferentes obras que constituyen el sostenimiento de las labores.

El sostenimiento se colocará de forma que deje de deformarse el terreno, con el objetivo de que la roca desarrolle su capacidad autoportante. En la etapa de desarrollo y profundización de la Mina se diseñan varios tipos de sostenimiento a aplicar según sea la calidad de la roca, los sostenimientos se optimizan con la información que aporta el Departamento de

Geomecánica. El conocimiento del macizo rocoso permitirá optimizar nuestras operaciones subterráneas, la optimización se da en la Cantidad de sostenimiento aplicado, Tiempo.

3.4.3.1 Pernos

El tipo de perno y su distanciamiento se definirán según la evaluación geomecánica del frente de avance, estos pueden ser pernos cementado con Lechada de Cemento o Resina.

3.4.4 Suministro de Agua en la Mina

El agua procedente de las precipitaciones atmosféricas se reparte en dos porciones: superficial, que discurre sobre la superficie terrestre y forma los torrentes o ríos; de infiltración, que penetra en el subsuelo y la que se pierde por evaporación, reintegrándose a la atmósfera.

En este trabajo en mayor medida me voy a referir a:

3.4.4.1 Agua de infiltración

La cual procede de las precipitaciones atmosféricas, como las lluvias y nevadas, las cuales penetran en el terreno por gravedad, favorecida por la existencia de grietas o fisuras en las rocas, así como por la misma porosidad de los materiales que forman el subsuelo propias de la geología de la zona, todo esto constituye el agua en la mina que será destinada al caudal de la poza Yahaira.

3.4.4.2 Recirculación y bombeo

En el subsuelo, el agua penetra hasta cierta profundidad, en lo que se denomina zona de aireación, aquí se efectúan desplazamientos verticales, bien sea descendiendo por la gravedad o ascendiendo por capilaridad, por lo tanto los poros de las rocas están parcialmente llenos de agua; esta zona queda limitada por el nivel hidrostático o "freático", cuya profundidad varía de acuerdo con las precipitaciones atmosféricas, ascendiendo en épocas lluviosas y descendiendo en épocas de sequías. Por debajo del nivel hidrostático las rocas están completamente saturadas de agua, y no se producen desplazamientos verticales de la misma, existiendo por el contrario importantes desplazamientos

horizontales, originados por el flujo del agua a los puntos de mínima presión, allí donde el nivel hidrostático aflora en superficie o donde sea cortado por un pozo; esta es la denominada zona de saturación.

CAPITULO IV

METODOLOGIA DE INVESTIGACION

4.1 TIPO DE INVESTIGACION

Descriptiva: La investigación, se basa a un estudio descriptivo, a la recolección de datos históricos e indicadores.

4.2 NIVEL DE INVESTIGACION

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características de un estudio descriptivo y exploratorio de estudios históricos.

4.3 METODO DE INVESTIGACION

4.3.1 Plan de trabajo

La metodología de trabajo de esta tesis siguió el siguiente procedimiento:

- ◆ Se procedió a la revisión de datos históricos tomados al muestreo no sistemático de una parte de las relaveras de los centros mineros, en operación y abandonados, más representativos de la zona central del Perú.
- ◆ Revisión de resultados del análisis del resultado de los laboratorios con los métodos de ICP (Inductively Coupled Plasma) y ABA (Acid-Base Accounting).
- ◆ Finalmente, se procedió a evaluar y comparar los resultados para conocer el potencial de generación de agua ácida de las muestras.

4.4 CRITERIOS DE EXCLUSION E INCLUSION

4.4.1 Criterios de inclusión

- ◆ Sistema de tratamientos de aguas acidas de mina.
- ◆ Parámetros de análisis de un DAM.
- ◆ Evaluación de costos de muestreo y análisis de datos.

4.4.2 Criterios de exclusión

- ◆ Operaciones de perforación y voladura.
- ◆ Diseño de malla de perforación y Geotecnia.

4.5 VALIDACIÓN DE Y CONFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS

- ◆ Límites máximos permisibles (LMP) y estándares de calidad de aguas (ECAS) de aguas acidas en minería, establecidas en el Decreto Supremo de Seguridad y Salud Ocupacional en el Trabajo 023 -2017.

4.6 POBLACION, MUESTRA Y MUESTREO

4.6.1 Población

Mina San Cristóbal de “VOLCÁN COMPAÑÍA MINERA S.A.A.”

4.6.2 Muestra

Mina San Cristóbal

4.6.3 Muestreo

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

MUETRA	ZONA	REGION
M3	Mar túnel	Junin
M4	Yanacancha	Pasco
M5	Chaupimarca	Pasco
M7	Yauli	Junin

GRAFICA 0-1:Zonas de muestreo.

4.7 TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

La metodología de esta actividad consistió en la recolección de datos históricos y resultados de la situación de las aguas acidas a partir de las muestras que se han podido analizar, posteriormente se hizo la evaluación económica y la búsqueda de tratamiento más adecuado según a los resultados que podamos obtener.

CAPITULO V

DESARROLLO DEL TEMA DE TESIS

5.1 METODOLOGIA PARA PREDECIR LA GENERACION ACIDA

El potencial ácido generador de los residuos de mina está en función al tipo de material movido en las actividades mineras, tales como: mineral gastado de las pilas de lixiviación, residuos y rechazos de la planta de beneficio, estériles de las escombreras y de las labores de desarrollo.

De igual forma influyen en la formación de aguas ácidas el tamaño de las partículas, la variedad mineralógica, la calidad del agua de los drenajes, ciertas características físico-químicas del entorno y las condiciones climáticas del lugar.

Para evaluar el potencial generador de las aguas ácidas de mina es necesario conocer al menos lo siguiente:

- a. Para estimar el máximo volumen total de aguas ácidas que se pueden generar
 - Cantidad de materiales ácidos generadores (sulfuros)
 - Cantidad de materiales ácidos neutralizantes (carbonatos y otros)
 - Composición del material potencialmente generador de aguas ácidas
 - Aporte de agua al sistema
- b. Para estimar el rendimiento de la producción de aguas ácidas (cinética)
 - Medidas insitu sobre la generación actual de aguas ácidas
- c. Para estimar los posibles cambios en la cinética de producción aguas ácidas
 - Para cambios puntuales, en cortos períodos de tiempo:
 - Régimen de lluvias
 - Variación de temperaturas
 - Para cambios bruscos de largo alcance:
 - Capacidad amortiguadora del medio y su evolución

5.1.1 Predicción de la generación ácida mediante ensayos estáticos

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

5.1.2 Ensayos cinéticos

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

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

Según la California Mining Association (1991) y la British Columbia AMD (1989) los pasos para realizar la predicción del potencial ácido generador, son:

- Definición de las unidades geológicas (geología y mineralogía)
- Desarrollo de un plan de muestreo geológico del macizo rocoso circundante.
- Selección de los ensayos estáticos y cinéticos para evaluar el potencial de la generación ácida.
- Evaluación de los criterios de muestreo y la forma de realizar los ensayos cinéticos.
- Desarrollo de un modelo apropiado para la predicción ácida.
- Elaboración de una clasificación de las unidades geológicas (basado en los resultados) en función a su capacidad de formación o no de acidez.

TIPO DE INFORMACIÓN	MINA NUEVA	MINA EN OPERACIÓN
CLASIFICACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	- Afloramientos - Secciones geológicas - Ensayos de resistencia - Perforaciones de producción	- Afloramientos y excavaciones - Testigos de perforación - Muestras de producción - Ensayos de resistencia - Muestreos específicos en áreas de trabajo y almacenamiento
DISTRIBUCIÓN DEL MACIZO ROCOSO	- Planificación	- Planificación - Reportes de producción - Planes de desarrollo (cielo abierto y subterránea) - Inspecciones a pilas de mineral - Muestreos a detritos de perforación
GENERACIÓN ÁCIDA. POTENCIAL DE LIXIVIACIÓN	- Ensayos estáticos - Mineralogía - Formación de lixiviados a corto plazo - Comparación con otros lugares similares	- Observación de antiguos testigos - Muestreos de suelos - Ensayos estáticos en diferentes áreas de trabajo
CALIDAD DEL AGUA DE LOS DRENAJES	- Ensayos cinéticos - Estándares de calidad de agua	- Seguimiento y control rutinario - Inspecciones a filtraciones - Ensayos cinéticos - Formación de lixiviados

GRAFICA 0-1: Fuentes de información de la generación del potencial ácido en minas.

5.1.3 Modelización matemática

La neutralización potencial (NP) es una medida del carbonato disponible para neutralizar la acidez (carbonatos primarios, silicatos minerales y en menor grado algunos cationes intercambiables), su valor es determinado entre otros por el ácido añadido a la muestra y la cantidad de ácido consumido.

En drenajes de mina los ensayos estáticos solo predicen cualitativamente la capacidad de generar acidez, mediante la comparación entre la máxima producción ácida o acidez potencial (AP) con la máxima neutralización potencial (NP).

La determinación de AP basado en la estimación del contenido de azufre reactivo en la muestra tiene algunas limitaciones, sobre todo cuando el azufre total es empleado para estimar su contenido en el sulfuro, esta incertidumbre quizá pueda atribuirse a posibles errores como:

- Valoración simultánea de acidez y neutralización de la muestra.
- Cálculo de la acidez a partir de un valor de conversión de azufre total.
- Errores analíticos.

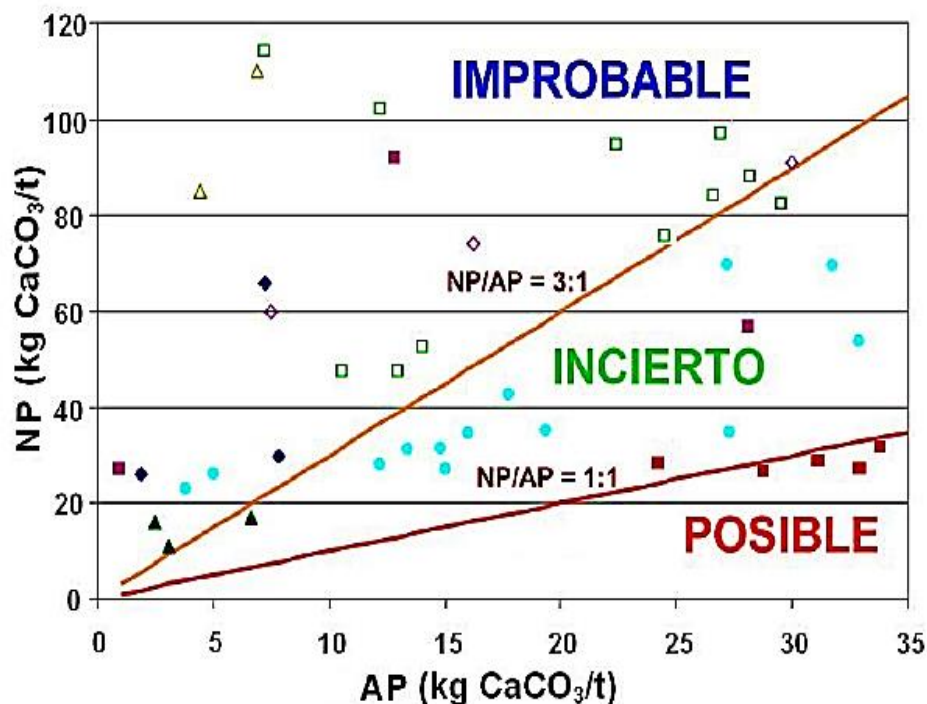


Ilustración 0-1: Relación entre los potenciales de neutralización y acidez de residuos mineros.

TIPO DE ROCA	CLASIFICACIÓN	CONTENIDO TOTAL DE AZUFRE (% S)	RATIO ACIDO/BASE (MPA:ANC)
I	Potencial formador de acidez (Posible)	> 0,25 %	1:1 o menos
II	Indeterminado (Incierto)	> 0,25 %	1:1 a 1:3
III	No forma acidez (Improbable)	< 0,25 %	1:3 o más

GRAFICA 0-2: Clasificación ácida/base de rocas mediante ensayos estáticos (Environment Australia, 1997).

5.2 CONCENTRACION TIPICA DE DEL DE MINA (DAM)

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

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

GRAFICA 0-3: Tabla composición química de muestras de relaves "Análisis Químico ICP – SGS GQ1005019-22(Pesos) – Anexos"

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

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

En la muestra M7 encontramos alto contenido de Pb (1762.57 ppm), como segundo esta Zn (705.70 ppm) lo que podría derivar en problemas por envenenamiento de plomo ya que este y sus compuestos son extremadamente tóxicos, especialmente el plomo inorgánico.

5.3 FASES EN EL TRATAMIENTO QUÍMICO CONVENCIONAL DE DRENAJES ÁCIDOS

La alteración más significativa sobre las aguas que produce la actividad minera es la polución con partículas en suspensión y la acidificación de las mismas, esto incide directamente sobre la calidad de las aguas y el

aprovechamiento del suelo. Por lo que, se requiere un control de los parámetros físico-químicos y un adecuado tratamiento de los efluentes, que por lo general se realiza en dos fases:

5.3.1 Eliminación de sólidos en suspensión por decantación

Los sólidos en suspensión constituyen una de las fuentes más frecuentes de contaminación física de las aguas. Esta se produce por la fuerza erosiva del agua que provoca en su circulación superficial el arrastre de partículas sólidas.

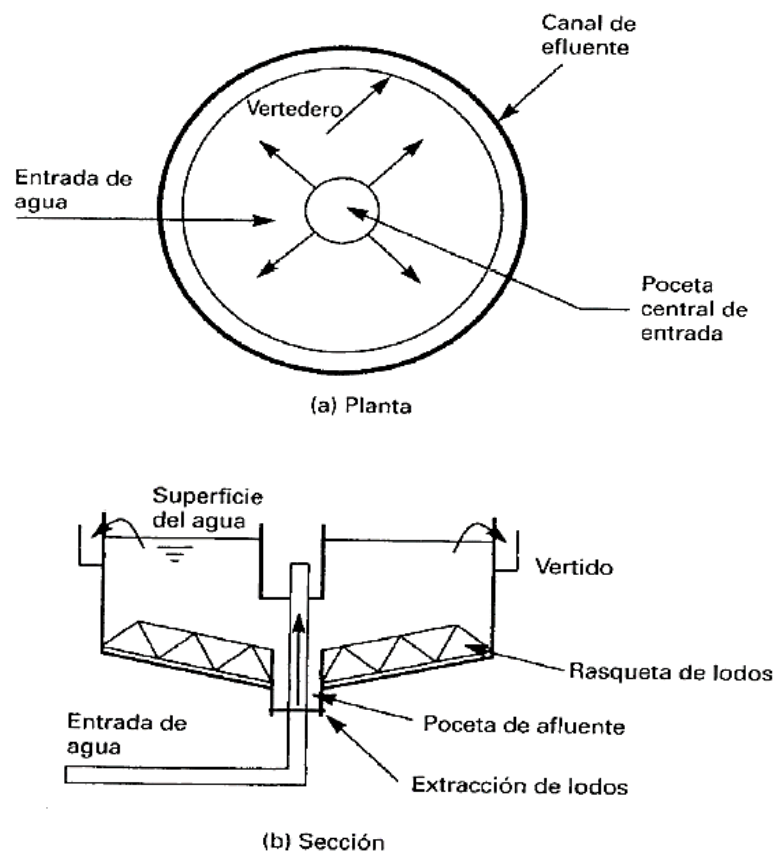


Ilustración 0-2: Eliminación de sólidos en suspensión por decantación.

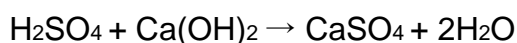
5.3.2 Neutralización química de las aguas ácidas

El proceso de neutralización de las aguas ácidas mediante la adición de sustancias alcalinas es el que actualmente se lleva a cabo en la mayoría de las minas que generan efluentes de este tipo.

El tratamiento en las plantas convencionales se realiza en tres etapas: neutralización, oxidación y precipitación. Las reacciones principales que tienen lugar según el tipo de agente alcalino que se utilice son:

1º. Neutralización del ácido con una base.

Con cal:



Con caliza:



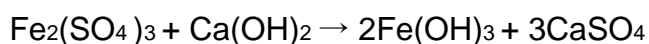
2º. Oxidación del hierro ferroso o férrico.

Se lleva a cabo tomando oxígeno de la atmósfera mediante la agitación de las aguas en unos tanques. Con esto se consigue modificar el estado del hierro haciéndolo insoluble.

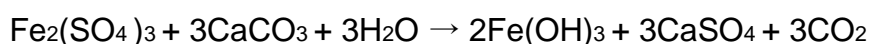
3º. Precipitación de los hidróxidos de hierro.

Los hidróxidos se forman al reaccionar el sulfato férrico con los agentes alcalinos.

Con cal:



Con caliza:



La concentración de metales pesados en el efluente puede reducirse por precipitación como hidróxidos a distintos valores de pH, por ejemplo el pH mínimo para el Pb^{+2} es 6,3; para el Fe^{+2} es 9,5 y para el Mn^{+2} es 10,6. Hay

que tomar precauciones cuando están presentes metales anfóteros como el cinc y el aluminio que se disuelven en la solución si ésta es demasiada alcalina.

El proceso de tratamiento más común utilizado en el tratamiento de aguas ácidas es el que emplea cal, en cuya etapa inicial se produce la neutralización de la acidez y finaliza con la oxidación del hierro ferroso para formar hidróxido férrico que es insoluble y precipita.

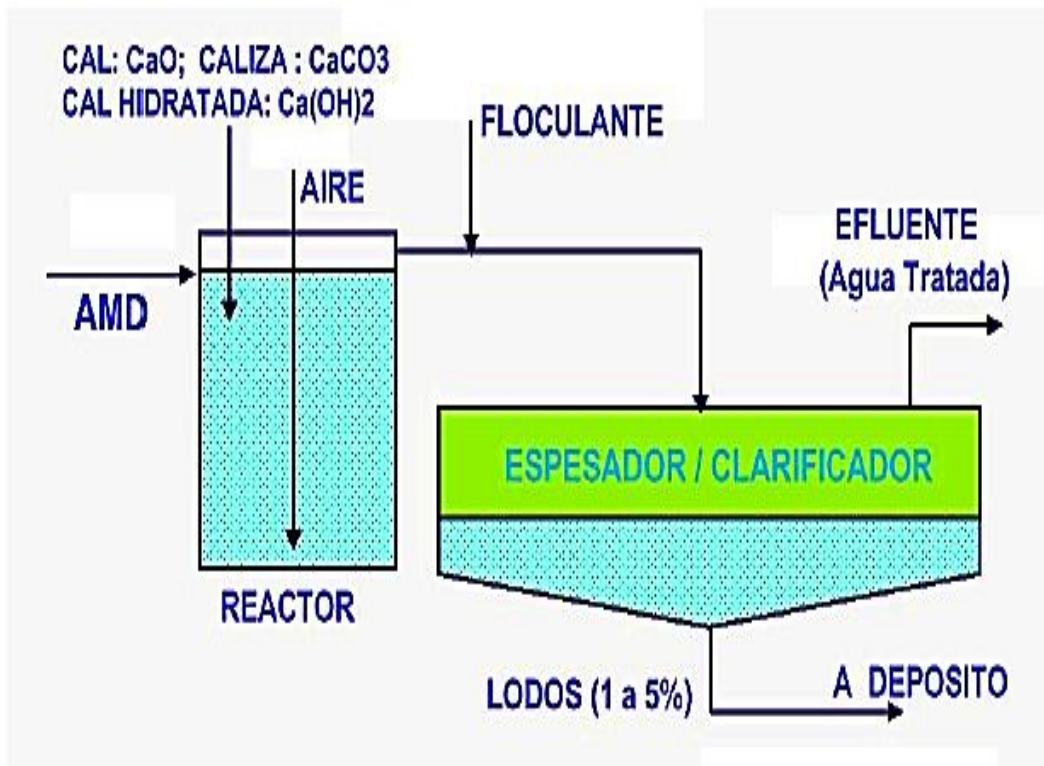


Ilustración 0-3: tratamiento más común utilizado en el tratamiento de aguas ácidas.

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

GRAFICA 0-4: Muestras de Relave recolectadas que presentan un alto potencial de generación ácida.

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

GRAFICA 0-5: Resultados de Análisis de Laboratorio a muestras de material neutralizante referenciales tomadas de informe de ensayo ambiental.

5.4 PRESENTACIÓN Y MUESTREO DE MUESTRAS DE MATERIAL NEUTRALIZANTE

Para nuestro caso utilizaremos muestras de caliza (CaCO₃) y dolomía (CaMg(CO₃)₂) de zonas aledañas a nuestros residuos mineros generadores de drenaje ácido, las cuales también pertenecen a la zona centro andina del Perú. Para este fin se toma como valores referenciales los hallados en el ensayo ambiental realizado por la empresa consultora "SVS Ingenieros" a una empresa minera localizada en el departamento de Cerro de Pasco.

5.5 DISEÑO DE MICROPLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS ACIDAS

Actualmente existe una propuesta de construcción de reservorio de captación de agua bombeado desde el nivel 1070, Propuesta por JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA, la cual nos basaremos en la capacidad de este reservorio Yahaira.

5.5.1 Requerimiento de agua en mina

Los sondajes que se realizaron confirman que a medida que se desarrollará la mina se irán encontrando infiltraciones de aguas de los propios niveles y niveles superiores por la misma geología de la zona, así como del laboreo que se realice, todo esto hace un caudal aproximado de 12 l/s, el cual deberá ser impulsado hacia el niveles superiores por las cámaras de bombeo desde el nivel 1270 hasta el nivel 1070 y se pueda recircular para las necesidades de la zona (zona 2 y 3).

5.5.1.1 Consumo de agua de equipos por una labor en una guardia

Equipos	Consumo de agua (Litros/Segundo)	Tiempo de perforacion por labor (horas)	Consumo de agua por labor Guardia (Litros)
Simba	3.6	4.5	58320
Jumbo	3.5	1.8	22680
Boltec	3.3	1	11880

GRAFICA 0-6: consumos de agua de equipos por una labor por guardia Fuente JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA.

5.5.2 Esquema de bombeo de agua en el reservorio Yahaira

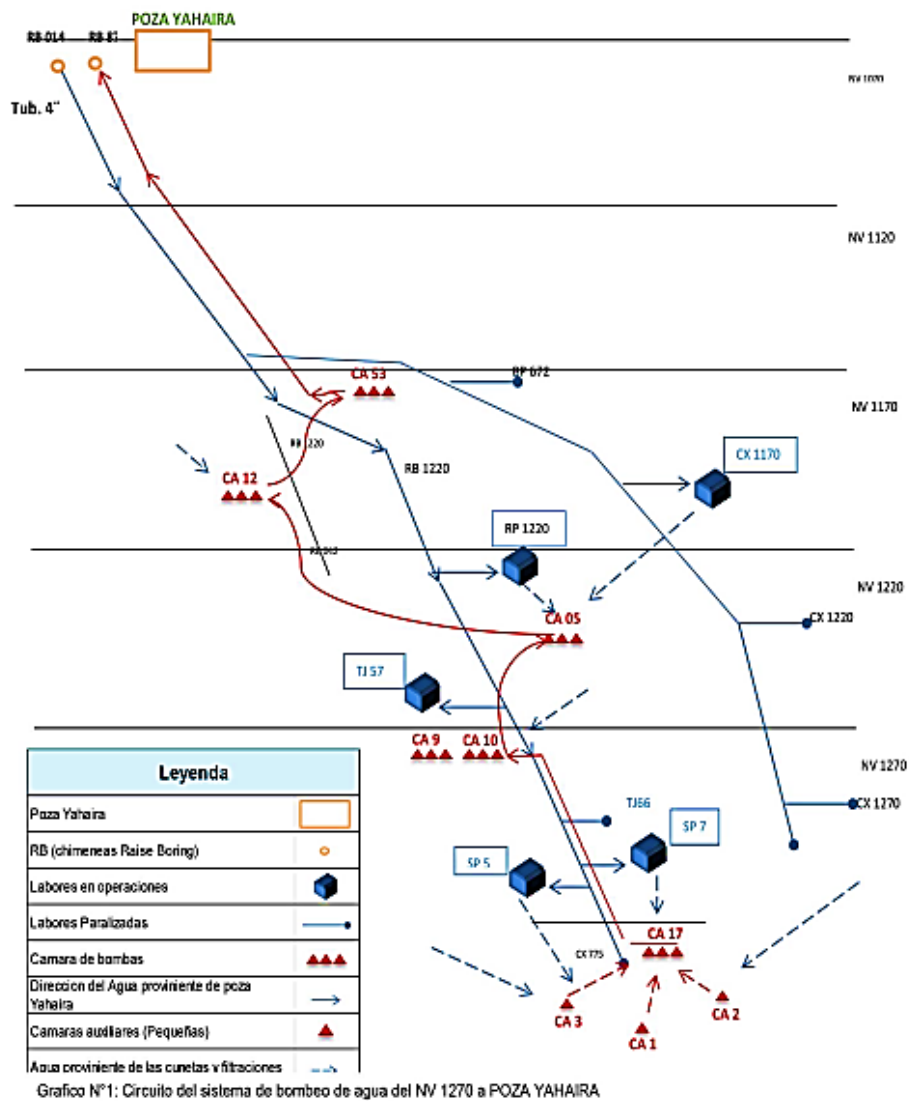


Ilustración 0-4: Esquemas de bombeo de agua en el reservorio yahaira Fuente JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA

5.5.3 Diseño de sistema de tratamiento de aguas acidez

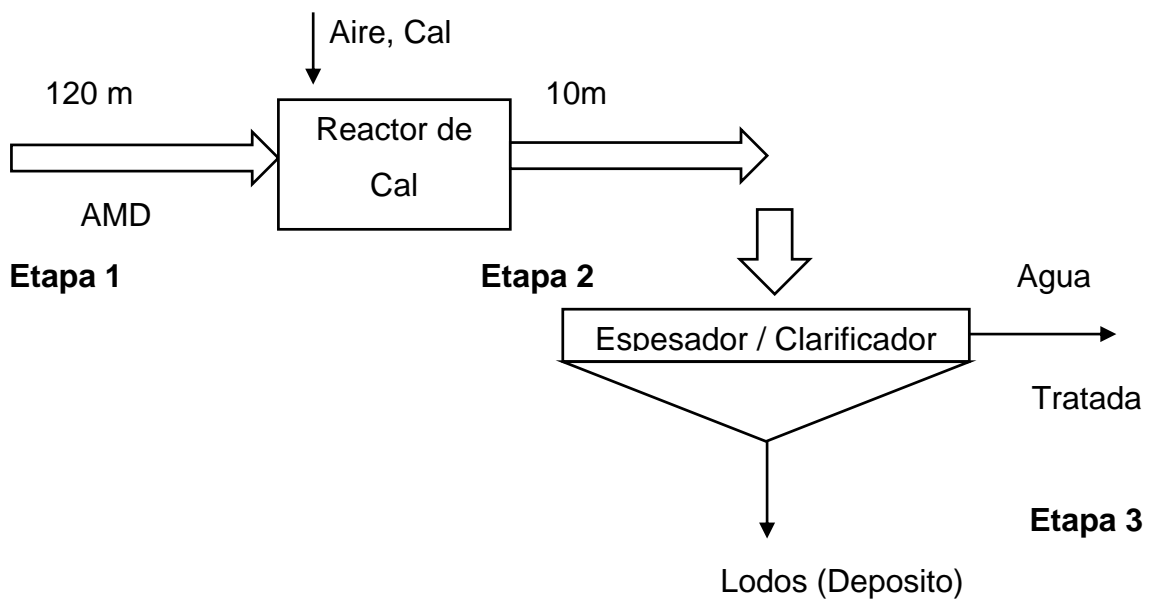
CAPACIDAD

La capacidad del reservorio = Área útil * Altura útil = 227 metros cúbicos.

Dimensiones de Poza Yahaira

- Largo 20 m
- Altura 2.5 m
- Ancho 4.54 m
- Volumen 227 m³
- Área útil 90.8 m²

5.5.4 Diseño de sistema de tratamiento de aguas acidez



Esquema de una planta convencional para tratar aguas acidas

CAPITULO VI

ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

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

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

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

Se muestran los resultados de los análisis por difractometría de Rayos X y las microfotografías de las muestras M3, M4, M5 y M7 respectivamente mostrando las especies mineralógicas distinguibles en el microscopio petrográfico.

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

Muestra M3:

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

GRAFICA 0-1: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 3.

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

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

- ◆ Aresenopirita, FeAsS = 0.6 %
- ◆ Calcopirita, CuFeS₂ = 0.113 %
- ◆ Galena, PbS = 0.13 %
- ◆ Esfalerita, ZnS = 0.24 %



Ilustración 0-1:: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 3.

Partículas libres de pirrotita (po) y de gangas (GGS), muestra M3.

Magnificación: 200X

Mineralogía de la muestra M3 por microscopio óptico:

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

Distribución Volumétrica (M3):

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

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

Muestra M7:

Nombre del mineral	Fórmula	%
Cuarzo	SiO_2	61.13
Ortoclasa	KAlSi_3O_8	12.40
Muscovita	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	12.23
Jarosita	$\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	12.00
Pirita	FeS_2	2.25

GRAFICA 0-2: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación de difracción de rayos X de Muestra 7.

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

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

- ◆ Arsenopirita, FeAsS = 0.08 %
- ◆ Calcopirita, CuFeS_2 = 0.037 %
- ◆ Galena, PbS = 0.203 %
- ◆ Esfalerita, ZnS = 0.105 %

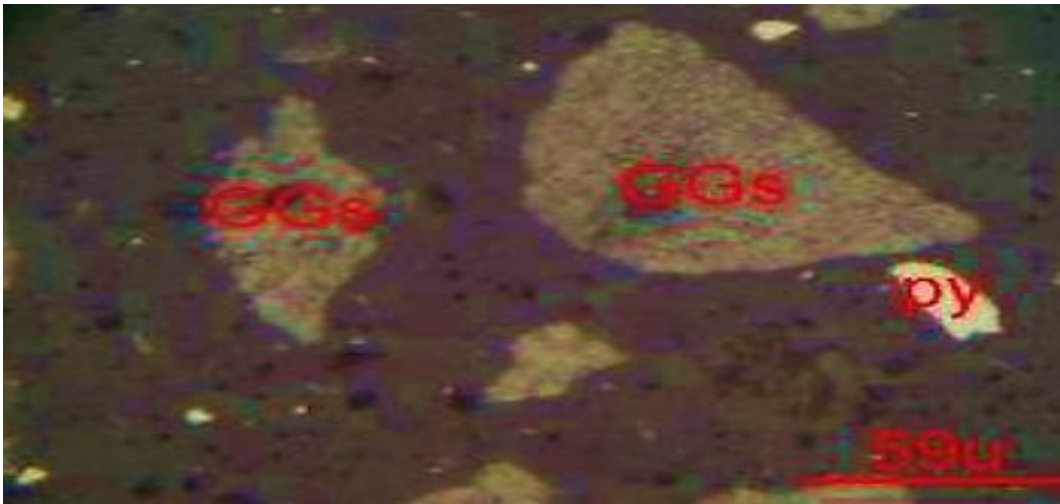


Ilustración 0-2: Composición y abundancia mineralógica en relaves por evaluación en microscopio óptico de Muestra 7.

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

Magnificación: 200X

Mineralogía de la muestra M7 por microscopio óptico:

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

Distribución Volumétrica (M7):

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

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

6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DE ANÁLISIS

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

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

M3: 94.6 %

M4: 67.7 %

M5: 50.0 %

M7: 97.3 %

Las especies que presentan un carácter neutralizante son la calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) y siderita (FeCO_3). Siendo todas ellas constituidas de carbonato, su reacción frente a un ácido es de una típica reacción de neutralización ácido – base (ácido + base \rightarrow sal haloidea + agua).

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

M3: 2.6 %

M4: 18.0 %

M5: 33.0 %

M7: 0.0 %

Las especies generadoras de ácido son aquellas que corresponden a sulfuros. En especial, la pirita (FeS_2) o pirrotita ($\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_{(x)}$), las cuales presentan una fuerte reactividad a la formación de ácido.

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

M3: 2.8 %

M4: 14.3 %

M5: 17.0 %

M7: 2.7 %

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

Muestra	Especies Neutras, % peso	Especies de tipo Básico, % peso	Especies generadoras de Acido, % peso
M3	94.6	2.6	2.8
M4	67.7	18.0	14.3
M5	50.5	33.0	17.0
M7	97.3	0.0	2.7

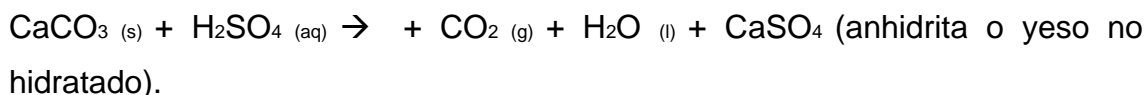
GRAFICA 0-3: la mineralogía de las muestras estudiadas en términos de especies.

Análisis al hacer uso de carbonatos como reacción con el DAM

Según la siguiente ecuación:



O en términos de especies:



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

Análisis de la relación del potencial de Neutralización y el Potencial de Acidez

La relación ácido/base, ABA, es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la generación o no de acidez. Teniendo en cuenta que la diferencia entre el Potencial de Neutralización (NP) y el Potencial de acidez (AP) es positiva, el riesgo de generación ácida es menor, en cambio si esta diferencia es negativa existirá una alta probabilidad de que se formen efluentes ácidos.

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

Potencial de generación	Guía MEN	
	NNP Kg CaCO₃ equivalente/t material	Relación NP / AP
No tiene	> +20	> 3,0
Incierto	- 20 < x < 20	1,0 < x < 3,0
Probable	< - 20	< 1,0

GRAFICA 0-4: Criterios de Evaluación de los Resultados del conteo Ácido Base – MEM.

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

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

GRAFICA 0-5:Caracterización Ácido / Base de los relaves analizados.

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

Donde:

PN = Potencial de neutralización;

%S = Porcentaje de azufre como sulfuro;

%S Sulfato = Porcentaje de azufre como sulfato;

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

PA = Potencial de acidez;

PNN = Potencial neto de neutralización;

(*) PN, PA y PNN están expresados en kg-CaCO₃/t

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

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

GRAFICA 0-6: Vinculacion de dos tipos de exámenes (químico mineralógico y estático).

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

Podemos decir que a partir de la tabla anterior, la generación de aguas acidas de mina San Cristobal, tiene alto potencial, a partir de las muestras M3 y M7.

6.3 ANALISIS ECONOMICO

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

6.3.1 Costos Comunes

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

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

GRAFICA 0-7: Costo fijo de cada partida común.

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

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

En resumen:

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

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

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

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

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

6.3.2 Costo Utilizando Materiales Neutralizadores de la Zona

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

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

Caliza:

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

GRAFICA 0-8: Costos por tonelada de la caliza.

Desmante:

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

GRAFICA 0-9: Costo por tonelada del desmante.

6.3.3 Costo Utilizando Materiales Neutralizadores Adquiridos a Proveedores Externos

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

Los montos encontrados en empresas locales fueron los siguientes:

Cotización N° 1: Mantaro Cal

- Producto: Cal Viva (CaO)
- Pureza: 90%
- Estado: Molida
- Lugar: Concepción – Junín
- Costo: 160 \$ / ton
- Flete Concepción Junín – Lima: 25 \$
- Monto Mínimo: 1 Ton
- Monto Máximo: 30 Ton

Cotización N° 2: Jorge Quispe Agregados

- Producto: Cal Hidratada (Ca(OH)₂)
- Pureza: 87%
- Estado: Molida
- Lugar: Junín
- Costo: 145 \$ / ton
- Flete Junín – Lima: 25 \$
- Monto Mínimo: 1 Ton
- Monto Máximo: 30 Ton

Utilizando Cal Viva al 90%:

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

GRAFICA 0-10:Utilizando cal-viva al 90%

Utilizando Cal Hidratada al 87%:

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

GRAFICA 0-11:Utilizando cal hidratada al 87%.

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

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

GRAFICA 0-12:Costo utilizando cal viva al 90%

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

GRAFICA 0-13:Costo utilizando cal hidratada al 87%

6.4 ANALISIS DE DISEÑO DE PLANTA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AMD

6.4.1 Etapa 1

En esta etapa se recupera agua desde los niveles superiores al nivel 1000 donde se encuentra el reservorio Yahaira.

Desde el nivel 1120 al nivel 1000 existe una diferencia de 120 m, en este tramo se añade el neutralizante Cal, en una proporción moderada. Al final de este tramo existe un reactor que hace una mezcla total para la neutralización del ADM, reduciendo el pH 2.7 a aproximadamente 6.5 – 7.5.

6.4.2 Etapa 2

Este tramo comprende la decantación de los lodos existentes generados en el reactor, el caudal que se maneja comprende en 12l/s.

La selección del tamaño del clarificador o sedimentador se puede realizar en función al caudal de tratamiento y la densidad de los lodos producidos.

6.4.3 Etapa 3

Comprende la separación de agua tratada con los sedimentos que se han generado.

El procedimiento contempla la opción del uso directo del agente neutralizante sobre el efluente ácido a lo largo de su canal de conducción, produciendo resultados similares a los obtenidos con la neutralización en tanques reactores de gran dimensión y que consumen una cantidad importante de energía.

CONCLUSIONES

- Los costos de neutralización utilizando materiales neutralizadores adquiridos a proveedores externos son mucho más altos a comparación de los montos necesitados al extraer los insumos de las zonas aledañas a los relaves.
- El estudio de la mineralogía de yacimientos minerales con el uso de las técnicas y herramientas de caracterización mineralógica, podría integrar otros métodos como la microscopía electrónica para con ello hacer más eficiente un estudio predictivo de generación de ácido
- El diseño de una planta convencional para el tratamiento de las aguas acidas recogidas de las labores es un proceso sencillo y al alcance de realización por la empresa. Esta agua tratada obtenida al final se puede hacer uso en las labores así como para regadíos de acceso superficial y evitar la generación de polvo.
- Para este trabajo se tomóg como deposición de agua tratada al reservorio Yahaira, con capacidad de 277me3 de agua, el caudal uniforme se tomó del bombeo del interior de mina de 12 l/s .

RECOMENDACIONES

- Es recomendable hacer un seguimiento de estudio de aguas acidas, plasmadas en un plan de monitoreo semanal, mensual y anual. El cual reduciría el impacto de corrosión al ambiente de trabajo.
- Es recomendable analizar la mineralogía de composición de del aguas acidas porque nos permite hacer una neutralización más eficiente.
- Es recomendable efectuar el micro planta de tratamiento de agua acida ya que es fácil, y sencilla de elaboración pero con una capacidad equitativa con el depósito de esta agua, en este caso el reservorio Yahaira. Los lodos sedimentos se depositan en una cancha de relave en el cual es recomendable hacer seguimiento ya que existen filtraciones de menor cantidad y podrían ser recuperados y tratarla nuevamente en el micro planta.
- Es recomendable hacer un diseño de planta de tratamiento de acuerdo a la cantidad de agua que se genera, en proyecciones futuras se incrementa el agua, el cual se diseñara una más grande o en todo caso se podría construir otra en una nueva entrada o en el interior de mina.

BIBLIOGRAFIA

- SERGIO LI LIN - 2013 - Medición del Potencial de Generación de Agua Ácida para un Relave en la Zona Central del Perú y sus Necesidades de Neutralización.
- Osvaldo Aduvire Dr. Ing. de Minas – 2006 -DRENAJE ACIDO DE MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO - Instituto Geológico y Minero de España Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente.
- OPTIMIZACIÓN EN EL SUMINISTRO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA PERFORACIÓN EN ZONA DE PROFUNDIZACIÓN MINA SAN CRISTOBAL COMPAÑÍA MINERA VOLCAN S.A.A - JOSE CARLOS PUMA CAYLLAHUA – 2018
- Tratamiento de las Aguas Acidas de la mina San Cristóbal INGENIERO DE MINAS DAVID A. AMAYA MOSTACERO - 2000
- Aduvire, O., Aduvire, H. (2007), Dimensionado de sistemas de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina.
- Rodríguez, R., Estupiñán, M., Iglesias, M., Castillo, E. (2007), Evaluación del riesgo ambiental de los pasivos ambientales de la cuenca alta del Río Santa en el departamento de Ancash, Perú.
- López – Pamo, E., Aduvire, O., Baretino, D. (2002), Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro. Boletín Geológico y Minero. Journal of Earth and Environmental Sciences.

Anexo 01

Estándares, normas, reglamentos y pautas de ingeniería

DECRETO SUPREMO No 010-2010- MINAM

Límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades Minero-Metalúrgicas.

Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas

En este documento, el término drenaje contaminado (DAR) se refiere al agua de drenaje que contiene niveles de cualquier elemento o contaminante que no se encuentre dentro de los límites reglamentarios para el agua que drena de un asiento minero, o que podría ocasionar un impacto ambiental adverso. Por lo general, este drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, lo siguiente:

- . pH, acidez, alcalinidad;
- . sulfatos;
- . nutrientes;
- . metales (disueltos o totales);
- . núclidos radiactivos;
- . sólidos disueltos totales (SDT); y
- . sólidos suspendidos totales (SST).

Generalmente el DAR se caracteriza por:

- . valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5
- . alcalinidad decreciente y acidez creciente
- . concentraciones elevadas de sulfato
- . concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales)
- . concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales

Para cada uno de estos componentes, se deben considerar los siguientes criterios:

- . estabilidad física (los sólidos no deben moverse)
- . estabilidad química (los contaminantes no deben lixivarse ni migrar)
- . uso y estética de la tierra (debe ser útil y de buena apariencia)

Remediación de la generación de aguas acidas

Etapa I. La acidez es generada y rápidamente neutralizada en las etapas iniciales cuando la roca que contiene minerales sulfurados es expuesta al oxígeno y al agua. El drenaje de agua es casi neutro. Mientras se produce la oxidación de los minerales sulfurosos, existe suficiente alcalinidad disponible como para neutralizar la acidez y precipitar el hierro en forma de hidróxido. Como se

muestra en las reacciones de la Etapa I, éste es fundamentalmente un período de oxidación química. El oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurosos. Los minerales carbonatados, como la calcita (CaCO_3) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ($\text{pH} > 7$) en el agua que fluye sobre la roca. También se podría detectar un contenido elevado de calcio (y magnesio u otros metales, dependiendo de las rocas consumidoras de ácido presentes), como resultado de la disolución de los minerales carbonatados, debido al consumo de ácido. La oxidación de los minerales sulfurosos libera hierro ferroso en la solución. La oxidación química del hierro ferroso es rápida a un pH superior a 7 y el hierro férrico se precipita de la solución como un hidróxido. De esta manera, la velocidad de oxidación química de la pirita es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el hierro férrico no contribuye como oxidante. 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.

Etapa II. A medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye hasta 4.5, ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas. A medida que la velocidad de generación de ácido se acelera en las etapas II y III, el pH disminuye progresiva y gradualmente, como se muestra en la figura 2.1. Los niveles de pH relativamente constantes representan la disolución de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a ese nivel de pH. Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3.5. 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, aun cuando las concentraciones de metales en la solución puedan ser bajas.

Etapa III. A medida que los minerales alcalinos se consumen o recubren, o bien, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido. Las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a principalmente oxidación biológicamente catalizada. De las reacciones de oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal. En esta etapa, la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la Etapa I. Como se indica en la figura 2.1, el descenso del pH incrementa la velocidad de oxidación. No hay estudios científicos definitivos para cuantificar la aceleración de las velocidades de oxidación debido a la oxidación catalizada

biológicamente; sin embargo, en la literatura existen informes sobre la observación del aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquéllas generadas por oxidación química. En esta etapa, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico. En algún momento en el futuro, décadas y -posiblemente- siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne sólo ligeramente reactiva y el pH del agua de drenaje no sea afectado. El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un período de días a un período de cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido. Dependiendo de la etapa en el proceso de oxidación se determinará la tecnología apropiada para la vigilancia y el control. En la etapa I, puede ser factible el control de las condiciones necesarias para las reacciones de generación de ácido. Se puede prevenir el impacto del drenaje contaminado sobre el ambiente mediante un control efectivo del proceso de oxidación, eliminando el reactante principal necesario para que se produzca la reacción (es decir, el oxígeno). El monitoreo se centrará en los parámetros indicadores del inicio del DAR: sulfato, bicarbonato, hierro ferroso, zinc, etc. Una vez que se establecen las reacciones de generación de ácido (Etapas II y III), el hierro férrico se convierte en el principal oxidante. En esta etapa, la oxidación está bien establecida y el control del DAR requiere la eliminación del mecanismo de transporte, con el fin de evitar que el contaminante sea liberado en el ambiente (es decir, el agua).

Anexo 02

Restricciones múltiples realistas

Restricciones múltiples realistas

- Los proyectos de diseño de alto nivel, los estudiantes resuelven problemas de diseño complejos que se caracterizan por muchas limitaciones técnicas y no técnicas realistas, así como compensaciones entre los diferentes objetivos y requisitos del proyecto. A continuación, se muestra la lista de restricciones típicas que los estudiantes consideran en proyectos de diseño de alto nivel:
 - Disponibilidad limitada de equipos para la la toma de datos de mina.
 - Difícil accesibilidad al sitio de la mina.
 - No existen mucha relación entre la Universidad y Empresa
 - Grupos de interés con diferentes intereses y expectativas sobre el proyecto.
 - Conflicto con las comunidades locales.
 - Disponibilidad limitada de información sobre los parámetros y características de la roca.
 - Consideraciones ambientales y posibles impactos en el ecosistema.
 - Variabilidad e imprevisibilidad del precio de los minerales.
 - El presupuesto limitado requiere el uso óptimo de los recursos disponibles.
 - La disponibilidad de tiempo limitado requiere una planificación cuidadosa del cronograma del proyecto

Anexo 03

CRONOGRAMA

TABLA: Cronograma de desarrollo del proyecto

Tiempo	Agosto			Setiembre			Octubre			Noviembre			Diciembre			
Actividades/ semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Recoleccion de informacion bibliografica	0	0	0													
Determinacion del aspecto teorico a utilizar			0	0	0											
Primer Control					0	0										
Traslado a mina para toma de datos							0									
Ajuste de datos de campo							0	0								
Aspectos geomecanicos								0	0							
Segundo Control										0						
Trabajo de laboratorio y Gabinete										0	0	0				
Calculos necesarian para la ventilacion											0	0	0			
Diseño del sistema de ventilacion													0	0		
Preparacion del Trabajo de investigacion														0		
Tercer Control															0	
Presentacion del trabajo final															0	0

Anexo 04

PRESUPUESTO

TABLA: Presupuesto básico para la elaboración del proyecto

<i>Presupuesto</i>				
<i>Cantidad</i>				
<i>Personal</i>	<i>personas</i>	<i>Dias de trabajo</i>	<i>S/.</i>	<i>total S/</i>
Laptop	1	3	5000.00	5000.00
Chofer	1	3	100.80	302.40
Camioneta	1	3	317.18	951.55
viaticos	4	3	100.00	1200.00
Hospedaje A. M.	4	2	35.00	280.00
Alimentacion	4	1	50.00	200.00
Combustible				300.00
Imprevisto				116.05
Costo por Viaje				3350.00
Costo por dos viajes				6700.00