

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Maestría en Estudios Ambientales



GUÍA PARA EL SONDEO DE LA
GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA
EN ÁREAS MINERAS DE GUATEMALA

Trabajo profesional presentado por
Marleny Reyes de Colocho
para optar al grado de Maestría en Medio Ambiente y Energía

Guatemala
2006

**GUÍA PARA EL SONDEO DE LA
GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA
EN ÁREAS MINERAS DE GUATEMALA**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Maestría en Estudios Ambientales

**GUÍA PARA EL SONDEO DE LA
GENERACIÓN DE DRENAJE ACIDO DE MINA
EN ÁREAS MINERAS DE GUATEMALA**


Trabajo profesional presentado por
Marleny Reyes de Colocho
para optar al grado de Maestría en Medio Ambiente y Energía

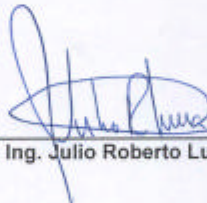
Guatemala
2006

Vo. Bo.

(f) 
MBA. Ing. Oscar René Rosal Higueros

TRIBUNAL

(f) 
MSc. Ing. Carlos Mansilla Mejía

(f) 
MSc. Ing. Julio Roberto Luna Aroche

(f) 
MBA. Ing. Oscar René Rosal Higueros

Guatemala, 21 de junio de 2006.

AGRADECIMIENTOS

Al bondadoso y amante Dios eterno, por esta etapa de mi vida y las personas que en ella estuvieron.

CONTENIDO

	Página
Lista de figuras	vi
Lista de tablas	vii
Resumen	viii
I. Introducción	1
II. Justificación	2
III. Objetivos	3
1. Generales	3
2. Específicos	3
IV. DRENAJE ÁCIDO DE MINA	4
1. Formación	4
2. Química básica de la generación de drenaje ácido de mina	6
3. Métodos para la predicción de drenaje ácido de mina	9
4. Tipos de prueba	14
4.1 Pruebas estáticas	12
4.2 Pruebas cinéticas	13
V. GEOLOGÍA Y FORMACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO DE MINA.	22
1. Mineralizaciones susceptibles de generar drenaje ácido de mina	22
2. Minerales que actúan como neutralizadores del drenaje ácido de mina.	25
VI. MANEJO Y CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA.	28
1. Control primario: reacciones de oxidación	28
1.1 Cubiertas y sellos	28
1.2 Eliminación de sulfuros/manejo selectivo de residuos sulfurados.	29

1.3 Mezcla o aditivos básicos	30
1.4 Inhibición de las bacterias	30
1.5 Cubiertas de agua y descarga sub acuática	31
1.6 Saturación	31
2. Control secundario: migración de contaminantes	31
2.1 Reducción de infiltración	32
2.2 Desviación del agua de superficie	32
2.3 Intercepción del agua subterránea	32
3. Control terciario: recolección y tratamiento	33
3.1 Tratamiento activo	33
3.1.1 Neutralización química	33
3.1.2 Disposición y tratamiento de lodos	34
3.2 Tratamiento pasivo	34
3.2.1 Canal de caliza anóxico	34
3.2.2 Canales de caliza abiertos	34
3.2.3 Sistemas de flujo vertical	35
3.2.4 Pantanos e inundaciones	36
4. Otros tratamientos	38
VII. METODOLOGÍA. CASO DE APLICACIÓN	39
1. Antecedentes	39
2. Metodología para la toma de muestras	40
2.1 Fase I. Preparación del plan de muestreo	42
2.2 Fase II. Preparativos para la campaña de muestreo	43
2.3 Fase III. Muestreo	44
3. Descripción de sitios de estudio	45
3.1 Geología superficial	46
3.2 Descripción general	46
3.3 Geología local	48
4. Selección de los puntos de muestro	49

5. Datos obtenidos en campo	52
6. Análisis de resultados	54
VIII. Conclusiones	56
IX. Recomendación	58
Bibliografía	59
Anexo 1	63
Glosario	68

LISTADO DE FIGURAS

Figura No.	Página
1. Proceso de generación de drenaje ácido de mina	4
2. "Yellow boy" en Clear Creek River	6
3. Solubilidad de metales pesados en función del pH	10
4. Esquema de un yacimiento de sulfuros	24
5. Sección de un drenaje anóxico de calizas	35
6. Sección de un canal abierto de calizas	35
7. Sección de un reactor de flujo vertical	36
8. Sección típica de un pantano aeróbico	37
9. Espadaña spp	37
10. Sección típica de un pantano anaeróbico	38
11. Diagrama de flujo para la toma de muestras de sondeo	41
12. Mapa de quebradas	47
13. Calizas de la Formación Tactic	48
14. Filitas de la Formación Tactic	48
15. Tercer quebrada	48
16. Punto de muestreo No. 1, Río Helado aguas arriba de la mina.	50
17. Punto de muestreo No. 2, Río Helado aguas debajo	50

de la mina.	
18. Punto de muestreo No. 3, Quebrada que baja de la mina	50
19. Calizas fosilíferas en el Río Selegua	50
20. Calizas de la Formación Tactic	51
21. Túnel Inclinado No. 1, Anabella	51
22. Impregnaciones de azufre	51

LISTADO DE TABLAS

Tabla No.		Página
1.	Bacterias de las menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento.	9
2.	Sumario de las pruebas estáticas, costos, ventajas y desventajas	16
3.	Sumario de algunas pruebas cinéticas, métodos, costos, ventajas y desventajas	18
4.	Fuentes de información para determinar el potencial de generación de drenaje ácido de minas en operaciones antiguas y nuevas	20
5.	Lecturas obtenidas <i>in situ</i> y resultados de laboratorio	52

RESUMEN

En Guatemala existen pocas operaciones mineras que extraen productos metálicos que incluyan industria minera asociada, aunque en el pasado se dio una actividad un poco más amplia. En el pasado el tipo de minería más activa fue la de minerales metálicos, hoy en día sólo quedan dos áreas mineras activas de todas las que alguna vez existieron tal es el caso de los lugares conocidos como Torlón (con casi 250 años de producir plomo y zinc) y los derechos mineros ubicados en San Ildefonso Ixtahuacán (adquiridos aproximadamente en 1957).

Se tiene conocimiento de otros lugares mineros que fueron importantes en otras épocas los cuales hoy en día se encuentran abandonados, como es el caso de las minas Caquipec (ubicada en Alta Verapaz) y Mataquescuintla (en el departamento de Jalapa). Esta situación de abandono actual se une al hecho que, antiguamente, las consideraciones ambientales no existían como hoy día se conocen, y generan preocupación respecto al estado de los cuerpos de agua que rodean estas áreas mineras. En el caso de las minas activas, es deseable conocer el estado actual del ambiente que las rodea a cabalidad, y uno de los parámetros más importante es la presencia o no de drenaje ácido de mina.

La generación de drenaje ácido de mina, es uno de los problemas ambientales más importantes derivado de la minería. Para llevar a cabo este muestreo de sondeo se visitó el derecho minero identificado como Anabella, en San Ildefonso Ixtahuacán, y se tomaron muestras de agua y roca. Las muestras de agua fueron analizadas en el laboratorio del Ministerio de Energía y Minas por medio de espectrometría de absorción atómica.

Para llevar a cabo este sondeo se desarrolló una metodología de muestreo siguiendo estándares del Servicio Geológico de Estados Unidos, y las recomendaciones de métodos estandarizados. La metodología parte desde los pasos necesarios para organizar una campaña de muestreo (equipo, recursos financieros, número de personas, etc), criterios para seleccionar el sitio de muestreo y el número de muestras que se deben recolectar y su preservación para análisis. Las condiciones de velocidad en el flujo a muestrear es importante en la selección del lugar de muestreo.

El área que se seleccionó para el sondeo, consiste en una zona bajo la influencia de la zona de falla Cuilco – Chixoy – Polochic y Motagua, con presencia de minerales como pirita, scheelita, estibina, arsenopirita aurífera, cuarzo y calcita. Existe una fuerte presencia de calizas de la formación Santa Rosa. En el área en la cual se ubica el derecho minero Anabella, se encuentran varias quebradas que desembocan en el Río Helado y el Río Selegua; debido a que el lugar fue visitado en plena época seca, únicamente una de las quebradas que desemboca en el Río Selegua pudo ser muestreada. El derecho minero Anabella tiene diez años de haberse cerrado.

Los resultados obtenidos, en cuanto a la acidez del agua en los lugares muestreados, indican que el agua es alcalina, con valores de pH superiores a 7. En el laboratorio, aunque se encontró presencia de plomo, cinc y cobre, los mismos son inferiores a las recomendadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA por sus siglas en inglés).

Al conocerse la geología de la zona, se esperaba que los minerales generadores de drenaje ácido, estuvieran en equilibrio con los neutralizadores, lo cual se puede apreciar en los resultados obtenidos.

Se incluye una serie de posibles tecnologías que pueden ser aplicadas en la gestión de prevención o en su caso de tratamiento de drenaje ácido, como una fuente de información, en caso se presente tal fenómeno; tales tecnologías incluyen las cubiertas y sellos, el uso de pantanos, control de la migración de contaminantes, etc.

I. INTRODUCCIÓN

La definición del fenómeno conocido como drenaje ácido, generado por procesos naturales o antrópicos involucra la presencia de reacciones químicas donde, la acidez del agua es tan alta, que afecta los procesos naturales que se dan en un cuerpo de agua, ya sea este un río, una quebrada, una pila de estériles, etc. Cuando este problema (la acidez del agua) lleva mucho tiempo de ocurrir se manifiesta a través de colores rojizos – naranja en el cauce de la corriente de agua. Lamentablemente, este proceso puede darse aún después de que la mina ha sido abandonada.

Hoy día, existe una preocupación en el sector minero por prevenir este fenómeno natural, que se ve incrementado por la actividad humana. Como en otros campos, la prevención es la mejor medida de gestión ambiental; sin embargo, cuando ya se ha manifestado el impacto negativo, lo que queda es remediarlo. En el caso del drenaje ácido existen métodos para prevenir y para tratar el efluente ácido, ya sea de forma activa o pasiva. En todo caso, el sistema de gestión que se seleccione está en función de factores tales como: costos, clima, tipo de minería (subterránea o a tajo abierto), si existe o no metales en el efluente, grado de acidez presente, etc.

Para el caso de Guatemala, la actividad minera en el sector metálico es poca, aunque se cuenta con algunas zonas que fueron explotadas anteriormente y que hoy día se encuentran inactivas. Para estos casos lo que queda es llevar a cabo un monitoreo periódico de la calidad del agua y para la minas que se estén por abrir, hacer un plan de minado que incluya una identificación minuciosa de minerales para aislar aquellos que puedan ser fuente de generación de drenaje ácido.

II. JUSTIFICACIÓN

La minería es una actividad tan antigua como la humanidad. Sin embargo no es sino hasta en el siglo pasado que el tema ambiental fue incluido en las actividades productivas y la minería no escapó a esta tendencia. En Guatemala las minas para minerales metálicos estuvieron en actividad en el pasado, sin que las consideraciones ambientales asociadas a esta actividad aún hoy día hayan sido generalmente aplicadas.

No existen datos que permitan monitorear el estado de los cuerpos de agua cercanos a los lugares que registran o registraron actividad minera metálica y es por ello que se necesita realizar un diagnóstico que pueda indicar la generación de drenaje ácido de mina.

III. OBJETIVOS

1. GENERAL

Identificar la generación de drenaje ácido de mina, en la mina ubicada en San Ildefonso Ixtahuacán seleccionada con base a las condiciones geológicas del área.

2. ESPECÍFICOS

2.1 Establecer las condiciones físicas y químicas en las que se encuentran las corrientes de agua cercanas a la mina seleccionada.

2.2 Realizar pruebas de laboratorio para determinar si existe presencia de metales pesados como el plomo, cinc, cadmio, hierro y cromo.

2.3 Desarrollar la metodología para llevar a cabo un sondeo de agua y roca.

IV. DRENAJE ÁCIDO DE MINA

1. Formación

El agua que corre por la superficie de la Tierra y bajo la superficie contiene componentes químicos en muy pocas cantidades, muchos de ellos vienen de fuentes naturales y algunos otros de las actividades antropogénica o una combinación de ambos. Ejemplos de eventos naturales que afectan la química del agua son:

- ◆ Erupciones volcánicas
- ◆ Actividad hidrotermal
- ◆ Formaciones de calizas en cavernas: estalactitas y estalagmitas
- ◆ Salmueras por la disolución de minerales solubles
- ◆ Generación de drenaje ácido de roca

Figura 1. Proceso de generación de drenaje ácido de mina



Fuente: Ministerio de Educación de Chile

Entre las contribuciones antropogénicas al cambio en la química del agua, se encuentran las emisiones industriales que generan “lluvia ácida” y la descarga directa de contaminantes en los cuerpos de agua. Hay otros ejemplos de combinación de efectos como la disposición de fertilizantes en cuerpos de agua, resultado de prácticas agrícolas.

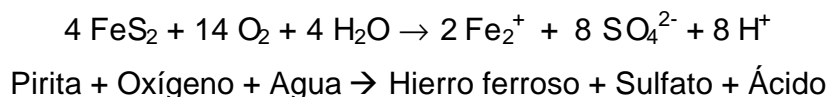
El tema de este documento es el drenaje ácido de minas, el cual resulta de la combinación de eventos naturales y de la actividad humana, como la minería subterránea, minería a cielo abierto y trabajos de obra civil (Mills 1995).

El drenaje ácido de minas (DAM), pilas de estéril y de desechos es uno de los más graves problemas ambientales de la explotación minera. La presencia de minerales sulfurados en contacto con el agua produce ácido sulfúrico en las aguas de drenaje, que puede presentar un pH extremadamente bajo que alcanza valores de 2.0.

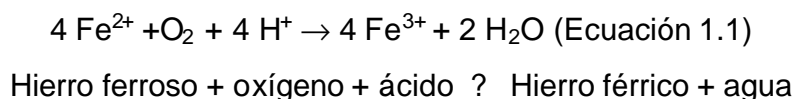
La acidez proviene de reacciones de oxidación de los sulfuros pirita, (FeS_2) y pyrrotita (FeS), en presencia de agua o aire, reacción que es catalizada por bacterias como la *Thiobacillus ferrooxidans*. Además de representar un grave problema ambiental por el simple hecho que las aguas ácidas alteren profundamente las características químicas de los cuerpos de agua receptores, contaminándolas y causando impactos en los ecosistemas acuáticos, la acidez de las aguas también causa la solubilización de diversos metales, que en función del pH reducido pueden estar presentes en concentraciones muy por encima de la admisible en los cuerpos de agua y concentrarse de inmediato en los sedimentos o en los organismos (Sánchez 1995).

2. Química básica de la generación de drenaje ácido de roca o de mina

El fenómeno se produce por la oxidación e hidrólisis de los sulfuros, en especial de la pirita, mediante la serie de reacciones:



A su vez, los iones ferrosos (Fe_2^+) se oxidarán de la siguiente manera:



La reacción, que puede ocurrir es la hidrólisis del hierro. Hidrólisis es una

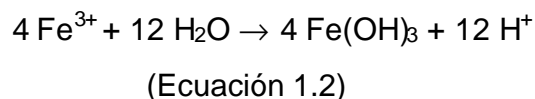
Figura. 2. Yellow boy en Clear Creek, Colorado



.Fuente:
http://www.mines.edu/fs_home/jhoran/ch126/yellow.htm

reacción que divide la molécula de agua; tres moles de acidez son generados como un subproducto. Muchos metales son capaces de ser sometidos a la hidrólisis. La formación de hidróxido férrico precipitado (sólido) depende del pH, los sólidos se forman, si el pH está arriba de 3.5 pero si es menor de 3.5, pocos o ningún sólido precipitará.

Los iones férricos se hidrolizan para formar hidróxido férrico:



Hierro férrico + agua ? Hidróxido de hierro (yellow boy) + ácido

La reacción es la oxidación de pirita adicional por el ion férrico. El ciclo y la auto propagación parte de la reacción global y toma lugar muy rápidamente y continúa hasta que el hierro férrico o la pirita se agoten. Notar que en esta reacción, el hierro es el agente oxidante, no el oxígeno.

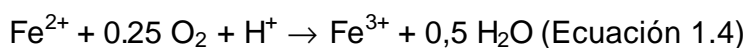
Este hidróxido es el precursor de una serie de minerales típicos del ambiente oxidativo de menas sulfuradas, y otorgan a las escombreras y arroyos un típico color amarillento-rojizo. El mineral más común de este grupo llamado genéricamente “limonitas” es la goethita, FeO(OH).

En climas muy áridos (desierto de Atacama, Chile; *Outback* australiano), esta serie de reacciones puede quedar interrumpida dando origen a sulfatos férricos tales como jarosita, copiapita o coquimbita.

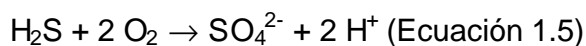
A pesar que estas reacciones pueden dar a entender que suceden en condiciones puramente inorgánicas el entorno biológico juega un papel decisivo. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es la mayor responsable de la contaminación relacionada con el drenaje ácido procedente de explotaciones mineras y mineralizaciones en general. Esta es una bacteria acidófila (propia de ambiente ácido), con una fisiología basada en la fijación de carbono a partir del CO₂ atmosférico, siendo por lo tanto estrictamente autótrofa más específicamente quimioautótrofa. *Thiobacillus. ferrooxidans* obtiene su energía oxidando hierro o azufre:

Bacteria

Bacteria

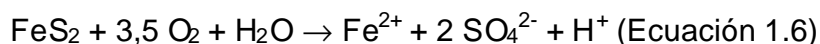


Hierro ferroso + Oxígeno + Ácido → Hierro férrico + agua

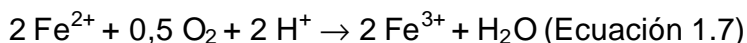


Sulfuro de hidrógeno + Oxígeno → Sulfato + Ácido

De esta manera, la bacteria cataliza reacciones del tipo:



Pirita + Oxígeno + agua → Hierro ferroso + sulfato



Hierro ferroso + Oxígeno + Ácido → Hierro férrico + Agua

Estas reacciones se pueden dar con el resto de sulfuros metálicos aunque con variaciones menores que implican otros productos más o menos solubles en cada caso.

Como resultado se obtienen aguas de pH muy bajo (2-3), cargadas en sales sobre todo en sulfatos, en las que normalmente son más solubles los metales pesados como Pb, Zn, Cu, As, Cd, etc. (Figura 3). Una excepción importante a tener en cuenta es el mercurio, que en medio ácido sulfúrico es insoluble, debido a que el sulfato de mercurio es insoluble en agua, precipitando en forma de schuetteita.

Otro factor importante es la granulometría del material, cuanto menor es el tamaño de grano de las partículas, mayor es la superficie específica y por tanto, mayor la posibilidad de que se produzcan estas reacciones. Sobre esta base, las balsas de finos (*relaves*) son excelentes candidatos al desarrollo del fenómeno, siempre y cuando además presenten una porosidad y permeabilidad suficientes como para permitir la entrada y salida de aguas.

Las condiciones hidrológicas de la zona, disponibilidad del agua, temperatura, composición, etc. por su parte son siempre un factor a tener muy en cuenta, suelen estar relacionadas con factores climáticos como pluviosidad, temperaturas medias y su distribución; los ciclos muy continuos de mojado-secado favorecen mucho el fenómeno.

Tabla 1: Bacterias de las menas sulfuradas y sus condiciones de crecimiento				
<i>Microorganismo</i>	PH	Temp., °C	Aerobio	Nutrición
<i>Thiobacillus thioparus</i>	4.5-10	10-37	+	Autotrópico
<i>T. ferrooxidans</i>	0.5-6.0	15-25	+	“
<i>T. thiooxidans</i>	0.5-6.0	10-37	+	“
<i>T. neapolitanus</i>	3.0-8.5	8-37	+	“
<i>T. denitrificans</i>	4.0-9.5	10-37	+/-	“
<i>T. novellus</i>	5.0-9.2	25-35	+	“
<i>T. intermedius</i>	1.9-7.0	25-35	+	“
<i>T. perometabolis</i>	2.8-6.8	25-35	+	“
<i>Sulfolobus acidocalderius</i>	2.0-5.0	55-85	+	“
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	5.0-9.0	10-45	-	Heterotrópico

Fuente: Universidad de Castilla – La Mancha

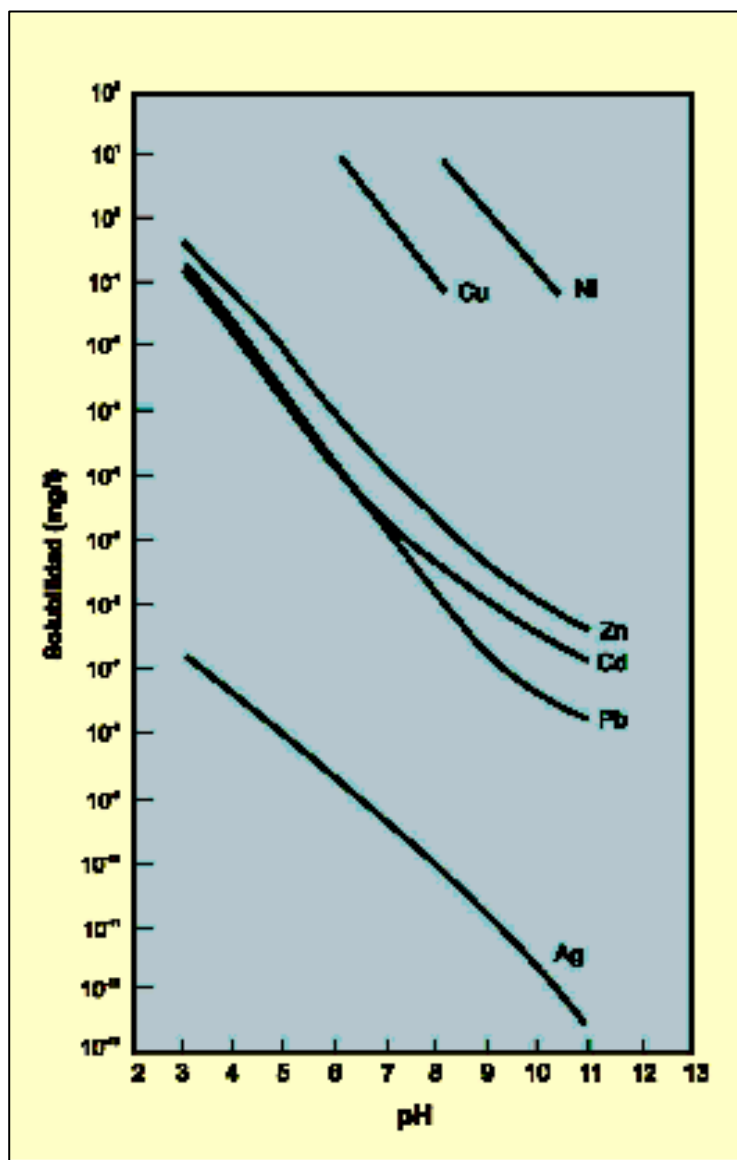
La mineralogía de las rocas encajantes, o de la ganga, puede jugar también un papel importante en el desarrollo de estos fenómenos. En este campo los carbonatos juegan un papel especialmente importante por su potencial natural de neutralización de la acidez generada por este proceso.

3. Métodos para la predicción de drenaje ácido

En cuanto a la predicción del drenaje ácido de mina, uno de los mejores métodos para el control del mismo es la prevención. Actualmente aquellas operaciones mineras que inician operaciones, realizan estudios a detalle para conocer la situación geológica del sitio a minar para planificar la gestión del drenaje de la zona de la mina, incluyendo el drenaje ácido. Esta práctica, sin embargo no cubre operaciones mineras muy antiguas, ya que la preocupación

ambiental es algo relativamente reciente comparada con la historia de la minería alrededor del mundo.

Figura 3. Solubilidad de metales pesados en función del pH.



Fuente: Universidad de Castilla – La Mancha.

Los objetivos de las pruebas de predicción son:

- ◆ Determinar si un volumen discreto de desechos proveniente de las actividades mineras generará drenaje ácido.
- ◆ Predecir la cantidad de drenaje basado en la tasa de formación de ácido medida.

Los resultados de cualquier prueba son tan seguros como las muestras que sean recolectadas.

Una vez la estrategia de muestreo es seleccionada, un apropiado método (o métodos) de análisis pueden ser escogidos. Los métodos usados para predecir el potencial de generación de ácido son clasificados como estáticos o cinéticos. Estos análisis se llevan a cabo para tasar el potencial de generación de ácido de la muestra, simulando las condiciones naturales a las que se verá sometida. Los factores que afectan la selección del régimen de muestreo y método de análisis, incluyen: el conocimiento existente de la geología y, costos y disponibilidad de tiempo para los análisis usados en la predicción del potencial de generación de ácido.

Los componentes que afectan la capacidad de generación de ácido se caracterizan por:

- ◆ La cantidad de generación de ácido (sulfuros) de los minerales presentes (NOTA: se asume una reacción total de los minerales de azufre).
- ◆ Cantidad de neutralización de ácido por los minerales presentes.

Los componentes que afectan la tasa de generación de ácido incluyen:

- ◆ Tipo de mineral de azufre presente (incluyendo la forma de cristalización).
- ◆ Tipo de mineral de carbonato presente (y otros minerales con propiedades neutralizantes).
- ◆ Minerales superficiales en el área que estén disponibles para la reacción.

- ◆ Ocurrencia de vetas de mineral en los desechos (ejemplo: incluido o liberado).
- ◆ El tamaño de la partícula de los desechos.
- ◆ Disponibilidad de agua y oxígeno.
- ◆ Bacterias.

4. Tipos de pruebas

4.1 Pruebas estáticas: Las pruebas estáticas predicen la calidad del drenaje mediante la comparación con el máximo potencial de producción de ácido de una muestra (AP) con su máximo potencial de neutralización (NP). El AP es calculado por la multiplicación del porcentaje total de azufre o sulfuro de azufre (dependiendo de la prueba). En la muestra mediante un factor ($AP = 31.25 * \%S$). NP es una medida del material carbonatado disponible para neutralizar el ácido. El valor NP es determinado agregando ácido a la muestra y por titulación determinar la cantidad de ácido consumido o mediante la titulación directa de la muestra. El total de potencial de neutralización (NNP) o “acid/base account” (ABA), se determina por la resta de AP y NP. Sus unidades son generalmente expresadas en masa (Kg, tonelada métrica, etc.) o de carbonato de calcio ($CaCO_3$) por 1000 toneladas métricas de roca, partes por mil. Si la diferencia entre AP y NP es negativa, entonces existe potencial de formación de ácido, si es positivo entonces hay un menor riesgo (EPA 1994).

La prueba estática determina el total de generación de ácido, así como el potencial de neutralización de la muestra. Las pruebas estáticas pueden llevarse a cabo de forma rápida y barata comparada con las pruebas cinéticas. Estas últimas son encaminadas a imitar los procesos encontrados en las minas usualmente con una tasa de aceleración. Estas pruebas requieren más tiempo y son considerablemente más caros que las pruebas estáticas. Los resultados de estas pruebas son usados para clasificar los depósitos de desechos o materiales de acuerdo a su potencial de generación de ácido. Esta información puede ser

recolectada y evaluada durante el análisis económico de la mina, en las fases de exploración. Con base en esta información, se pueden tomar decisiones respecto a las prácticas específicas de mitigación al agotarse la mina (EPA 1994).

En la Tabla 2 (Página 16), se presenta un resumen de los métodos utilizados para la predicción del drenaje ácido de mina, se incluyen ventajas y desventajas de los mismos.

4.2 Pruebas cinéticas. Estas se distinguen de las pruebas estáticas en que se intenta reproducir la reacción de oxidación natural. Estas pruebas típicamente usan un gran volumen de muestras y requieren un tiempo mayor para completarse en comparación a las pruebas estáticas. Estas pruebas proveen información de la tasa de oxidación del mineral sulfurado, además de la producción de ácido: también son un indicador de la calidad del agua de drenaje. De las diferentes pruebas usadas no existe ninguna preferida. La preferencia por las pruebas cambia y se incrementan con el tiempo; con la experiencia y entendimiento. Las pruebas cinéticas pueden ser usadas para mejorar el impacto de diferentes variables en el potencial de generación de ácido.

Es de mucha ayuda complementar estas pruebas con una caracterización de la muestra, análisis de la superficie del área, mineralogía y metales presentes, tal información puede afectar la interpretación de los datos obtenidos en las pruebas y son importantes cuando se realizan comparaciones espaciales y temporales entre muestras. Es importante considerar el tamaño de partícula de la muestra (EPA 1994). La tabla número 3, muestra un sumario de métodos para realizar pruebas cinéticas, como celdas húmedas, columnas de prueba o pruebas de campo, algunos requieren mayor tiempo, otros un gran número de muestras por lo que su utilización estará en función de lo que cada empresa tenga como objetivo y de los recursos para llevarlas a cabo.

Para llevar a cabo los análisis de predicción de drenaje ácido se requiere obtener información a partir del trabajo de campo y laboratorio, por lo que a continuación se presenta una tabla que contiene la información que se requiere para llevar a cabo la caracterización de materiales sujetos a generación de drenaje ácido de mina.

Los esfuerzos realizados por la industria minera y las agencias reguladoras de Estados Unidos y Canadá, por establecer protocolos para llevar a cabo el muestreo y el análisis de la predicción de generación de drenaje ácido, han demostrado que cada caso debe ser estudiado en forma individual; a esto se añade el hecho que existen diferentes métodos para llevar a cabo este tipo de pruebas.

El proceso de investigación del potencial de generación de drenaje ácido es interactivo. Se muestrea, se llevan a cabo las pruebas y se analizan los resultados en un conjunto de muestras que se consideren representativas. Los datos obtenidos pueden ayudar a definir puntos estratégicos que necesiten ser nuevamente analizados, con lo cual se logra afinar la identificación de potenciales puntos de generación de drenaje ácido.

Según la EPA, los pasos típicos para la predicción del potencial de generación de drenaje ácido son:

- ◆ Definir las unidades geológicas o litológicas a ser encontradas durante el minado.. Se necesita describir a detalle la geología y mineralogía de estas unidades.
- ◆ Desarrollar un plan de muestreo basado en el entendimiento de la geología (masas de rocas, etc.). La recolección de muestras integrará la variación composicional de las unidades de rocas.
- ◆ Seleccionar las pruebas a realizar: cinéticas o estáticas para la predicción de la generación de drenaje ácido.

- ◆ Evaluar el criterio de muestreo y conducir una prueba cinética adicional.

- ◆ Desarrollar un modelo apropiado.

Basado en los hallazgos, clasificar las unidades geológicas o litológicas como ácidas, no formadoras de ácido o como inciertas (NOTA: el potencial de producir drenaje ácido, puede variar según la unidad geológica).

El muestreo deberá ser diseñado de tal forma que caracterice el tipo y volumen de material que se verá expuesto durante el minado, por lo que debe estar relacionado con el plan de operación de la mina. Las técnicas de muestreo son similares a la utilizada en la exploración de minerales. Sin embargo, la pureza de la muestra estará influida por el tipo de muestreo que se realice; por ejemplo, si la muestra recolectada proviene de un núcleo de perforación, la contaminación puede provenir de un lubricante que se utilice. En el caso de colas en minas ya existentes, la influencia de cal agregada durante la molienda, puede mantener condiciones alcalinas.

En cuanto al número de muestras que deben recolectarse existen varios criterios; a continuación se presentan algunos:

- ◆ Gene Farmer, U.S. Forest Service, sugiere una muestra de aproximadamente 1, 500 gramos por cada 20,000 toneladas de roca de desecho, o 50 muestras por cada 1 millón de toneladas.

- ◆ British Columbia AMD Task Force, recomienda un número mínimo de muestras basado en la unidad de masa geológica. Se recomienda un número mínimo de 25 muestras para 1 millón de unidad geológica, o una muestra por cada 40,000 toneladas.

Tabla 2. Sumario de las pruebas estáticas, costos, ventajas y desventajas.				
Conteo Ácido Base. (Sobek <i>et al</i> 1978)	Conteo Ácido Base Modificado. (Coastech 1989)	BC Investigación Inicial. (Duncan and Bruynesteyn 1979)	Producción de alcalinidad y potencial de azufre (Caruccio <i>et al</i> 1981)	Producción neta de ácido. (Coastech 1989)
Determinación de la producción de ácido				
Acid producing potential = $31.25 * \text{total S}$	Acid producing potential = $31.25 * \text{Total S}$	Total acid production = $31.25 * \text{Total S}$	Total S usado como indicador.	300 mL H ₂ O ₂ agregados a 5g de roca para oxidar directamente los sulfuros presentes.
Determinación del potencial de neutralización.				
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Muestra 60 mesh (0.24 mm). ◆ Agregar HCl como indicador para prueba de efervescencia, hervir un minuto, que enfríe. ◆ Titulación con endpoint pH 7.0. ◆ Costo 34 - 110 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Muestra 60 mesh (0.24 mm). ◆ Agregar HCl como indicador para prueba de efervescencia, agitar por 23 horas en un cuarto a temperatura. pH de 1.4 – 2.0 requerido después de seis horas de agitación. ◆ Titulación, endpoint pH 8.3. ◆ Costo: 34 – 110. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Muestra 300 mesh (0.038 mm) ◆ Titulación de la muestra a pH 3.4 con 1.0 N(H₂SO₃). ◆ Titulación con endpoint no aplica. ◆ Costo: 65 – 170. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Muestra de 0.023 mm. ◆ 20 mL 0.1N(HCl) a 0.4 g sólido por 2 horas en un cuarto a temperatura. ◆ Titulación con endpoint pH 4.0. ◆ Costo: 34 – 110. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ No se presenta tamaño de partícula. ◆ Ácido producido por la oxidación del sulfuro de hierro disuelve los minerales "buffer". ◆ Titulación endpoint pH 7.0. ◆ Costo: 25 - 68
Ventajas y desventajas				
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Es simple y de corto tiempo. ◆ No requiere equipo especial y es de fácil interpretación. ◆ Pueden ser analizadas muchas muestras. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Simple. ◆ Corto tiempo. ◆ No se requiere equipo especial. ◆ Fácil interpretación. ◆ No permite asumir relación con ensayos 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Simple ◆ Razonablemente corto tiempo. ◆ No se requiere equipo especial. ◆ Fácil interpretación. ◆ Muchas muestras pueden ser analizadas. ◆ Asume paralelismo 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Simple. ◆ Corto tiempo. ◆ No se requiere equipo especial. ◆ Interpretación moderada. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Simple. ◆ Corto tiempo. ◆ No se requiere equipo especial. ◆ Fácil interpretación. ◆ Limitada replicabilidad. ◆ Incerteza si se extiende la oxidación del

Tabla 2. Sumario de las pruebas estáticas, costos, ventajas y desventajas.				
Conteo Ácido Base. (Sobek <i>et al</i> 1978)	Conteo Ácido Base Modificado. (Coastech 1989)	BC Investigación Inicial. (Duncan and Bruynesteyn 1979)	Producción de alcalinidad y potencial de azufre (Caruccio <i>et al</i> 1981)	Producción neta de ácido. (Coastech 1989)
<ul style="list-style-type: none"> ◆ No permite asumir relación con ensayos cinéticos paralelos ácido / base. Si APP y Apestan cerca, difícil de interpretar y los diferentes tamaños de partículas no son reflejados. 	<p>cinéticos paralelos ácido / base. Si APP y Apestan cerca, difícil de interpretar y los diferentes tamaños de partículas no son reflejados.</p>	<p>ácido/base.</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ No refleja diferente tamaño de partículas. ◆ Si APP y NP están cercanos es de difícil interpretación. 		<p>azufre simulado como en el campo.</p>
Fuente: EPA, 1994				

Tabla No. 3. Sumario de algunas pruebas cinéticas, métodos, ventajas y desventajas.

Celdas Húmedas	Soxhelet Extractiosm	Columnas de prueba.	BC Investigación Confirmación	Reactor Batch	Pruebas de campo
Sumario del método de prueba					
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Tamaño de partícula de 2.38 mm. ◆ 200 g de roca expuesta por tres días a aire seco, tres días con aire húmedo, y lavado con 200 mL al día siete. 	<p>No se especifica tamaño de partícula. T=70°C. T=25°C Agua que pasa a través de la muestra es destilada y reciclada a través de la muestras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Tamaño variable de partícula. ◆ Las columnas contiene desechos de mina lixiviados con volúmenes discretos o soluciones recirculadas. ◆ Costo: depende de la escala. 	<p>Tamaño de partícula de mesh 400. 15 – 30 g se agregan a una solución bacteriana activa con pH 2.2 a 2.5, T=35°C. Si el pH se incrementa, la muestra no es productora de ácido. Si el pH decrece, la mitad de la masa de muestra origina se le agrega en cada uno de dos incrementos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Partícula de tamaño mesh 200. ◆ Muestra/agua mezcladas es agitados 200 g/500mL. 	<p>Partículas de tamaño de campo. 800 – 1,300 toneladas métricas de pilas de prueba construidas en las líneas de flujo y datos de calidad del agua son recolectadas. Las pruebas hincan en 1977 y continúan. Costo: la construcción inicial es cara, los costos subsecuentes son comparables.</p>

Tabla No. 3. Sumario de algunas pruebas cinéticas, métodos, ventajas y desventajas.

Celdas Húmedas Soxhlet Extractiosm	Columnas de prueba.	BC Investigfación Confirmación	Reactor Batch	Pruebas de campo
Ventajas y desventajas				
<ul style="list-style-type: none"> ◆ Modelos AP y Np buenos y modelos húmedo/seco se aproximan a las tasas de acidez en las condiciones de campo. ◆ De uso moderado. ◆ Los resultados toman largo tiempo. ◆ Requiere algún equipo especial. ◆ La interpretación es moderadamente fácil. ◆ Se genera un gran conjunto de datos. ◆ Simple. ◆ Resultados en corto tiempo. ◆ Tasa de interacción entre AP y NP. ◆ Uso moderado. ◆ Necesita equipo especial. ◆ Interpretación moderada en la fase de desarrollo y la relación con el proceso natural no es claro. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Modelos AP y NP. ◆ Efectos de los modelos de diferentes tipos de rocas. ◆ Modelos húmedo/seco. ◆ Modelos según el tamaño de grano. ◆ Difícil interpretación. ◆ No es práctico para un gran número de muestras o volumen. ◆ Mucha información generada. ◆ Largo tiempo. ◆ Problemas potenciales: desigual lixiviación, aplicación y canalización. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Simple de usar. ◆ Bajo costo. ◆ Tasa el potencia de lixiviación biológico. ◆ Uso moderado. ◆ Se necesita bastante tiempo. ◆ Requiere algún equipo especial. ◆ De difícil interpretación si el cambio en el pH es muy pequeño. ◆ El modelo no hace el paso inicial AP y se tiene largo tiempo para estabilizar el pH. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Es capaz de examinar muchas muestras simultáneamente . ◆ Equipo relativamente simple. ◆ Está sujeto a grandes errores de muestreo. ◆ Carece de precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Usado actualmente en deschos de minas, bajo condiciones ambientales. ◆ Puede ser usado para determinar el volumen de drenaje. ◆ Métodos de mitigación pueden ser ensayados. ◆ La construcción inicial es costosa. ◆ Largo tiempo.

Fuente: EPA, 1994

Tabla 4: Fuentes de información para determinar el potencial de generación de drenaje ácido de mina en minas en operación y nuevas.		
Tipo de Información	Mina nueva	Mina en operación
Clasificación de las rocas	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Afloramientos ◆ Muestreo de perforación, testigos de perforación. ◆ Secciones geológicas. ◆ Análisis de núcleos. 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Afloramientos y excavaciones expuestas. ◆ Núcleos de perforación. ◆ Muestras de producción. ◆ Muestreo específico para áreas de trabajo y pilas. ◆ Ensayos de núcleos.
Distribución de las rocas en la mina	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Plan de minado 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Plan de minado. ◆ Registros de ubicación de rocas. ◆ Pozos y planos de exposiciones subterráneas. ◆ Análisis de las pilas. ◆ Perforación y muestreo en pilas. ◆ Áreas para personal.
Generación de ácido, potencial de lixiviación	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Pruebas estáticas. ◆ Lixiviados de extracciones 	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Observación de núcleos viejos.

Tabla 4: Fuentes de información para determinar el potencial de generación de drenaje ácido de mina en minas en operación y nuevas.		
Tipo de Información	Mina nueva	Mina en operación
	de corto plazo. ♦ Mineralogía. ♦ Comparación de lugares.	♦ Muestreo de campo. ♦ Pruebas estáticas en diversas sub – unidades de áreas de trabajo.
Drenaje	♦ Pruebas cinéticas. ♦ Análisis de agua subterránea.	♦ Monitoreo regular. ♦ Búsqueda de filtraciones. ♦ Pruebas cinéticas. ♦ Extracción de lixiviados.
Fuente: EPA 1994		

V. GEOLOGÍA Y FORMACIÓN DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA (DAM)

1. Mineralizaciones susceptibles de generar DAM

Dado que el drenaje ácido también puede originarse como producto de procesos naturales, se considera importante presentar cuáles son aquellas formaciones geológicas naturales que pueden generarlo al momento de quedar expuestas a los efectos de la intemperie o también por acciones humanas.

Cuando de forma natural aparece la generación de drenaje ácido de roca, las investigaciones en superficie y de poca profundidad, apuntan a la presencia de mineralizaciones, generalmente de tipo gossan.

Con el nombre de gossan, se denominan los afloramientos de rocas, que originalmente contenían sulfuros y que han sido sometidas a un proceso de alteración supergénica. La característica más llamativa de los gossan es su aspecto de colores rojizos, como consecuencia de la transformación de los sulfuros originales, principalmente los ricos en hierro, en compuestos oxidados. Los gossan son el resultado de la alteración física y química de las rocas como consecuencia de la acción de los agentes como la lluvia, el viento, la acción solar o las aguas subterráneas. Estos procesos producen la alteración de los sulfuros, disolución y precipitación de otros minerales y una lixiviación importante en las rocas.

Históricamente, los gossan debido al contraste de sus colores, han servido como guía de exploración de diferentes mineralizaciones. En épocas romanas, el objetivo eran las concentraciones de metales preciosos como oro y plata en los niveles más profundos de las zonas oxidadas. En la minería moderna, la presencia de los gossans ha sido la guía más importante para el descubrimiento de concentraciones de sulfuros metálicos

En la actualidad, una parte importante de los estudios sobre los gossans están encaminados a prever las consecuencias para el medio ambiente de estos procesos físico-químicos debido al medio ácido que se origina por la alteración de las rocas. Estos procesos naturales son los mismos que los que se producen como consecuencia de la acción humana de las explotaciones mineras.

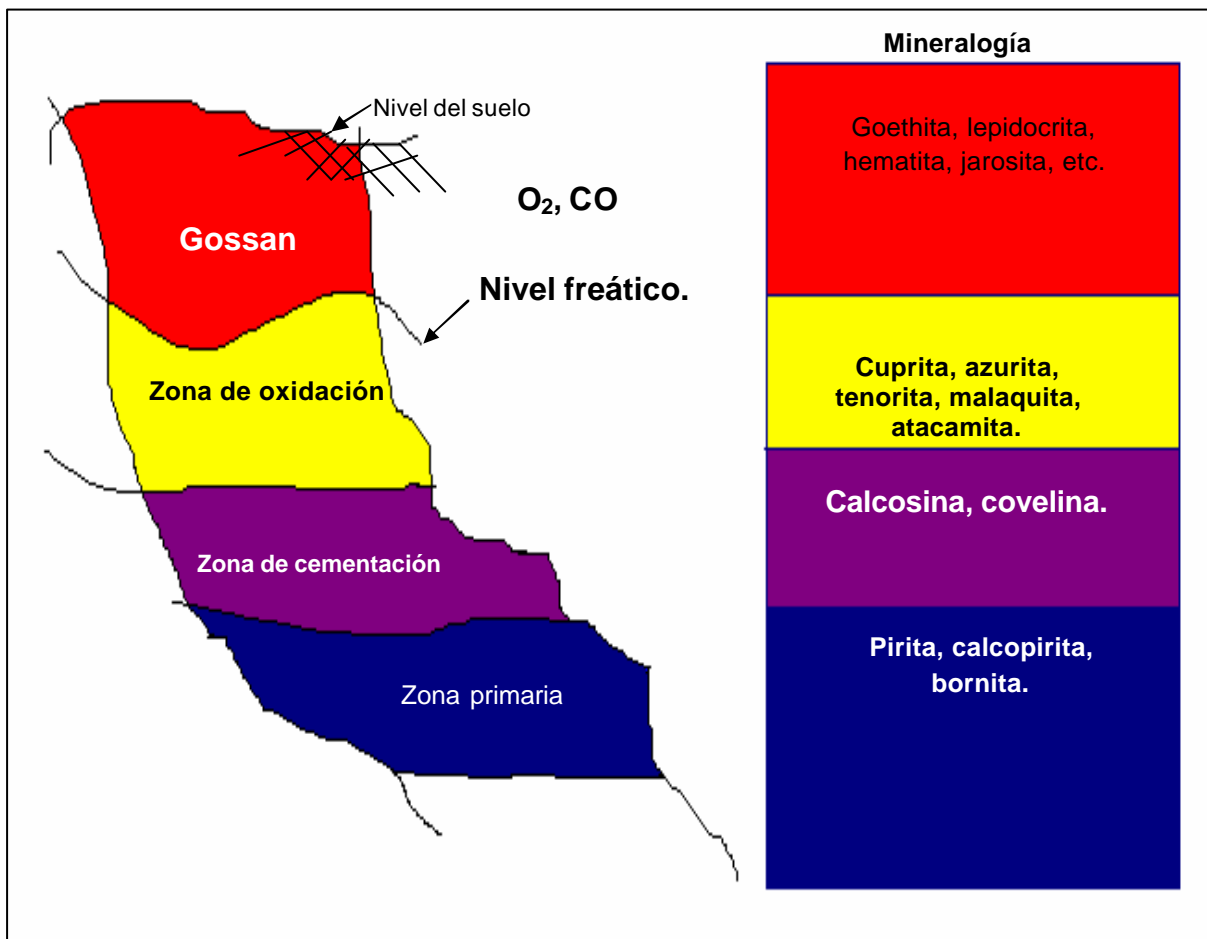
Como se indicó anteriormente la formación de un gossan depende de distintos factores, como la paragénesis original de sulfuros, clima, relieve, tipo de roca encajante, nivel freático, etc. Todos estos factores son determinantes en la formación y características de cada gossan. No obstante, se puede establecer un perfil mas o menos común desde la superficie hasta las zonas profundas en las que no hay alteración (figura 4).

- ◆ **Zona primaria**, que corresponde a los sulfuros inalterados.
- ◆ **Zona de cementación**, que es la situada por debajo del nivel freático, en la que se producen enriquecimientos en sulfuros de cobre de tipo calcosina – covellina.
- ◆ **Zona de oxidación**, comprendida entre el nivel freático y la superficie, y caracterizada por un muy importante enriquecimiento en óxidos e hidróxidos de hierro. Se puede considerar subdividida en dos subzonas: la situada por debajo de la superficie, en la que aún podemos tener otros compuestos metálicos oxidados, como sulfatos, cloruros, y la zona superficial o de gossan propiamente dicho, formada por una acumulación masiva de hidróxidos de hierro. En conjunto, por tanto, se caracteriza por un importante enriquecimiento en hidróxidos de hierro tipo goethita, lavado de Zn y Cu fundamentalmente y por la concentración diferencial del oro y la plata que, además pasan de estar como impurezas en las redes cristalinas de los sulfuros, a estar como elementos nativos lo que favorece su explotabilidad.

La formación de un gossan implica la alteración de los sulfuros, lo que a su vez implica que el azufre de éstos pasa a forma de sulfatos solubles, que se liberan en el medio ambiente produciendo fenómenos de acidificación de aguas similares a los que se producen cuando se liberan en la superficie del

terreno sulfuros durante la minería. Otra cuestión a considerar es que este proceso de alteración implica la liberación de aniones sulfato al medio ambiente lo que producen una importante acidificación de las aguas procedentes de áreas en las que existen este tipo de yacimientos. Además, a menudo esta agua contiene proporciones variables de metales pesados, que pueden quedar dispersos también en el medio, produciendo algunos de ellos efectos tóxicos para los seres vivos. La minería favorece aún más este proceso exponiendo a la intemperie una mayor proporción de sulfuros inalterados.

Figura 4. Esquema de la zonación en la alteración supergénica de un yacimiento de sulfuros.



Fuente: López 2006

Los depósitos minerales de interés económico como la bauxita (mineral de aluminio), lateritas (mineral de níquel) y zonas de oxidación que pueden contener depósitos de cobre, oro y plata son productores naturales de

generación de drenaje ácido de roca desarrollados en tiempos geológicos (Mills 1995).

Los minerales sulfurosos más comunes, considerados como fuente de DAM, son los minerales de hierro, en forma especial, la pirita (FeS_2), pirrotita ($\text{Fe}(1-x)\text{S}_x$) y marcasita (dimorfo de la pirita, FeS_2). Depende de la forma y de la estructura cristalina del mineral y cómo éste se presenta en el yacimiento, se observarán diferentes velocidades de oxidación. Por lo general, la marcasita, pirrotita y la pirita framboidal se oxidarán más rápidamente. Los cristales minerales con una superficie menor, como la pirita "euhedral" de grano grueso, se oxidan más lentamente.

2. Minerales que actúan como neutralizadores del DAM

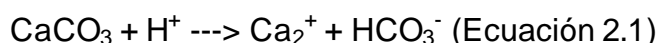
Después de la oxidación de un mineral sulfuroso, los productos ácidos resultantes pueden:

- ◆ Ser inmediatamente arrastrados por la infiltración de agua; o
- ◆ Extraídos de la solución, como resultado de la reacción con un mineral que consuma ácido.

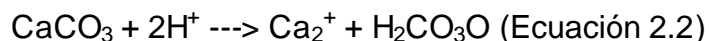
Existe una serie de minerales que pueden consumir acidez y neutralizar el drenaje ácido. Entre los minerales que consumen ácido se encuentran:

- ◆ Carbonatos (calcita)
- ◆ Hidróxidos (limonita)
- ◆ Silicatos (clorita)
- ◆ Arcillas

El mineral más común que consume ácido es la calcita (CaCO_3), que lo realiza acidez a través de la formación de bicarbonato (HCO_3^-) o ácido carbónico ($\text{H}_2\text{CO}_3\text{O}$):



Carbonato de calcio + Ácido → Calcio + bicarbonato



Carbonato de calcio + Ácido → Calcio + Ácido carbónico

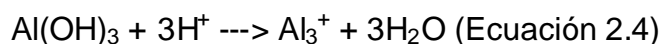
La calcita es el mineral carbonatado más reactivo de los minerales consumidores de ácido y, a diferencia de la mayoría de éstos, tiende a ser más soluble a temperaturas más bajas. La liberación de bicarbonato y carbonato a través de la disolución de la calcita puede resultar en la formación de minerales carbonatados secundarios, como la siderita (FeCO_3), mediante:



Hierro ferroso + Carbonato → Siderita (carbonato ferroso)

Este mineral también puede estar presente como mineral principal en la roca. Es menos soluble que la calcita, tendiendo a amortiguar el pH en el rango de 4.5 a 6.0. La calcita tiende a neutralizar soluciones llevándolas hasta un pH entre 6.0 y 8.0.

Los siguientes minerales que proporcionan alcalinidad, luego del consumo de los minerales carbonatados, generalmente son los hidróxidos, los cuales consumen acidez mediante la formación de un ión libre más agua, como se muestra en la ecuación 2.4. Por ejemplo, para $\text{Al}(\text{OH})_3$:



Hidróxido de aluminio + Ácido → Aluminio + agua

La mayoría de rocas contendrán tanto minerales sulfurosos como minerales consumidores de ácido. La relativa cantidad y la reactividad de los dos tipos determinarán si la roca producirá finalmente condiciones ácidas en el agua que pasa sobre y a través de ella.

Las reacciones de neutralización eliminarán una porción de la acidez y el hierro de la solución elevando el pH. Donde hay suficiente tiempo de

contacto con los minerales consumidores de ácido puede ocurrir la neutralización hacia un pH de 7. Bajo condiciones de pH neutro, la mayoría de metales presenta baja solubilidad y precipitan de la solución en forma de hidróxidos u óxidos metálicos. Sin embargo, algunos metales como el zinc, arsénico y molibdeno, son tan solubles -o más solubles- bajo condiciones alcalinas que bajo condiciones ácidas. Los iones de sulfato también son químicamente estables en un amplio rango de pH. En consecuencia, las concentraciones de sulfato algunas veces pueden servir como indicador general de la magnitud de la generación de ácido incluso después de que la neutralización se ha producido.

Los agentes de neutralización más comunes son:

- ◆ Caliza y/o calcita (CaCO_3)
- ◆ cal viva (CaO)
- ◆ cal hidratada (Ca(OH)_2)

La primera y, tal vez la segunda etapa de una planta de tratamiento actualmente consiste en la neutralización de la cal en tanques de agitación.

Se pueden utilizar otras bases en una segunda o tercera etapa para el tratamiento de metales objeto de preocupaciones seleccionadas que no se extraen con la cal. Entre ellos:

- ◆ soda cáustica
- ◆ ceniza de soda (carbonato de sodio)
- ◆ hidrosulfuro de sodio
- ◆ otros desechos con exceso de alcalinidad, incluyendo ceniza fina o relaves de molino

VI. MANEJO Y CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA DAM

El término "control" se utiliza para hacer referencia a las medidas tomadas para prevenir o limitar la generación o migración de drenaje contaminado que podría originar un impacto ambiental adverso (Gobierno de Chile 2002). Este control es complejo, ya que no existe una receta única para la gestión del drenaje ácido de mina que está en función de costos, grado de avance y condiciones imperantes en la zona.

Se pueden distinguir tres tipos de control; por un lado el llamado control primario, que se da antes de que se genere el drenaje ácido. El control secundario y terciario se usa cuando el DAM se ha generado. El primer paso en la gestión del drenaje ácido de mina es la prevención de la generación y migración del mismo.

1. Control primario: reacciones de oxidación

Esta medida tiende a evitar que se genere el drenaje ácido controlando la interacción roca – aire, y así limitar las reacciones de oxidación de los minerales que contienen sulfuro. Se busca limitar principalmente el oxígeno, de esta forma los controles secundario y terciario se evitan. A continuación se listan diferentes tecnologías de control primario.

1.1 Cubiertas y sellos. Entre los propósitos con los cuales se han utilizado las cubiertas y sellos se tienen:

- ◆ Controlar el flujo de oxígeno (generalmente no es suficiente para evitar la oxidación).
- ◆ Controlar la migración mediante la reducción de la infiltración.
- ◆ Recuperación
- ◆ Revegetación
- ◆ Control del polvo

Las cubiertas y sellos pueden colocarse en la superficie y lados de un embalse de relaves reactivos o botaderos para restringir el acceso de oxígeno y así inhibir la generación de ácido. Para limitar la entrada de oxígeno la cubierta deberá tener muy baja permeabilidad y no tener agujeros o imperfecciones a través de los cuales pueda ingresar. No se considera una solución práctica excluir el agua, hasta el punto de que no se presente la generación de ácido, excepto en climas muy áridos, dado que las cubiertas y sellos contribuyen a inhibir la subsiguiente migración de contaminantes. Una de las preocupaciones a largo plazo, en relación con la integridad de las cubiertas, está vinculada con la resistencia de la cubierta a las roturas, efectos horadantes de raíces y animales, la erosión y degradación debido al intemperismo y a la acción de las heladas (Guía Ambiental - Gobierno de Chile 2002).

1.2 Eliminación de sulfuros, manejo y aislamiento selectivo de residuos sulfurosos. Lo que se pretende es disminuir el potencial de acidez por medio de la reducción del azufre a sulfuro. Esto requiere el manejo del plan de minado y el conocimiento de las rocas y residuos que se obtendrán, y la capacitación del personal que trabajará en la mina con los potenciales materiales peligrosos.

Este proceso, que puede disminuir el potencial de generación de ácido en las presas de colas, generalmente se aplica separando por flotación la pirita (o mineral sulfurado). Aunque posteriormente ésta deba disponerse de forma adecuada y segura.

Cuando los minerales son de baja ley existe el inconveniente de que geológicamente debe estar bien definida la zona de material sulfuros para que tenga éxito la técnica.

El Gobierno de Chile, en su Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera, recomienda que se consideren los siguientes factores para el aislamiento de residuos:

- ◆ La naturaleza del contacto entre los tipos de roca. La separación es práctica sólo si puede ser realizada en forma limpia: es decir, si la roca benigna segregada está significativamente contaminada con roca reactiva, o hay presencia de inclusiones que no puedan ser separadas. El beneficio de la segregación es limitado.

- ◆ La separación es probablemente mejor aplicada cuando está disponible un sistema de gestión, específicamente una opción de disposición, que prevea o limite substancialmente la roca de generación de drenaje ácido; por ejemplo, disposición bajo agua (ver sección 1.5).

1.3 Mezcla o aditivos básicos. Lo que se pretende es mezclar al menos dos tipos de residuos de roca con potencial de generación con otro material alcalino y buscar de esta forma un balance en el valor del pH, de tal forma que se llegue cerca del valor neutro. De esta forma se limita la reacción química y se previene que la acción bacteriana tenga lugar. Este sistema depende para su éxito de un mezclado minucioso, del movimiento del agua por el sistema, de la naturaleza del contacto de la roca o agua ácida con los aditivos neutralizante o agua, la proporción de material neutro en exceso y el tipo y pureza del aditivo neutralizante (Gobierno de Chile 2002).

Usualmente este tipo de control se utiliza junto con otras estrategias tales como encapsular el mineral y/o cubiertas de suelo.

1.4 Inhibición de las bacterias. Consiste en la utilización de bactericidas para evitar la acción catalítica de las bacterias. Lo que se pretende es que las bacterias conviertan el hierro ferroso en hierro férrico, donde el hierro es el principal oxidante. Esta solución necesita ser parte de un planteamiento integral ya que sus efectos son de corto plazo. Generalmente se utiliza para retardar el efecto de oxidación y disminuir costos en los tratamientos secundario y terciario.

Entre los bactericidas pueden mencionarse: el lauril sulfato de sodio y a nivel teórico el cloruro.

1.5 Cubiertas de agua y descarga sub acuática. Se regula o evita el flujo de oxígeno controlando la oxidación del sulfuro. Estas cubiertas tienen más facilidad en clima templados y se puede lograr mediante la acumulación en un cuerpo de agua existente o generado artificialmente (como una pila de colas), inundando un tajo a cielo abierto o una mina. Para construir las instalaciones de descargas sub acuáticas se recomienda:

- ◆ Mantenimiento de una cubierta de agua (balance hidrológico). Es recomendable una cubierta de agua de al menos 0,5 m de agua permanente.
- ◆ Movimiento de agua. Se deberá considerar efectos, tales como; olas, transporte de hielo, convección y cambios estacionales en los lagos, perturbación de la superficie sólida, etc.
- ◆ Contaminantes solubles. Se deberá considerar el potencial de disolución de contaminantes fácilmente solubles.
- ◆ Impacto ambiental. Se puede evaluar el efecto de la descarga de relaves y rocas de desechos en agua fresca o en ambientes marinos o terrestres.

1.6 Saturación. Consiste en una capa de suelo saturada o una capa superficial saturada con cubierta de cieno. En sí no evita la generación de drenaje ácido, pero puede ayudar a reducir costos si se aplican otras tecnologías.

2. Control secundario: Migración de contaminantes

Este tipo de control se aplica para aquellos lugares donde la generación de drenaje ácido no se pronosticó, y busca evitar que ocurra la interacción agua – roca con la consiguiente movilización de contaminantes.

Esta inmovilización se logra controlando el flujo aguas arriba del agua superficial o subterránea y el control de la infiltración en el área de la mina.

2.1 Reducción de la infiltración. El método más práctico consiste en el uso de sellos secos o de baja permeabilidad. Se han utilizado este tipo controles para los tanques de relaves y pilas de colas; recientemente se utiliza como control de infiltración y para evitar migración de contaminantes. Las cubiertas pueden ser:

- ◆ Cubiertas simples de suelo: conformadas por arcillas, suelo de grano fino.
- ◆ Cubiertas sintéticas: como geomembranas, productos cerámicos y geopolímeros.
- ◆ Cubiertas complejas: formadas por la combinación de distintos materiales.

En general el diseño de este tipo de cubiertas está determinado por la precipitación del área, escorrentía, topografía y costos.

2.2 Desviación del agua superficial. En el largo plazo la correcta selección del sitio a minar es la más efectiva en costos, al evitar canales de drenaje natural. Sin embargo la desviación puede hacerse construyendo bermas y zanjas. El problema con este tipo de manejo es que requiere de mantenimiento periódico. Por otro lado si la mina se halla en la cresta de una montaña puede volverse muy costoso.

2.3 Intercepción del agua subterránea. Este tipo de manejo constituye un reto técnico en el manejo de la generación de drenaje ácido. Se deben realizar estudios para conocer la red hidrológica subterránea a nivel local y regional. Este manejo tiene lugar cuando las labores mineras se encuentran con mantos de agua subterránea, y cobra peligrosidad cuando se abandona el sitio y el nivel del agua se restablece generando la posibilidad del acarreo de contaminantes.

3. Control terciario: recolección y tratamiento de drenaje ácido

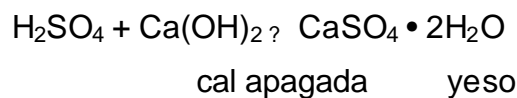
Este tipo de control se da cuando el drenaje ácido ya existe y puede ser enfocado de dos formas: el método de tratamiento químico activo el cual involucra una planta de tratamiento y el respectivo mantenimiento. El otro método se conoce como pasivo y se da por medio “natural” a través de pantanos naturales o construidos.

El proceso inicia con la recolección de los efluentes o lixiviados contaminados. Cuando se manejan flujos subterráneos se requiere una mayor infraestructura que cuando son superficiales; se recalca el hecho de que no existen dos minas iguales por lo que los diseños deben ser específicos.

3.1 Tratamiento activo. Los tres principales tipos de tratamiento activo de drenaje ácido son:

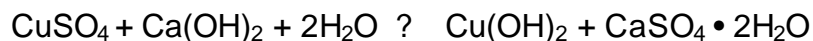
3.1.1 Neutralización química. Es una operación simple y de bajo costo

- ◆ La acidez - por neutralización. Ejemplo:

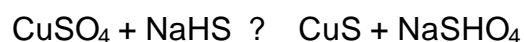


- ◆ Los metales pesados - por hidrólisis y precipitación.

Ejemplo: Precipitación como hidróxido:

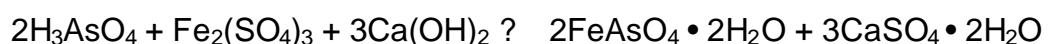


Precipitación como sulfuro:



- ◆ Otros contaminantes como sólidos suspendidos, arseniatos, antimoniato por formación de complejos, seguido de una precipitación.

Ejemplo: Precipitación de aniones con hierro férrico; por ejemplo arsénico



Este proceso deja como resultado lodos que deben ser dispuestos o tratados según convenga (Chile 2002).

3.1.2 Disposición y tratamiento de lodos. Este constituye uno de los aspectos más difíciles. Generalmente los lodos deben disponerse en áreas adecuadas para tal fin, aunque si estos contienen valores que vuelvan atractivo su reprocesamiento para recuperar algún metal, puede considerarse como otra opción. El desecho de este reproceso pueda resultar más ácido que el efluente tratado al inicio; un tratamiento con materiales alcalinos será necesario para los lodos al final.

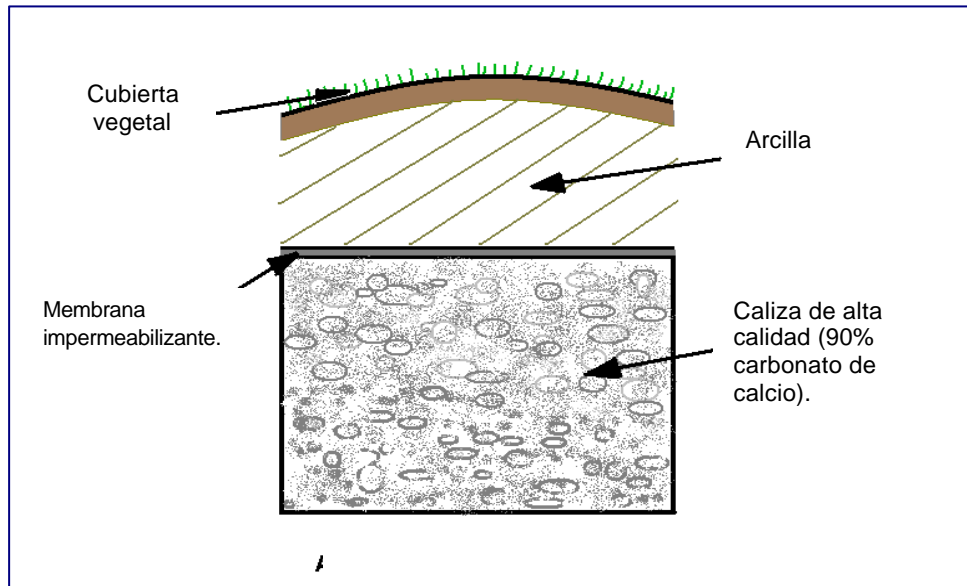
3.2 Tratamiento pasivo. Son sistemas que requieren poco mantenimiento y que se utilizan generalmente al fin de la vida útil de la mina. Se pueden llegar a considerar una alternativa económica, dependiendo de las condiciones que se presentan. Existen varias formas de tratamiento pasivo; se pueden utilizar solas o en sucesión, la decisión varía según el efluente que se tenga.

Básicamente se utilizan calizas y las características propias de los pantanos. Se listan a continuación algunos de ellos.

3.2.1 Canal de caliza anóxico. Es un sistema de pretratamiento que se utiliza cuando el flujo contaminado debe ser transportado por alguna distancia considerable. Se busca que el agua disuelva la caliza y se libere alcalinidad como bicarbonato. Esta alcalinidad se basa en la solubilidad de la calcita contenida en la caliza; en el diseño del canal habrán de considerarse factores como la cantidad de hierro férrico, oxígeno disuelto o aluminio, así como el tiempo de retención dentro del canal.

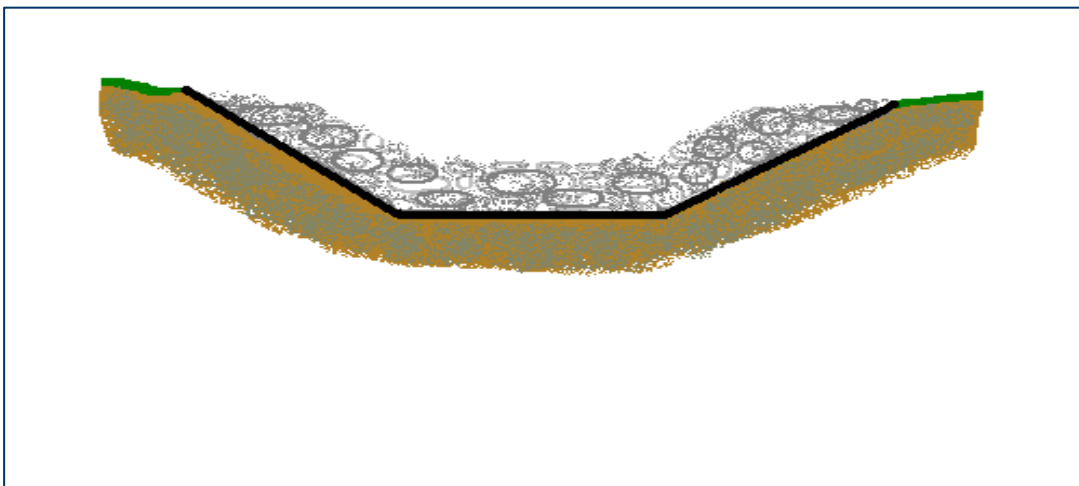
3.2.2 Canales de caliza abiertos. Se pueden construir sobre calizas o colocándolas en fragmentos a lo largo del recorrido de la corriente contaminada. También se espera que se aumente el pH por disolución de la caliza. De ser necesario se utilizan fondos impermeables en el canal para evitar la infiltración.

Figura 5. Sección de un drenaje anóxico de calizas.



Fuente: DEP 2006.

Figura 6. Sección de un canal abierto de calizas.

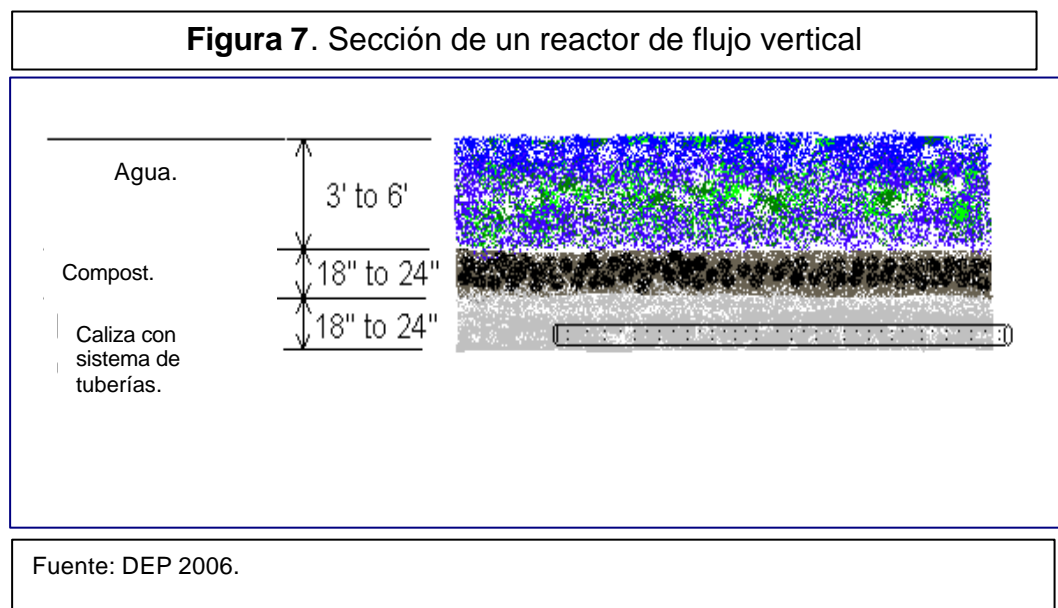


Fuente: DEP 2006.

3.2.3 Sistemas de flujo vertical. Se combina el funcionamiento de pantanos anaeróbicos y canales de caliza. Las bacterias aeróbicas que utilizan compuestos orgánicos biodegradables retiran el oxígeno disuelto y la bacteria reductora de sulfato en la zona anaeróbica de capa orgánica genera

alcalinidad (Gobierno de Chile 2002). El agua fluye verticalmente a través de la capa orgánica y la caliza recolectándose y descargándose por medio de un sistema de tuberías.

En el caso que el agua sea demasiada ácida, se puede tratar por medio de varios sistemas de flujo vertical o combinándoles con canales de caliza y/o pantanos.



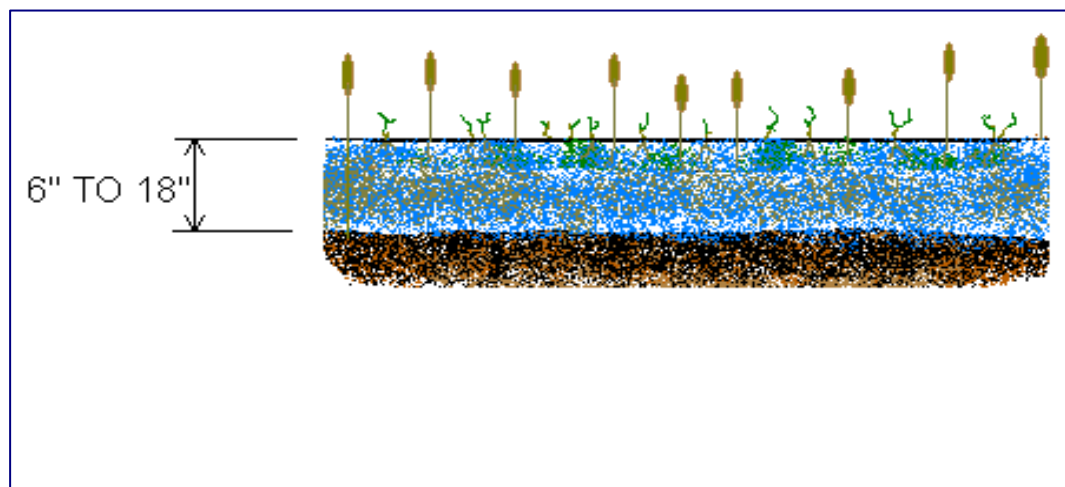
3.2.4 Pantanos e inundaciones. Los pantanos pueden ser naturales o artificiales y por la forma de su funcionamiento aeróbicos y anaeróbicos. Un pantano típico consta de una base con un sustrato que puede ser estiércol de caballo y vaca, heno, turba, compost, viruta de madera y aserrín. La vegetación emergente puede ser cattails o también conocida como espadaña (*Typha latifolia*, *T. angustifolia*, *T. domiguensis*). La espadaña o anea es una planta común en las zonas húmedas; existen una docena de especies repartidas por las zonas templadas y subtropicales del mundo y otras especies de pantano (ver figura 10).

En los pantanos aeróbicos el flujo es superficial y lo que se persigue es aumentar bacteriamente la cinética de la precipitación de hierro férrico para producir hidróxido férrico y neutralizar la acidez a través de la oxidación del

hierro ferroso (Gobierno de Chile 2002). Estos sistemas se parecen mucho a los pantanos naturales (ver figura 8).

Los pantanos anaeróbicos poseen un flujo subsuperficial y son adecuados para el tratamiento de aguas de mina con altos niveles de oxígeno disuelto, hierro férrico (Fe^{+3}), metales (metal^{+2}) y acidez neta. Los metales no se oxidan sino que precipitan (Gobierno de Chile 2002) (ver figura 9).

Figura 8. Sección típica de un pantano aeróbico.



Fuente: DEP 2006.

Figura 9. Espadaña spp.



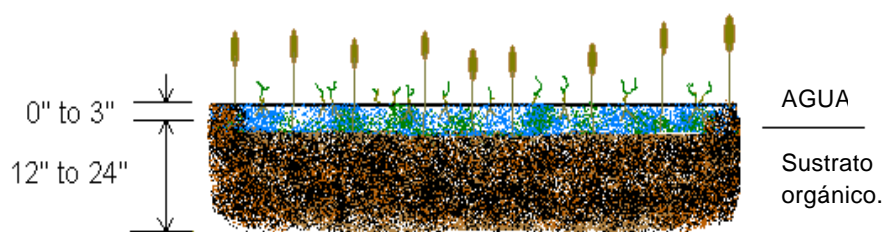
Fuente:
<http://www.vivelanaturaleza.com/botanica/Espadana.ph>

4. Otros tipos de tratamiento

Son también métodos pasivos, y que funcionan básicamente cambiando la acidez del agua utilizando minerales alcalinos. Estos son los conocidos como pozos de desviación y Pyrolusite® Process.

Es de advertir que los sistemas de tratamiento que utilizan humedales, pueden dejar de funcionar cuando el pH es mayor a 3.

Figura 10 Sección típica de un pantano anaeróbico o compost



. Fuente: DEP 2006.

VII. METODOLOGÍA: CASO DE APLICACIÓN.

1. Antecedentes

En todas estas regiones identificadas como de explotación minera, las mineralizaciones se encuentran asociadas al azufre, generador de drenaje ácido de mina; también tienen presencia de calizas, con propiedades neutralizantes sobre el ácido que se pueda generar.

Las zonas que fueron explotadas en tiempos de la Colonia, fueron Chiantla, río Motagua y las riveras del río Las Vacas, para plata y oro. De estos lugares hoy día, solamente en Chiantla (área Torlón) encontramos actividad minera. Sin embargo existen explotaciones mineras en:

- ◆ San Ildefonso Ixtahuacán donde se descubrieron depósitos de antimonio (Sb) y tungsteno (W) a inicios de los 50's, cuenta con su propia planta de concentración por flotación hasta el día de hoy. El molino entró en funcionamiento en 1957 con una producción de 404 toneladas de concentrado de Sb al 60% aproximadamente. Después de cierres y aperturas, a lo largo de todos estos años, aún se encuentra en los registros de la Dirección General de Minería varias licencias a nombre de la empresa Minas de Guatemala S.A., propietaria de la mina y del molino.

- ◆ El área conocida como Torlón es un área con actividad minera histórica y que aún en nuestros días se encuentran en funcionamiento, administrada por una cooperativa local. El proceso de extracción del plomo es artesanal y su tecnología bastante rudimentaria.

- ◆ En la región de Alta Verapaz, a 16 kilómetros de San Pedro Carchá, la entonces llamada Compañía Minera de Guatemala desarrolló la mina llamada Caquipec, entre 1949–1952. En 1952 su planta entró en operaciones con una capacidad de 100 toneladas por día. Los valores típicos son 12% plomo, 30% cinc y 10 oz/ton de plata.

- ◆ La mina Mataquescuintla estuvo activa en los siglos XVIII y XIX y la última noticia que se tiene de su actividad se halla entre los años 1968 a 1970.

Las minas Caquipec y Mataquescuintla se hallan fuera de actividad, pero se incluyen debido a que podrían ser fuentes que generen drenaje ácido al haber sido abandonadas sin un proceso de cierre adecuado.

De todas las áreas presentadas como puntos importantes para llevar a cabo este sondeo, se ha seleccionado la mina ubicada en San Ildefonso Ixtahuacán, con base a las condiciones geológicas y la actividad que ha mostrado.

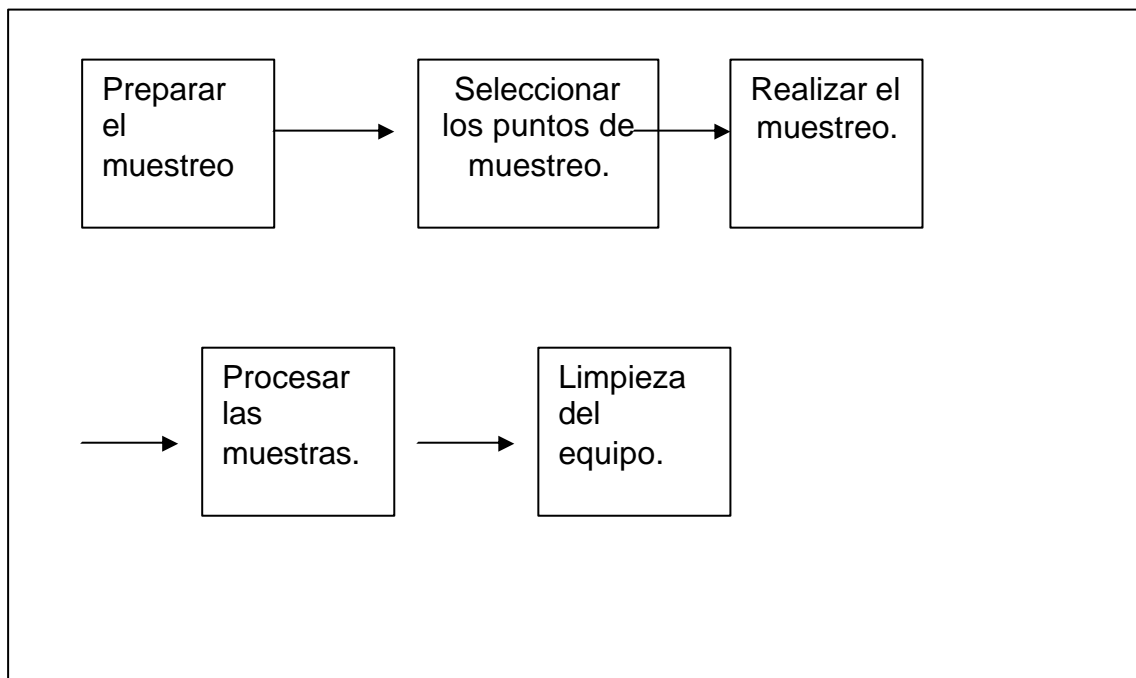
2. Metodología para la toma de muestras

Existen dos tipos generales de muestreo el probabilístico y el no probabilístico. La teoría del muestreo es compleja (Baca 2000), y no es la finalidad de este trabajo desarrollarla, sino que el objetivo es llevar a cabo un sondeo para conocer si existe o no drenaje ácido de mina. Por tanto, se tomarán un número de muestras basadas en la experiencia, siendo éste entre tres y cuatro por punto de muestreo (Oliva 2006); para obtenerlas, se muestreará durante tres días, cada uno de los puntos seleccionados.

Las muestras de sondeo se utilizan cuando se conoce que una fuente es constante en su composición durante un período largo de tiempo o a lo largo de distancias sustanciales en todas direcciones. Puede decirse que una muestra de dicha fuente representará un período de tiempo más largo o un volumen mayor o ambas cosas, con respecto al punto específico en el que fue recogida (Standard Methods 1998); en tal caso la fuente investigada puede ser representada por una simple toma de muestra. La generación de drenaje ácido de mina, es un proceso no intermitente y que una vez generado permanece en el tiempo; por lo tanto, un muestreo de sondeo puede ser el inicio de estudios más detallados, con una mayor duración.

Según el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) pueden llevarse a cabo muestreos que sean representativos del flujo y la concentración en los cuerpos de agua. También pueden realizar muestreos a discreción, lo que se llama muestreo discontinuo (Discrete sampling method) el cual se utiliza cuando la investigación se lleva a cabo como una primera fase a la espera de llevar a cabo posteriores estudios. La metodología propuesta por el USGS, se adecuará a las condiciones que se presentan en nuestro entorno. La figura 11 muestra el diagrama de flujo donde se presenta la secuencia de pasos que lleva un muestreo de sondeo.

Figura 11 Diagrama de flujo para la toma de muestras de sondeo.



Fuente: USGS 2006.

Sin embargo, para muestreos más a detalle debe realizarse el análisis completo del número de muestras requerido de forma probabilística.

La metodología a que se seguirá para llevar a cabo el sondeo se dividirá en fases como se describe a continuación:

2.1 Fase I: Preparación del Plan de Muestreo.

PASO 1

Seleccionar los sitios, bajo los siguientes criterios:

- ◆ Revisión bibliográfica de la geología conocida, y determinar las mineralizaciones y rocas presentes.
- ◆ Revisión de la información catastral de los derechos mineros o minas abandonadas.
- ◆ Revisión de la información disponible de la cuenca.
- ◆ Obtener mapas a escala de los lugares a visitar.

PASO 2

- ◆ Sobre los mapas a escala, plotear las coordenadas de los sitios a visitar.
- ◆ Delimitar los cuerpos de agua y cuenca y/o subcuenca.
- ◆ Preparar el cronograma de muestreo.
- ◆ Calcular el número de muestras a obtener.

PASO 3

Coordinar acciones con el laboratorio, en cuanto a:

- ◆ Fecha de ingreso de muestras.
- ◆ Recipientes, etiquetas y preservante.

PASO 4

Contactar a los propietarios de los sitios para obtener permisos de ingreso.

PASO 5

Coordinar acciones para obtener recursos tales como:

- ◆ Vehículo.
- ◆ Piloto
- ◆ Viáticos
- ◆ Personal de apoyo

PASO 6

Preparar lo necesario para el muestreo con lo siguiente:

- ◆ Recipientes de 500 ml.
- ◆ Preservante de las muestras: ácido nítrico al 50%
- ◆ Hielo
- ◆ Hielera
- ◆ Identificadores de muestras.
- ◆ Equipo para realizar medidas.
- ◆ Mapas
- ◆ GPS
- ◆ Cámara fotográfica.
- ◆ Libreta de campo.
- ◆ Cinta métrica.
- ◆ Gotero.
- ◆ Lazos.
- ◆ Martillo, brújula.
- ◆ Bolsas para muestras de roca, etc.

2.2. Fase II. Preparativos para la campaña de muestreo. Una vez se tengan aprobados por parte de las autoridades respectivas, el cronograma y sitios de muestreo, proceder a:

PASO 1

Requisición del equipo y su verificación en cuanto a:

- ◆ Buen funcionamiento de baterías.
- ◆ Calibración de equipo.
- ◆ Obtener instrucciones para su uso.
- ◆ Obtener libretas de campo y todos los formularios que se necesiten para el efecto.
- ◆ Reservar los recipientes de vidrio o de plástico apropiado para la recolección de muestras. Estos deberán estar limpios.

PASO 2

- ◆ Obtener documentación para trámites administrativos.
- ◆ Nombramientos.
- ◆ Viático constancia.

PASO 3

Preparar las medidas de salud necesarias tales como:

- ◆ Botiquín de primeros auxilios.
- ◆ Repelentes de insectos.
- ◆ Indumentaria adecuada.
- ◆ Abasto de agua para beber.
- ◆ Instrucciones y medidas de protección para el uso de sustancias que se usen como preservantes.

2.3 Fase III. Muestreo. Durante esta fase se llevará a cabo la recopilación de las muestras. Se recomienda contactar un guía del lugar a visitar. El método será de forma manual colocándose en el centro del flujo de agua.

Se necesitan ubicar los puntos más convenientes para el muestreo bajo los criterios siguientes:

- ◆ Presencia o ausencia de flujo superficial en las quebradas.
- ◆ Influencia del área de la mina en las quebradas, ríos, etc.
- ◆ Accesibilidad
- ◆ Disponibilidad de recipientes para muestreo

PASO 1

- ◆ Calibrar los instrumentos de toma de medidas *in situ*.
- ◆ Registrar las coordenadas del punto de muestreo en el GPS, y anotarlas.
- ◆ Marcar el punto de muestreo.
- ◆ Toma de fotografías
- ◆ Toma de notas que pueden ser relevantes en la investigación.

PASO 2

- ◆ Los frascos se colocarán en sentido contrario a la dirección de la corriente, se procurará no tomar sedimentos (esperar unos cinco minutos antes de tomar la muestra para que la perturbación del lecho del río o quebrada pase; pero se procurará tomar las muestras a diferentes alturas de ser posible.
- ◆ Los recipientes deberán llenarse y vaciarse un par de veces antes de la toma definitiva.
- ◆ Una vez hecha, se agregarán de tres (3) a cuatro (4) gotas de ácido nítrico al 50%. Debe verificarse que la muestra quede con un pH ácido.
- ◆ Colocar la muestra tomada en un recipiente (hielera) con hielo.

PASO 3

- ◆ Hacer la descripción geológica del sitio.
- ◆ Tomar las muestras que a juicio del geólogo sean importantes.

PASO 4

Repetir el proceso en cada punto a muestrear. La toma de muestras de roca, sólo se realizará una vez.

3. Descripción de los sitios de estudio

Los lugares fueron seleccionados por las condiciones de mineralización presentes. En todos ellos existe una mineralización asociada al azufre pero también existen formaciones de calizas, que podrían actuar como agentes neutralizantes del drenaje ácido.

A continuación se presenta una breve descripción de la geología conocida por fuentes bibliográficas de la mina escogida: en el área de San Ildefonso Ixtahuacán se descubrieron depósitos de antimonio y tungsteno a inicios de los 50's. La mineralización ocurre como lentes de reemplazamiento en horizontes de calizas fuertemente silicificadas de la formación Santa Rosa. Los minerales metálicos primarios en los cuerpos mineralizados son estibinita

y sheelita. En la parte oeste más alejada, la zona mineralizada de galena y escalerita ocurre con la sheelita. No se reporta presencia de pirita por Roberts e Irving (Roberts 1957), sin embargo se sabe por estudios posteriores de su presencia.

Dentro de este marco geológico se tomó como muestra el área de la licencia minera conocida como Anabella, aunque en realidad son varios los frentes mineros que la rodean.

El área de la licencia “ANABELLA” se ubica geológicamente en el bloque Chorti, bajo la influencia de la zona de falla Cuilco-Chixoy-Polochic y Motagua, la cual se encuentra inmediatamente al sur, dispuesta en forma paralela en la porción occidente de Guatemala.

3.1 Geología superficial. Las principales unidades de roca expuestas en el área de “ANABELLA” y sus alrededores son pizarras, filitas, areniscas, y calizas todas de la formación Tactic y de la edad del Pensilvánico Tardío o Pérmico. Sobre la formación Tactic, yace la formación Chóchal, de edad Pérmica, compuesta por calizas fosilíferas.

La característica estructural dominante del área de “Anabella” es la existencia de fallas inversas formadas a partir de esfuerzos transpresionales a lo largo de la falla regional del Polochic.

3.2 Descripción general. La mineralización que ocurre en la mina de “ANABELLA” está asociada con fallas inversas horizontales, los principales minerales existentes en el depósito son **estibina, arsenopirita aurífera, sheelita, pirita, el cuarzo y la calcita son los principales minerales.** También se pudo identificar la existencia de azufre dentro de uno de los túneles perforados en el área de “Anabella”.

3.3 Geología local. El área de “Anabella” se encuentra localizada en el **Cerro Piedra de Luna** del cual descienden alrededor de Cuatro (4) Quebradas, las cuales por haberse visitado en tiempo de verano estaban secas. En invierno tres de ellas desembocan al río Helado y una en el río Selegua; se pudo definir que en las quebradas las rocas predominantes son calizas y filitas de la formación Tactic.

Figura 13. Caliza de la formación Tactic Quebrada 1, Coordenadas UTM N: 1706907 E: 0631314



Figura 14. Filitas de la formación Tactic Quebrada 2; Coordenadas UTM: N: 1707009 E: 0630715 .



Figura 15 Tercer quebrada, esta no se apreciaba en el mapa, se encuentra en la zona de trabajo actual; se observa la presencia de caliza de la formación Tactic, presenta un porcentaje elevado de mineral antimonio. Coordenadas UTM, N: 1707071 E: 0630221



4. Selección de los puntos de muestreo

Se siguieron los criterios planteados en la metodología y se ubicaron los puntos tentativos de muestreo sobre un mapa a escala 1:50,000. Ya en el área, se llevaron a cabo los caminamientos necesarios para ubicar los puntos óptimos más cercanos a los escogidos en gabinete. Estos debían ser de fácil acceso y poseer un flujo de agua mínimo que permitiera la toma de muestra sin sedimentos. El área seleccionada fue la que se conoce como Anabella, que ha estado inactiva desde hace aproximadamente diez (10) años y dos de sus tres túneles, se encuentran sellados. El tercer túnel (llamado por los mineros como Túnel Inclinado No. 1) aunque la empresa minera lo cerró, fue abierto por los pobladores vecinos del área ya que de allí se abastecen de agua.

El punto número uno, se localizó sobre el río Helado, aguas arriba de la mina Anabella (coordenadas N: 1706416 E: 0629700) a una altura de 1,982 metros sobre el nivel del mar. La litología sobresaliente es la caliza de la formación Tactic la cual esta representada por bloques grandes *in situ*.

El punto de muestreo número dos se localizó también sobre el Río Helado, aguas abajo del área Anabella, en las coordenadas N: 1704767 E: 0631611 y a una altura sobre el nivel del mar de 1,644 metros; se identificaron bloques de caliza alternado con brechas.

El tercer punto se fijó en la quebrada que baja del derecho minero Anabella, en las siguientes coordenadas N: 1708136 E: 0633146. La roca predominante es la caliza esta pertenece a la formación Chóchal ya que es rica en fósiles en los que se pueden identificar macroscópicamente foraminíferos y algunos fragmentos de braquiópodos. En esta parte también se observa la representación de bloques de conglomerados de la formación Chicol del grupo Santo Rosa. A este punto se le identificó como Quebrada que baja de la mina.

El cuarto punto que se seleccionó para muestrear se encontraba en las coordenadas N: 1709522 E: 0631354. Geomorfológicamente se define como

Figura 16. Punto de muestreo número 1, N: 1706416 E: 0629700 Río Helado, Roca Caliza de la Formación Tactic predominante en este punto.



Figura 17. Punto de muestreo número 2, N:1704767 E:0631611 Bloques de caliza de la Formación Tactic encontrados en el río Helado.



Figura 18. Punto de muestreo 3. N: 170813136 E: 0633146 Caliza Fosilífera de la formación Chochal.



un cañón; la roca predominante es la caliza y se presenta en estructuras columnares. Dadas las rápidas velocidades del agua en este punto, y la dificultad de llegar al punto escogido, se omitió muestrearlo. La figura 20, muestra una panorámica del cuarto punto de muestreo sobre el Río Selegua.

Figura 19 Calizas fosilíferas en el río Selegua en las coordenadas N: 170813120 E: 0633142 Conglomerados de la formación Chicol, lugar en donde la quebrada intersecta al río.



Figura 20 Caliza de la Formación Tactic Estructuras Columnares. En la Geomorfología se define un Cañón.



Figura 21. Túnel de Anabella, donde se tomó muestra de agua, coordenadas N: 1706931 E: 0631922. Roca caliza con vetas de cuarzo Mineralizada dentro del túnel.



Figura 22 Se observan impregnaciones de Azufre dentro del túnel perforado en el área de “Anabella”.



Las coordenadas de un túnel perforado en el área de “Anabella” son N: 1706931 E 0631922 el cual se

encuentra a 1,946 metros sobre el nivel del mar. Las paredes están constituidas de roca caliza con betas de cuarzo mineralizadas y con impregnaciones de azufre en algunas partes.

5. Datos obtenidos en campo

Los datos que a continuación se muestran, se obtuvieron en los puntos seleccionados bajo los criterios ya mencionados. El túnel no se muestreó sino hasta en el último día debido a que se creía que el huracán Stan había bloqueado el acceso al área de túneles. Sin embargo el tercer día de muestreo se logró el permiso para entrar.

Tabla No. 5. Lecturas obtenidas in situ, en los puntos de muestreo seleccionados, y los resultados obtenidos en laboratorio.				
	Río Helado aguas arriba de Anabella.	Río Helado aguas debajo de Anabella.	Quebrada que baja de Anabella.	Túnel Inclinado No. 1, Anabella.
Fecha	14 de marzo de 2006.			
Hora	11:20	13:30	15:00	
Temperatura (°C)	18.7	27.6	19.4	
Conductividad (µs)	450 - 477	345	430	
Salinidad (‰)	0.2	0.2	0.2	
Total de sólidos disueltos (mg/lit)	229 – 228	164	206	
pH	7.9	8.7	8.2	
Altura en metros sobre el nivel del mar	1982	1644		
Fecha	15 de marzo de 2006.			
Hora	10:40	12:08	15:36	
Temperatura (°C)	17.9	25	19.4	
Conductividad (µs)	474	376	429	

Tabla No. 5. Lecturas obtenidas in situ, en los puntos de muestreo seleccionados, y los resultados obtenidos en laboratorio.				
	Río Helado aguas arriba de Anabella.	Río Helado aguas debajo de Anabella.	Quebrada que baja de Anabella.	Túnel Inclinado No. 1, Anabella.
Salinidad (%)	0.2	0.2	0.2	
Total de sólidos disueltos (mg/lit)	227	178	204	
pH	8.1	8.9	8.4	
Altura en metros sobre el nivel del mar	1982	1644		
Fecha	16 de marzo 2006.			
Hora	9:31	12:36	13:18	11:02
Temperatura (°C)	19.2	25.4	19.3	19.4
Conductividad (µs)	470	380	433	375
Salinidad (%)	0.2	0.2	0.2	0.4
Total de sólidos disueltos (mg/lit)	228	181	207	389
pH	8.5	8.8	8.4	7.4
Altura en metros sobre el nivel del mar	1982	1644		1946
Resultados de laboratorio (ppm ó mg/lit)	Pb = 0.03 – 0.04 Zn = 0.02 y 0.05 Fe = 0.02	Pb = 0.03 – 0.05 Zn = 0.01	Pb = 0.01 – 0.02 Zn = 0.01	Pb = 0.01 Zn = 0.01 Fe = 0.08
Fuente: Elaboración propia.				

El equipo utilizado en campo fue un potenciómetro marca Orion, modelo 106. Los demás datos se tomaron con un aparato marca Termo Orion modelo 115A Plus, propiedad de la Unidad de Control Ambiental del Ministerio de Energía y Minas. Los reactivos para la calibración fueron proporcionados por el Laboratorio de dicho Ministerio.

6. Análisis de resultados

Se conoce por la bibliografía existente que la mineralización presente en el área minera de Anabella consiste en scheelita y estibinita con granos de pirita (Collins 1969); también se conoce la presencia de roca caliza debida a la presencia de la formación Tactic. En esta área existen minerales con potencial de generación de drenaje ácido, pero también con potencial neutralizante; a esto se debe agregar que los ríos generalmente presentan valores de pH entre 6 y 9 (Kiely 1999).

En cuanto a la presencia de plomo, los valores que se registran son bajos; estos valores pueden provenir de la presencia de mineralizaciones de plomo en la zona. Según la EPA, la cantidad de plomo en el agua potable debe ser cero, los flujos de agua que se midieron, pueden en algún momento servir como fuente de agua para consumo humano. Los estándares de la EPA, también colocan valores de 0.3 mg/lit para hierro (Fe) y de 5 mg/lit para zinc (Zn), por lo que los valores encontrados se consideran aceptables.

Para el caso de sólidos disueltos, la EPA considera aceptable 500 mg/lit para agua potable, en este caso los valores registrados fueron entre 164 a 389 mg/lit, los cuales se encuentran por debajo de este límite.

La conductividad es una indicación de la concentración de sales inorgánicas disueltas. Se tiene que para ríos analizados los valores de conductividad oscilan entre 100 – 1,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; para el caso de las medidas tomadas en campo, se obtuvieron valores entre este rango. Según la Directiva del Agua Potable de la Unión Europea, el límite superior aceptable para la conductividad en agua potable es de 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Kiely 1999).

Según muestran los resultados obtenidos en los análisis de agua (ver anexo 1) los valores de elementos encontrados, expresados en miligramos por litro fueron de plomo, zinc y hierro, siendo el mayor valor para plomo encontrado aguas abajo en el Río Helado. La presencia de estos elementos puede explicarse como natural, debido a la geología existente en la zona,

pues se conoce la presencia de minerales como la galena (sulfuro de plomo) y esfalerita, éste último mineral puede contener un 67% de zinc y 33% de azufre, el contenido de hierro por sustitución del zinc, puede llegar a 36.5% (Universidad Politécnica de Madrid 2006). Estos minerales se encuentran en la zona que rodea el área minera, aunque en el área propia de la mina no aparezcan como las mineralizaciones principales. Como ya se mencionó anteriormente los valores de pH del agua, mostraron ser básicos y no ácidos, debido a la fuerte presencia de calizas en los alrededores, haciendo las veces de canales de caliza naturales, por lo que se cree no hay presencia de drenaje ácido, aun cuando existen mineralizaciones asociadas al azufre en la región.

VIII. CONCLUSIONES

Realizar una campaña de muestreo implica un trabajo previo de gabinete que incluirá el documentarse acerca de la información disponible del lugar que se piensa visitar, definir claramente lo que se pretende realizar y los medios con que se cuenta para llevar a cabo el trabajo. Las personas que llevarán a cabo el muestreo deben ser advertidas sobre medidas de seguridad en el manejo de reactivos para calibración de aparatos y preservantes de las muestras.

Es importante que la Dirección General de Minería, lleve a cabo un monitoreo periódico de aquellos lugares que se identifiquen como potenciales generadores de drenaje ácido.

En cuanto al proceso de muestreo, se concluye que es importante contar no sólo con los insumos adecuados (frascos, hielera, reactivos, etc), sino que el laboratorio donde se analizarán juega un papel importante al momento de orientar al investigador en el proceso, en cuanto a los tipos de análisis que pueden llevarse a cabo, las cantidades de muestra requeridas y las condiciones que sus protocolos requieren. Por otro lado, al ser la minería un tema sensible en la población guatemalteca, es importante tomar las medidas de seguridad necesarias con el fin de resguardar la integridad física de las personas que lleven a cabo el muestreo; es recomendable hacerse acompañar de personas conocidas por las comunidades que se ubican en las cercanías de los puntos a muestrear.

Por ser este sondeo el primero que se llevaba a cabo, uno de los puntos de muestreo seleccionado que se ubicó en gabinete, fue un punto de difícil acceso, por lo que al estar en el campo debió de eliminarse. Esto se debió a la falta de experiencia en planificar este tipo de trabajo; otro aspecto que se consideró muy a la ligera fue el tiempo de viaje, por lo que en futuras giras de campo, es necesario considerar la distancia y accesibilidad entre

puntos, para determinar el número de personas necesario para realizar el muestreo.

En el caso de la mina Anabella se concluye que la presencia de calizas en las quebradas y ríos que la circundan forman una especie de canal de calizas natural, que hasta el momento no ha permitido la generación de un drenaje ácido.

La presencia de elementos como Pb (plomo), zinc (Zn) y hierro (Fe), pueden deberse a las mineralizaciones presentes en la zona, y se encuentran en cantidades por debajo de los estándares de la EPA, excepto el caso del plomo. Esto tiene implicaciones sobre la salud humana, dado que del río Helado, aguas arriba de la mina, tiene captaciones de agua para distribuirla como potable; será importante darle un seguimiento que involucre un estudio de las concentraciones de plomo en las personas que son abastecidas con el agua de este lugar.

IX.RECOMENDACIÓN

Se recomienda a la empresa propietaria del derecho minero, así como de los derechos vecinos que realice un estudio que establezca de forma predictiva el potencial de generación de drenaje ácido en este lugar.

X. BIBLIOGRAFÍA.



Libros y documentos:

Collins Earl M.; Kessler Stephen E. 1969. *High Temperature Telescoped Tungsten – Antimony Mineralization, Guatemala*. Mineral Deposits:65-70.

Kiely Gerard. 1999. *Ingeniería Ambiental: Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Coordinación de traducción y revisión técnica José Miguel Veza. Colombia, McGraw Hill.

Chile. 2002. Ministerio de Minería. Consejo Minero, Subsecretaría de Economía & Consejo Nacional de Producción más Limpia. *Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera*. Acuerdo Marco Producción Limpia Sector Gran Minería Buenas Prácticas y Gestión Ambiental.

Baca Urbina, Gabriel. 2000. *Evaluación de Proyectos*, 4^a. Edición. Impresión y edición: México, McGraw Hill.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1998. American Public Health Association, American Water Works Association, Water environmental Federation. 20th Edition.

Metal Mining In Guatemala: Study of Old Mines and Abandoned Prospects.1971. United Nations Development Programme.

Informe del estudio sobre la exploración minera en las áreas de Chiquimula, Mataquescuintla y Llano del Coyote de la República de Guatemala. 1982. Japan International Cooperation Agency, Metal Mining Agency of Japan.

Roberts Ralph J., Irving Earl M. 1957. *Mineral Deposits of Central America*. Geological Survey Bulletin 1034. Boletín International Cooperation Administration, U.S. Department of State.



Bases de datos:

Base de Datos Catastral, 2006. Departamento de Derechos Mineros, Ministerio de Energía y Minas.



Entrevistas:

Oliva, Besi. Departamento de Análisis. Facultad de Farmacia, Universidad de San Carlos. Entrevista realizada el día 9 de marzo de 2006.



Páginas de Internet:

Microbial Influence. 2005. Colorado School of Mines. Department of Chemistry and Geochesmitry. Disponible en http://www.mines.edu/fs_home/jhoran/ch126/index.htm

Reclamation the Science of Acid Mine Drainage and Passive Treatment. 2006. Department of Environmental Protection. Bureau of Abandoned Mine. Disponible en: http://www.dep.state.pa.us/dep/deputate/minres/bamr/amd/science_of_AMD.htm

Higueras Pablo; Oyarzun Roberto. *Minería e hidrósfera*. UNIVERSIDAD DE CASTILLA – LA MANCHA.. Curso de Minería y Medio Ambiente. 2006. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/mam/InicioMAM.htm>

López García, J.A. *Gossans*. 2006. Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Universidad Complutense, Facultad de Ciencias Geológicas. Disponible en: http://www.ucm.es/info/crismine/Programa_%20Minas.htm

Higueras Higuera Pablo; Oyarzun Muñoz Roberto, Et al. 2006. *Yacimientos minerales, productos de la meteorización*. Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad Complutense de Madrid. Disponible en: <http://www.uclm.es/users/higueras/yymm/IndiceYM.html#origen>

Radtke, Jacob Gibbs; R.T. Iwatsubo. 2006. Edited by F.D. Wilde, D.B. USGS. *Handbooks for Water-Resources Investigations National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data Chapter A4*. Collection of Water Samples. Disponible en: <http://water.usgs.gov/owq/FieldManual/chapter4/pdf/chapter4.pdf>

Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de educación a distancia, Facultad de Ciencias. 2006. *Esfalerita*. Disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/fichas/esfalerita/esfalerita.htm>




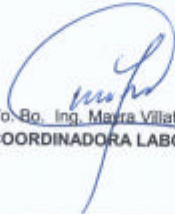

Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de educación a distancia, Facultad de Ciencias. 2006. *Marcasita*. Disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/fichas/marcasita/marcasita.htm>



Universidad Politécnica de Madrid, Universidad de educación a distancia, Facultad de Ciencias. 2006. *Pirita*. Disponible en: <http://www.uned.es/cristamine/fichas/pirita/pirita.htm>

Huerta Díaz, Miguel A. 2006. Instituto de Investigaciones Oceanológicas Universidad Autónoma de Baja California, División de Geoquímica Ambiental. *Capítulo 6: Sulfuros De Hierro*. Disponible en:

http://iio.ens.uabc.mx/Curso%20Internet%20Miguel%20Angel/6_Sulfuros_de_Fe/Sulfuros_de_Fe.htm

ANEXO 1

<p align="center">LABORATORIO TÉCNICO</p>	 <p align="center">MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA</p>	<p>PAGINA 1 DE (1) MEM</p> <p>LAB-REP- 311-06</p> <p>ORDEN No. L-115-06</p> <p>Guatemala, 29-03-06</p>																														
RESULTADOS DE ANÁLISIS																																
<p>MUESTRA: Río Helado (aguas arriba) PRESENTADA POR: Desarrollo Minero RESPONSABLE DEL MUESTREO: Marleny Reyes PROCEDENCIA: San Ildefonso Ixtahuacán LOCALIZACION: Huehuetenango FECHA DE MUESTREO: 14-16 de marzo del 2006 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 17-03-06 FECHA DE ANALISIS: 24-03-06 PRECIO DE ANALISIS: \$ 108.00 ANALISTAS: Gutiérrez y Rosales</p>																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>TECNICA</th> <th>RESULTADOS (1)</th> <th>RESULTADOS (2)</th> <th>RESULTADOS (3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plomo en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.04</td> <td>0.03</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>Zinc en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.05</td> <td>0.02</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Hierro en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.02</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Cromo en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Cadmio en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> </tbody> </table>			DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)	Plomo en ppm	E. A. A.	0.04	0.03	0.03	Zinc en ppm	E. A. A.	0.05	0.02	No detectable	Hierro en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	No detectable	Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable	Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)																												
Plomo en ppm	E. A. A.	0.04	0.03	0.03																												
Zinc en ppm	E. A. A.	0.05	0.02	No detectable																												
Hierro en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	No detectable																												
Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable																												
Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable																												
<p>Notas: E. A. A.: Espectrometría de absorción atómica. Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio. ppm: Partes por millón Las muestras no se acidificaron lo suficiente después de tomadas. (1), (2) y (3): Lugares donde se tomaron las muestras.</p>																																
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  <p>Ing. Byron Rosales SECCION DE MINERALES</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">  <p>Vo. Bo. Ing. Maíra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS</p> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>																																
<p>El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.</p>																																
<p align="center">PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2476-8506. Diagonal 17, 29-78, zona 11. Las Charcas, Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt</p>																																

<p align="center">LABORATORIO TÉCNICO</p>	 <p align="center">MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DE GUATEMALA</p>	<p>PAGINA 1 DE (1) MEM</p> <p>LAB-REP- 311-06</p> <p>ORDEN No. L-115-06</p> <p>Guatemala, 29-03-06</p>																														
<p align="center">RESULTADOS DE ANÁLISIS</p>																																
<p>MUESTRA: Río Helado (aguas arriba) PRESENTADA POR: Desarrollo Minero RESPONSABLE DEL MUESTREO: Marleny Reyes PROCEDENCIA: San Ildefonso Ixtahuacán LOCALIZACION: Huehuetenango FECHA DE MUESTREO: 14-16 de marzo del 2006 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 17-03-06 FECHA DE ANALISIS: 24-03-06 PRECIO DE ANALISIS: \$ 108.00 ANALISTAS: Gutiérrez y Rosales</p>																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>DESCRIPCION</th> <th>TECNICA</th> <th>RESULTADOS (1)</th> <th>RESULTADOS (2)</th> <th>RESULTADOS (3)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Plomo en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.04</td> <td>0.03</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>Zinc en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.05</td> <td>0.02</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Hierro en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>0.02</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Cromo en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> <tr> <td>Cadmio en ppm</td> <td>E. A. A.</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> <td>No detectable</td> </tr> </tbody> </table>			DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)	Plomo en ppm	E. A. A.	0.04	0.03	0.03	Zinc en ppm	E. A. A.	0.05	0.02	No detectable	Hierro en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	No detectable	Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable	Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
DESCRIPCION	TECNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)																												
Plomo en ppm	E. A. A.	0.04	0.03	0.03																												
Zinc en ppm	E. A. A.	0.05	0.02	No detectable																												
Hierro en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	No detectable																												
Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable																												
Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable																												
<p>Notas: E. A. A.: Espectrometría de absorción atómica. Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio. ppm: Partes por millón Las muestras no se acidificaron lo suficiente después de tomadas. (1), (2) y (3): Lugares donde se tomaron las muestras.</p>																																
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Ing. Byron Rosales SECCION DE MINERALES </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  Vo. Bo. Ing. Maíra Villatoro COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>																																
<p align="center">El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.</p>																																
<p align="center">PBX (502) 2 477-0382 y (502) 2 476-0680 Fax (502) 2476-8506. Diagonal 17, 29-78, zona 11. Las Charcas, Guatemala, C. A. www.mem.gob.gt</p>																																

**LABORATORIO
TÉCNICO**

 MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS
 REPUBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

MEM

LAB-REP- 313-06

ORDEN No. L-115-06

Guatemala, 29-03-06

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: Quebrada
 PRESENTADA POR: Desarrollo Minero
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Marleny Reyes
 PROCEDENCIA: San Ildefonso Ixtahuacán
 LOCALIZACION: Huehuetenango
 FECHA DE MUESTREO: 14-16 de marzo del 2006
 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 17-03-06
 FECHA DE ANALISIS: 24-03-06
 PRECIO DE ANALISIS: \$ 106.00
 ANALISTAS: Gutiérrez y Rosales

DESCRIPCION	TÉCNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)
Plomo en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	0.01
Zinc en ppm	E. A. A.	0.01	No detectable	No detectable
Hierro en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable

Notas: E. A. A.: Espectrometría de absorción atómica.
 Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ppm: Partes por millón
 Las muestras no se acidificaron lo suficiente después de tomadas.
 (1), (2) y (3): Lugares donde se tomaron las muestras.


 Ing. Byron Rosales
 SECCION DE MINERALES




 Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

**LABORATORIO
TÉCNICO**

 MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
 REPÚBLICA DE GUATEMALA

PAGINA 1 DE (1)

MEM

LAB-REP- 313-06

ORDEN No. L-115-06

Guatemala, 29-03-06

RESULTADOS DE ANÁLISIS

MUESTRA: Quebrada
 PRESENTADA POR: Desarrollo Minero
 RESPONSABLE DEL MUESTREO: Marleny Reyes
 PROCEDENCIA: San Ildefonso Ixtahuacán
 LOCALIZACIÓN: Huehuetenango
 FECHA DE MUESTREO: 14-16 de marzo del 2006
 FECHA DE RECEPCIÓN DE MUESTRA Y PAPELERÍA: 17-03-06
 FECHA DE ANÁLISIS: 24-03-06
 PRECIO DE ANÁLISIS: \$ 106.00
 ANALISTAS: Gutiérrez y Rosales

DESCRIPCIÓN	TÉCNICA	RESULTADOS (1)	RESULTADOS (2)	RESULTADOS (3)
Plomo en ppm	E. A. A.	0.02	No detectable	0.01
Zinc en ppm	E. A. A.	0.01	No detectable	No detectable
Hierro en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
Cromo en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable
Cadmio en ppm	E. A. A.	No detectable	No detectable	No detectable

Notas: E. A. A.: Espectrometría de absorción atómica.
 Resultados válidos para la cantidad de muestra presentada al laboratorio.
 ppm: Partes por millón
 Las muestras no se acidificaron lo suficiente después de tomadas.
 (1), (2) y (3): Lugares donde se tomaron las muestras.


 Ing. Byron Rosales
 SECCIÓN DE MINERALES




 Vo. Bo. Ing. Mayra Villatoro
 COORDINADORA LABORATORIOS TÉCNICOS



El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin autorización del Laboratorio Técnico.

GLOSARIO

Área minera	Véase mina
Dimorfo	Se dice del cuerpo que puede cristalizar según dos sistemas diferentes. Ejemplo: la marcasita, puede cristalizar como sulfuro de cinc o sulfuro de hierro (pirita).
Drenaje ácido de mina	Procesos de oxidación, que transforman los sulfuros en sulfatos con producción de ácido; estos procesos pueden ser químicos o catalizados por bacterias como Thiobacillus Ferroxidans, T. Thiooxidans, T. Thioparus, etc.
Estéril	Material que no se considera económicamente aprovechable o de interés comercial en una explotación minera. Material que resulta después del procesamiento de las menas.
Galena	Mineral compuesto de azufre y plomo, de color gris y lustre intenso.
Mena	Mineral metalífero de valor económico recuperable tal como se extrae y antes de beneficiarlo.
Mina	Todo yacimiento mineral o recurso geológico del que pueda extraerse un mineral cuya extracción se realiza generalmente de forma subterránea.

Minería	La minería es el conjunto de actividades referentes al descubrimiento y la extracción de minerales que se encuentran debajo de la superficie de la tierra. Estos minerales pueden ser metales (como el oro y el cobre) y no metales (como el carbón, el amianto, joyas, y grava).
Minería artesanal	Modalidad del ejercicio de la actividad minera que se caracteriza por el trabajo personal y directo en la explotación de diversos productos mineros, mediante equipos manuales y simples con técnicas rudimentarias.
Mina a cielo abierto	Operación minera en la cual las labores se ejecutan sobre el nivel del suelo, o dejando expuestos a la atmósfera los frentes de extracción. Se puede usar como sinónimo de cantera.
Pirita framboidal	Consiste de microcristales de pirita discretos equigranulares (usualmente cubos o piritohedros < 5 μm de diámetro) que pueden estar arreglados con diversos grados de ordenamiento en agregados aproximadamente esferoidales (usualmente < 500 μm de diámetro) (Huerta, 2006).