

# Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas

## 1.0 INTRODUCCION

### 1.1 Objetivos de esta Guía Técnica

Se considera al drenaje ácido de mina como la responsabilidad ambiental y económica más grande que actualmente afronta la industria minera. Su desarrollo puede tomar años o décadas, y puede continuar durante siglos. En los últimos 15 años, la tecnología ha desarrollado rápidamente, hasta el punto que se pueden tomar medidas razonables como parte del programa de diseño y desarrollo de mina para identificar y controlar el drenaje ácido.

El presente documento constituye una guía práctica para la predicción, control y evaluación del drenaje ácido de roca en las minas ubicadas en el Perú. Se preparó, en parte, para cumplir con las normas dictadas por el Gobierno Peruano a través del DS-016-93-EM y sus modificaciones contenidas en el DS-059-93-EM. Estas pautas ayudarán a las compañías mineras y metalúrgicas a definir la dimensión actual del drenaje ácido de mina, a diseñar y evaluar medidas de control alternativas para prevenirlo o limitarlo y, finalmente, a determinar el potencial futuro de generación de ácido y drenaje contaminado.

Sin embargo, se debe reconocer que los programas de muestreo, programas de pruebas, así como la selección e implementación de medidas de control serán específicos para cada asiento minero; las diferentes formaciones geológicas, tipos de mina e instalaciones de procesamiento, así como la etapa de desarrollo, la hidrología y topografía, todos ellos determinarán la selección de las medidas de predicción y control. El presente documento proporciona pautas y ejemplos, basados en normas estándar aceptadas, que ayudarán en el diseño e implementación de programas de predicción y control del Drenaje Acido de Mina. Se recomienda especialmente al profesional responsable de estos asuntos que revise los detalles del programa con la DGAA. Al final del documento, se incluye una lista de referencias, para información más detallada sobre temas específicos. Muchas de estas referencias están a disposición de quien las requiera en la biblioteca de la DGAA.

### 1.2 Historia de la Minería en el Perú

El Perú tiene una larga historia de actividad minera (según Shimada y Merkel, 1991). Durante el Periodo Pre-Incaico (500 AC a 1300 DC) y el Imperio Incaico hubo relativamente poca actividad minera. Muchos de los minerales conocidos fueron entregados a los escasos fundidores localizados en la parte norte del Perú. Metales como el oro, plata, cobre y aleaciones de cobre/arsénico fueron los principales productos utilizados fundamentalmente para armas, utensilios y efectos personales.

La actividad minera se incrementó a partir de la Conquista del Perú, en el año 1530, debido al interés de los conquistadores españoles por el oro y la plata. La tecnología minera europea fue introducida en ese momento para incrementar la productividad de las minas peruanas. Este periodo duró de 1500 DC hasta finales de 1700.

El periodo de auge de la actividad minera peruana se inició a comienzos de este siglo, con el establecimiento de compañías nacionales y extranjeras en los distritos mineros con riqueza mineral importante (principalmente plata), como las áreas de Cerro de Pasco y Huancavelica. La mecanización de la actividad minera fue una de las principales razones para el incremento de los porcentajes de producción. El cobre, plomo, zinc y mercurio fueron los metales de interés primario para estas compañías.

### 1.3 Resumen de la Geología y del Drenaje Acido de Mina en el Perú

Como en la mayoría de países, no todas las minas en el Perú producen ácido. Existen tres factores principales que tienden a contribuir al potencial de generación de ácido y a la calidad del drenaje de las minas en el Perú:

- la compleja configuración geológica, principalmente, en lo referente a vetas;
- la variada mineralogía con potencial para contribuir con diferentes contaminantes en el tiempo, y en diferentes lugares;
- la asociación del mineral con la pirita como el principal mineral sulfurado.

En el cuadro 1.1 se proporciona un resumen de la geología y los principales yacimientos del Perú (según Ponzoni, 1980).

Una característica exclusiva de los depósitos del norte y centro del Perú es la abundancia de la enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), un mineral comparativamente raro. Tal como lo describe Hulburt y Klein (1971), la enargita "...se encuentra en vetas y depósitos de reemplazo formado a temperaturas moderadas, asociada con la pirita, esfalerita, bornita, galena, tetrahedrita, covelita y calcocita". Otra característica de la minería en el Perú que contribuye a la reactividad de los relaves es la necesidad de un grado de molienda muy fino para poder ejecutar una adecuada recuperación por flotación de estos minerales complejos.

De aproximadamente 180 minas operativas en el Perú (grande, mediana y pequeña minería) unas 25 a 30 presentan un declarado problema de drenaje ácido de mina. Es probable que existan otras concesiones que actualmente generen ácido pero no se posee información al respecto. Con frecuencia, éste es el caso de las áreas antiguas y abandonadas de las minas activas y también de las áreas mineras de larga explotación como Cerro de Pasco, Huancavelica y Ayacucho. Hay pocas minas operativas que tienen un potencial muy bajo de drenaje ácido debido tanto a la geología favorable como al hecho de que están localizadas en áreas con un balance neto de agua negativo. Para el remanente de las minas operativas, el potencial de generación ácida en el futuro no ha sido determinado.

En el Perú no existe tratamiento del drenaje ácido, a excepción de una compañía de mediana minería. Actualmente, el DAM drena a cursos de agua naturales o se elimina en lagos o ríos.

#### 1.4 Clima e Hidrología

La mayor influencia en el clima e hidrología del Perú son los Andes que cruzan la costa longitudinalmente (según Ministerio de Agricultura, Dirección General de Aguas y Suelos, 1992). El país se considera en términos de cuatro regiones geográficas:

- Costa: con elevaciones de 0 a 50 m.s.n.m., un litoral de 2560 km y un ancho variable entre 50 y 100 km, se localiza entre Chile y Ecuador. Esta zona representa 10,6% del área del país en 136 370 km<sup>2</sup>.
- Sierra: comprende 30,5% (391 980 km<sup>2</sup>) con un relieve topográfico abrupto variable de 120 a 300 km y elevaciones entre 500 y 6780 m.s.n.m. (Nevado Huascarán).
- Selva: comprendida entre las montañas orientales de los Andes hasta alcanzar la llanura amazónica. Esta zona ocupa el 58,89% de la superficie total del país. La Selva Alta comprende de los 400 a 1000 m.s.n.m.; mientras que la Selva Baja, de 400 a 80 m.s.n.m.
- Océano Pacífico: comprendido entre las 200 millas hasta la orilla marina. Tiene dos vertientes marinas: la Peruana o de Humboldt, de corriente fría y la del "Niño", de corriente cálida. El Perú reclama 600 000 km<sup>2</sup> de la Antártica.

De acuerdo a la ubicación geográfica del país, le correspondería un clima tropical con abundantes lluvias, pero debido a la influencia de la Cordillera de los Andes, a la Corriente Peruana o de Humboldt, a la continentalidad y al anticiclón sub-tropical del Pacífico Sur, el clima de la costa es seco y árido. Periódicamente, la Corriente del Niño se desplaza de Norte a Sur

generando graves cambios climatológicos incluyendo intensas lluvias en la costa y severas sequías seguidas de inundaciones en la sierra.

El clima de la región de la Sierra es variable debido a su topografía y variación con la altitud, desde templado hasta gélido o polar, con precipitaciones de origen orográfico resultantes de la condensación del vapor de agua de las masas de aire. Esto puede elevar la descarga en las vertientes de las montañas y en los valles interandinos.

Las precipitaciones a lo largo de la región costa son muy escasas, obteniéndose promedios anuales inferiores a 50 mm en la faja central y sur. En el norte, el promedio llega a 400 mm anuales aproximadamente. Las lluvias en la sierra tampoco son abundantes llegando a un promedio anual de 300 mm en la zona. A mayor altitud (5500 m.s.n.m.) las precipitaciones ocurren en forma de nieve. La región selva tiene precipitaciones muy abundantes con promedios anuales entre 3000 y 4000 mm y valores máximos en marzo.

El Perú tiene tres vertientes en las que desembocan las aguas superficiales que se generan en el país.

- Vertiente del Pacífico: posee el 21,8% del territorio peruano (279 689 km<sup>2</sup>) distribuido en 53 cuencas hidrográficas importantes.
- Vertiente del Atlántico: posee el 74,6% (956 751 km<sup>2</sup>) de la superficie del país y 44 cuencas hidrográficas importantes.
- Vertiente del Titicaca: comprende el 3,8% (48 775 km<sup>2</sup>) del territorio nacional distribuido en nueve cuencas pequeñas.

En total, existen 106 cuencas en el Perú, que representan un recurso hidráulico importante. Los factores que influyen en el clima originan diversas variaciones estacionales en el flujo de cada una de las vertientes. Los periodos cortos de flujo abundante (tres a cinco meses) contrastan con los periodos de flujo más prolongados de siete a nueve meses.

## 2.0 LOS PROCESOS

### 2.1 Descripción del DAR

#### 2.1.1 Definición

El fenómeno de drenaje ácido proveniente de minerales sulfurosos es un proceso que ocurre en forma natural. Hace cientos de años, se descubrieron muchos yacimientos minerales por la presencia de agua de drenaje rojiza, indicando la presencia de minerales sulfurosos.

Hace sólo alrededor de 20 años, se desarrolló una preocupación ambiental asociada con esta agua ácida, rica en metales disueltos, así como el término "drenaje ácido de mina" o DAM. No obstante, el drenaje ácido no ocurre únicamente en las minas, por lo que el término "drenaje ácido de roca" o DAR también es usado comúnmente.

Cualquiera sea el término empleado -DAM o DAR- el drenaje ácido se refiere a:

drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua. El desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento.

Es importante reconocer que la definición se refiere al drenaje contaminado. El desarrollo del clásico DAR de pH bajo y rico en metales es un proceso que depende del tiempo, como se discutirá en el acápite 2.3. A lo largo del tiempo, la química del agua de drenaje cambiará, volviéndose gradualmente más ácida, con concentraciones crecientes de metales. Sin embargo, como se describe en la definición, el DAR se refiere a todo drenaje contaminado como resultado de los procesos de oxidación y lixiviación de los minerales sulfurosos. Con el tiempo las características del drenaje pueden cambiar, de ligeramente alcalino hasta casi neutro y finalmente ácido.

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

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

Generalmente el DAR se caracteriza por:

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

Con respecto al drenaje ácido de mina en el Perú, la preocupación fundamental sería los niveles elevados de acidez, sulfato, niveles de hierro y cobre y la lixiviación de otros metales asociados con el mineral sulfuroso, según se muestra en el cuadro 2.1. La preocupación ambiental con respecto al DAR, generalmente, es el impacto adverso de los contaminantes, particularmente los metales disueltos, en la vida acuática del medio receptor y en la calidad del agua para beber.

## 2.2 Generalidades

La generación de ácido es originada por la oxidación de los minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y agua, lo cual da por resultado la producción de acidez, sulfatos y la disolución de metales. No todos los minerales sulfurosos son igualmente reactivos, ni la acidez se produce en igual proporción. Además, no todos los minerales sulfurosos o rocas con contenido de sulfuro son potencialmente generadores de ácido. La tendencia de una muestra particular de roca a generar acidez neta es una función del balance entre los minerales (sulfurosos) productores potenciales de ácido y los minerales (alcalinos) consumidores potenciales de ácido.

El proceso mediante el cual se consume ácido se denomina "neutralización". Teóricamente, cada vez que la capacidad consumidora de ácido de una roca ("potencial de neutralización") excede al potencial de generación de ácido, se consumirá toda la acidez y el agua que drene de la roca se encontrará en el nivel de pH neutro o cerca de él. El drenaje ácido generado por la oxidación de sulfuros puede neutralizarse por contacto con minerales consumidores de ácido. Como resultado de ello, el agua que drena de la roca puede tener un pH neutro y una acidez insignificante, a pesar de la continua oxidación de sulfuros.

Con el tiempo, a medida que se agotan los minerales consumidores de ácido o se vuelve imposible acceder a ellos a causa de la formación de cubiertas de minerales secundarios, se puede generar agua ácida.

## 2.3 Etapas en el desarrollo del DAR

El desarrollo del drenaje ácido de roca es un proceso que depende del tiempo y comprende tanto reacciones químicas de oxidación como fenómenos físicos relacionados. En algunos asientos mineros, el drenaje ácido se detecta desde el principio de las operaciones. En otros, han pasado de 10 a 40 años antes de que se observe drenaje ácido. En estos sitios, las reacciones de oxidación de sulfuros y generación de ácido probablemente estuvieron

ocurriendo durante el intervalo de retardación previo a la medición del agua de drenaje, pero en una baja proporción y con neutralización de los productos de oxidación.

La figura 2.1 puede ser utilizada para ilustrar esquemáticamente el desarrollo del DAR a través del tiempo. Generalmente, se le observa como un proceso en tres etapas, definidas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurosos. Con frecuencia, las siguientes descripciones son usadas para comprender la naturaleza del DAR dependiente del tiempo y para la interpretación del DAR en el campo.

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

Como se muestra en las reacciones de la Etapa I, éste es fundamentalmente un período de oxidación química. El oxígeno es el oxidante principal, al producir sulfato y acidez a partir de la oxidación de los minerales sulfurosos. Los minerales carbonatados, como la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) presente en la roca, neutralizan esta acidez y mantienen condiciones que van de neutras a alcalinas ( $\text{pH} > 7$ ) en el agua que fluye sobre la roca. También se podría detectar un contenido elevado de calcio (y magnesio u otros metales, dependiendo de las rocas consumidoras de ácido presentes), como resultado de la disolución de los minerales carbonatados, debido al consumo de ácido.

La oxidación de los minerales sulfurosos libera hierro ferroso en la solución. La oxidación química del hierro ferroso es rápida a un pH superior a 7 y el hierro férrico se precipita de la solución como un hidróxido. De esta manera, la velocidad de oxidación química de la pirita es relativamente baja, comparada con las etapas posteriores de oxidación, ya que el hierro férrico no contribuye como oxidante.

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

Etapa II. A medida que continúa la generación de ácido y se agotan o se vuelven inaccesibles los minerales carbonatados, el pH del agua disminuye y el proceso se encamina hacia su segunda etapa. Cuando el pH del microambiente disminuye hasta 4.5, ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas.

A medida que la velocidad de generación de ácido se acelera en las etapas II y III, el pH disminuye progresiva y gradualmente, como se muestra en la figura 2.1. Los niveles de pH relativamente constantes representan la disolución de un mineral neutralizante que se vuelve soluble a ese nivel de pH. Si la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, se presentarán valores de pH por debajo de 3.5.

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

Etapa III. A medida que los minerales alcalinos se consumen o recubren, o bien, se produce acidez a mayor velocidad que alcalinidad, el pH se vuelve ácido. Las reacciones dominantes se transforman de oxidación química a principalmente oxidación biológicamente catalizada. De las reacciones de oxidación sulfurosa, se produce hierro ferroso, que se oxida biológicamente y se convierte en hierro férrico. Este, a su vez, reemplaza el oxígeno como el oxidante principal.

En esta etapa, la velocidad de oxidación es considerablemente más rápida que en la Etapa I. Como se indica en la figura 2.1, el descenso del pH incrementa la velocidad de oxidación. No hay estudios científicos definitivos para cuantificar la aceleración de las velocidades de

oxidación debido a la oxidación catalizada biológicamente; sin embargo, en la literatura existen informes sobre la observación del aumento de velocidades de 10 a un millón de veces más que aquéllas generadas por oxidación química. En esta etapa, el agua de drenaje es generalmente ácida, caracterizada por sulfatos y metales disueltos en concentraciones elevadas. El hierro disuelto se presenta como hierro ferroso y férrico.

En algún momento en el futuro, décadas y -posiblemente- siglos después del inicio de la generación de estos ácidos, la velocidad disminuirá con la oxidación completa de los sulfuros más reactivos y el pH se incrementará hasta que la roca se torne sólo ligeramente reactiva y el pH del agua de drenaje no sea afectado. El tiempo para cada etapa sucesiva puede variar de un período de días a un período de cientos de años, dependiendo de los factores que controlen la generación de ácido.

Dependiendo de la etapa en el proceso de oxidación se determinará la tecnología apropiada para la vigilancia y el control. En la etapa I, puede ser factible el control de las condiciones necesarias para las reacciones de generación de ácido. Se puede prevenir el impacto del drenaje contaminado sobre el ambiente mediante un control efectivo del proceso de oxidación, eliminando el reactante principal necesario para que se produzca la reacción (es decir, el oxígeno). El monitoreo se centrará en los parámetros indicadores del inicio del DAR: sulfato, bicarbonato, hierro ferroso, zinc, etc.

Una vez que se establecen las reacciones de generación de ácido (Etapas II y III), el hierro férrico se convierte en el principal oxidante. En esta etapa, la oxidación está bien establecida y el control del DAR requiere la eliminación del mecanismo de transporte, con el fin de evitar que el contaminante sea liberado en el ambiente (es decir, el agua).

## 2.4 Química de Reacciones

### 2.4.1 Oxidación

La generación y el consumo de ácido son el resultado de una serie de reacciones químicas complejas e interrelacionadas. Los factores que controlan la velocidad y la magnitud de la generación de ácido, y la consiguiente calidad del agua de drenaje, sólo han sido estudiados en detalle durante los últimos 20 años. La comprensión de estos factores,

así como de los procesos químicos y de los reactantes involucrados, constituyen la clave para la predicción del potencial de generación de ácido en una muestra de roca; del mismo modo, es fundamental para identificar la tecnología apropiada, que sirva para prevenir o controlar la generación de drenaje ácido.

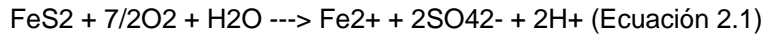
Los componentes principales para la generación de ácido son:

- . minerales sulfurosos reactivos;
- . agua o atmósfera húmeda; y
- . un oxidante, especialmente el oxígeno de la atmósfera o de fuentes químicas.

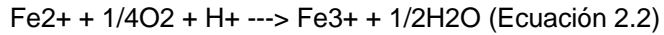
La velocidad y la magnitud de la generación de ácido son afectadas por los siguientes factores secundarios:

- . bacterias (*Thiobacillus ferrooxidans*)
- . pH
- . temperatura

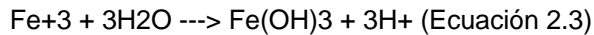
Las reacciones de generación de ácido se expresan generalmente como la oxidación de la pirita, uno de los minerales sulfurosos más comunes. Inicialmente, los sulfuros reaccionan con el oxígeno y el agua para formar sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e iones de hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). Esta reacción total de generación de ácido, en la que se muestra la pirita siendo oxidada por el oxígeno, puede representarse por la siguiente ecuación:



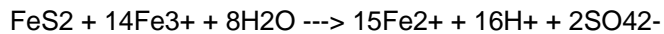
Posteriormente, el hierro ferroso reacciona con el oxígeno para formar hierro férrico:



Dependiendo del pH en el ambiente alrededor del sitio de oxidación, el hierro férrico puede luego precipitarse en la forma de hidróxido (Ecuación 2.3), o puede, a su vez, ser utilizado como oxidante (Ecuación 2.4). A niveles de pH por encima de 3.5, el hierro férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ) tiende a precipitarse como hidróxido férrico. Esto forma el precipitado rojo que se observa en la mayoría de las minas que generan ácido. Durante esta reacción, se liberan iones de hidrógeno adicionales.



A medida que se desarrolla la generación de ácido y se consume la alcalinidad disponible, el hierro férrico, a su vez, sirve como oxidante y puede promover la oxidación química de los minerales sulfurosos. En el caso de la pirita, la reacción que ocurre es la siguiente:



(Ecuación 2.4)

La oxidación química de la pirita (Ecuación 2.1) es una reacción relativamente rápida a valores de pH mayores que 4.5, pero mucho más lenta a niveles de pH más ácidos. La velocidad del suministro de oxígeno es el elemento que controla principalmente la velocidad de la oxidación química. A niveles de pH inferiores a 4.5, la oxidación por el hierro férrico se convierte en el proceso de oxidación dominante. La velocidad de producción de hierro férrico, a partir del ferroso (Ecuación 2.2), se convierte en la etapa controlante del proceso total de oxidación. Sin embargo, por catálisis biológica, esta reacción es relativamente rápida.

Por lo general, se reconoce que ciertas bacterias pueden acelerar la velocidad con la cual ocurren algunas de las reacciones anteriormente indicadas, incrementando con ello la velocidad de generación de ácido. La bacteria *Thiobacillus ferrooxidans* es capaz de oxidar compuestos de azufre reducidos, así como oxidar el hierro ferroso en férrico (que entonces puede actuar como oxidante). Otras bacterias conocidas como participantes o acelerantes de la oxidación de los minerales sulfurosos son: *Thiobacillus thiooxidans* y *Sulfolobus*. La velocidad con la cual ocurre la oxidación bacteriana depende de los siguientes parámetros:

- . temperatura
- . pH
- . disponibilidad de oxígeno
- . disponibilidad de dióxido de carbono (fuente de carbono para la reproducción de las células)
- . nutrientes (N,P)
- . área superficial del mineral sulfuroso expuesto

Los efectos de temperatura y pH en la oxidación biológica y química de la pirita se ilustran en las figuras 2.2 y 2.3, respectivamente. En general, las velocidades de oxidación se aceleran con un incremento de temperatura. Como regla empírica, las velocidades de reacción pueden duplicarse por cada 10°C de aumento de temperatura. El proceso de oxidación del sulfuro es exotérmico, genera calor y aumenta la temperatura en el sitio de la reacción. Se han registrado temperaturas superiores a los 50°C en pilas de desmonte en oxidación, ubicadas en regiones cuya temperatura de aire ambiental es menor a 5°C.

Por tanto, la oxidación continua puede crear condiciones ideales para el crecimiento de las bacterias oxidantes. La producción de  $\text{H}^+$  y la consiguiente disminución del pH, hasta un nivel

adecuado para las bacterias que oxidan el sulfato y el hierro, la producción de hierro férrico y el aumento de temperatura debido al proceso de oxidación exotérmico, dan por resultado unas condiciones idealmente adecuadas para estas bacterias. Una vez establecidas, las velocidades de oxidación bacteriamente catalizadas son lo suficientemente altas como para mantener condiciones de temperatura elevada y pH bajo. A temperaturas bajas, la velocidad de oxidación, tanto biológica como química, es mucho más reducida de lo que podrían ser a temperaturas ambientales. Las velocidades de reacción, medidas en pruebas cinéticas de laboratorio, deberán reajustarse de acuerdo a estos hechos. Por debajo de los 4 °C, las velocidades de oxidación se consideran insignificantes.

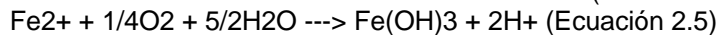
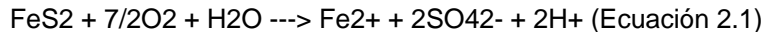
#### 2.4.2 Minerales Sulfurosos

Los minerales sulfurosos más comunes, considerados como fuente de DAR, son los minerales de hierro, en forma especial, la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), pirrotita ( $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}_x$ ) y marcasita ( $\text{FeS}_2$ ). Dependiendo de la forma y de la estructura cristalina del mineral, como 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.

Todo mineral sulfuroso tiene el potencial de oxidarse y lixiviar metales. Los minerales de metales bases, tales como calcopirita ( $\text{CuFeS}_4$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), galena ( $\text{PbS}$ ), esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) y arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), pueden encontrarse asociados a cuerpos mineralizados en el Perú. La oxidación y lixiviación de los minerales, generalmente como resultado de la generación de ácido a partir de los minerales de sulfuro de hierro asociados, pueden dar como resultado la liberación de acidez y metales disueltos en el agua de drenaje.

La cantidad de acidez que, teóricamente, se puede liberar de la oxidación de un mineral sulfuroso puede calcularse a partir de las relaciones estequiométricas mostradas en las ecuaciones 2.1 a 2.4, en las que se grafica la oxidación de diferentes minerales sulfurosos.

Como ejemplo, la oxidación de una mol de pirita produce 4 moles de acidez (equivalentes de  $\text{H}^+$ ) a partir de las reacciones que se muestran a continuación:



#### 2.4.3 Neutralización

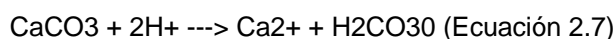
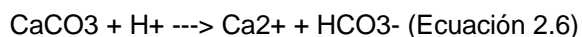
Después de la oxidación de un mineral sulfuroso, los productos ácidos resultantes pueden ser:

- . 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 ( $\text{CaCO}_3$ ), que consume acidez a través de la formación de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) o ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ):





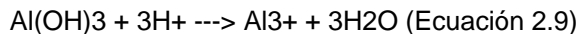
La calcita es el mineral carbonatado más abundante de los yacimientos mineralizados en el Perú, asociado con muy escasa, o ninguna, dolomita. Generalmente, es el más reactivo de los minerales consumidores de ácido y, a diferencia de la mayoría de éstos, tiende a ser más soluble a temperaturas más bajas.

La liberación de bicarbonato y carbonato a través de la disolución de la calcita puede resultar en la formación de minerales carbonatados secundarios, siderita ( $\text{FeCO}_3$ ), mediante:



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 2.9, por ejemplo, para  $\text{Al}(\text{OH})_3$ :



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.

Una serie de minerales pueden aportar alcalinidad, según el resumen del cuadro 2.2. Este cuadro indica el nombre y la composición del mineral, la capacidad equivalente de consumo de ácido, comparada con la de la calcita, y el pH hacia el cual el sistema se estabilizaría (si se conoce este dato).

## 2.5 Lixiviación de Metales

La naturaleza mineralógica y el ambiente químico de la roca determinarán el comportamiento geoquímico de diferentes tipos de roca. La solubilidad de los diversos metales, contenidos en los minerales que se encuentran en la roca, depende de la forma en la que éstos (minerales) están presentes en la misma. La solubilidad de muchas formas metálicas aumenta a medida que el pH disminuye hacia niveles por debajo del neutro (pH 7). En dichos metales, la solubilidad aumenta con cada nivel de disminución en el pH, tal como se ilustra en la figura 2.1. De manera inversa, a medida que el pH aumenta a lo largo de una ruta (debido a aumentos de nivel en el pH), algunos de los metales en solución pueden precipitarse. En ciertos casos, el drenaje contaminado también servirá como lixiviante, promoviendo la disolución de los minerales oxidados que, por lo general, pueden ser inertes o presentar baja solubilidad. Por ejemplo, la generación de hierro férrico puede servir para oxidar ciertos minerales de uranio, aumentando así la solubilidad del uranio y su velocidad de lixiviación.

Las formaciones geológicas del Perú han dado por resultado una serie de características específicas con respecto a la mineralización. Como se describió en la sección 1.3, los minerales de cobre pueden estar asociados con enriquecimientos de zinc, arsénico y níquel y,

en menor grado, al cadmio y plomo. En la figura 2.4, se muestra la solubilidad de varios de estos minerales como una función del pH.

En muchos depósitos, estos metales se presentan principalmente como sulfuros, que incluyen calcopirita, pirita, arsenopirita, galena y esfalerita. Ya que los minerales sulfurosos de estos metales tienden a ser difícilmente solubles en condiciones de pH neutro, la movilización requerirá de oxidación y reducción de los niveles de pH. Una vez movilizados, algunos de estos metales pueden ser redepositados como hidróxidos de metal bajo condiciones de pH neutro, si incrementa el pH. Bajo condiciones de oxidación ácida se esperan altos porcentajes de lixiviación con elevadas concentraciones de metales en la solución. Los productos de oxidación de muchos de los minerales sulfídicos comunes relacionados con los yacimientos en el Perú se presentan en el Cuadro 2.3.

En otras zonas de mineralización, los metales asociados con minerales de cobre y oro tienden a presentarse en un estado de mayor oxidación, con algunos metales en forma de sulfo-sales. Por lo tanto, bajo condiciones de pH neutro, la solubilidad de estos metales será dictada por la solubilidad de los óxidos e hidróxidos de los metales.

## 2.6 Calidad del Agua

En el cuadro 2.1, se presentan algunas de las calidades de drenaje típicas observadas en el Perú, en los distintos tipos de yacimientos.

Es importante reconocer que la acidez y el pH bajo no son factores críticos en la definición de "drenaje contaminado" o DAR. Más bien, la preocupación fundamental la constituyen los elevados niveles de metales disueltos. Por ejemplo, el agua de drenaje que proviene de la oxidación de minerales sulfurosos de una roca que aloja carbonatos puede ser casi neutra, pero puede contener niveles elevados de metales solubles en pH neutro a alcalino, tal como el zinc. Este último metal es lixiviado de las rocas del entorno hacia el agua de drenaje ácido, a pesar de que las reacciones a lo largo de la ruta de flujo del drenaje neutralicen la acidez contenida. Entonces, es posible detectar zinc disuelto en solución, incluso en un pH casi neutro.

La preocupación fundamental en cuanto al DAR se debe a su potencial impacto adverso sobre la flora y fauna del ambiente acuático receptor y, en menor grado, a los riesgos que supone para la salud humana. Los peces y otros organismos acuáticos son más sensibles que los seres humanos a los niveles elevados de la mayoría de metales. Esta sensibilidad se ve reflejada en muchos de los reglamentos internacionales.

## 2.7 Resumen de los Procesos del DAR

La calidad del agua de drenaje proveniente de las minas en el Perú depende tanto de la presencia en la roca, de metales/minerales que se pueden lixiviar en un pH neutro (notoriamente en zonas de óxidos de cuerpos mineralizados de metales bases), como del incremento en la lixiviableidad que resulta de la generación de ácido y que puede ocurrir cuando hay presencia de sulfuros reactivos en cantidades suficientes.

La generación de ácido es controlada por:

- . el tipo de mineral sulfuroso;
- . la distribución y exposición del mineral sulfuroso;
- . el tipo, distribución y exposición de minerales alcalinos;
- . las características de oxidación química y biológica;
- . la temperatura y pH;
- . el flujo de oxígeno y agua; y
- . las concentraciones químicas.

Los factores que controlan la velocidad y la magnitud de la generación de ácido son aquéllos que también proporcionan potencial para el control de la calidad del agua de drenaje.

El desarrollo del DAR es un proceso de tres etapas. Inicialmente, dominan los procesos de oxidación química, relativamente lentos, y la alcalinidad disponible controla los valores de pH en el rango cercano al neutro. Durante esta etapa, se reducen los productos ácidos y la velocidad de lixiviación de muchos de los contaminantes potenciales. A medida que se consume la alcalinidad disponible, el pH se vuelve más ácido y la velocidad de oxidación aumenta. A valores de pH por debajo de 4.5, predominan las reacciones de oxidación biológicamente catalizadas, las cuales son más rápidas, el pH disminuye y la concentración de muchos contaminantes aumenta.

El control de las reacciones de generación de ácido, en las etapas iniciales de oxidación, exige el control del pH, para evitar la ocurrencia de oxidación biológica; o bien el control del suministro de oxígeno, el oxidante principal. En las etapas posteriores de la oxidación rápida, es más difícil el control de las reacciones de generación de ácido. La oxidación de minerales sulfurosos produce hierro ferroso. La actividad biológica oxida el hierro ferroso y lo convierte en férrico, el cual actúa como el oxidante principal. En este momento, las reacciones son esencialmente "autosuficientes". En esta etapa, el control del drenaje ácido deberá depender principalmente de prevenir que los productos ácidos migren.

## 2.8 Fuentes del DAR

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

En un asiento minero, las fuentes primarias de drenaje ácido son las áreas en las cuales la roca de mina ha sido disturbada, y la superficie expuesta. Entre las fuentes principales del DAR están:

- . las pilas de desmonte
- . las pilas de lixiviación
- . los embalses de relaves
- . las labores mineras subterráneas
- . las minas de tajo abierto
- . la roca de construcción -relleno, represas, carreteras.

Además, el drenaje ácido de roca puede ocurrir en otras áreas del asiento minero, las cuales contienen generalmente menor volumen de roca, pero que deberían considerarse en la evaluación del lugar, por ejemplo:

- . derrames de concentrados y relaves
- . almacenamiento de concentrados e instalaciones de descarga
- . apilamiento de mineral
- . superficies de roca expuestas al cortar rocas para carreteras, etc.
- . caminos por los cuales pasan camiones o ferrocarriles con concentrados
- . aliviaderos de emergencia
- . pozas de almacenamiento de lodos en plantas de tratamiento.

Es de fundamental importancia identificar todas y cada una de las fuentes potenciales de drenaje ácido de mina, tanto en el diseño como en la operación de cada asiento minero. También, es importante que, al desarrollar el programa de pruebas de predicción, se comprendan las diferencias en los controles físicos y químicos del DAR para cada una de estas fuentes.

### 2.8.1 Desmonte

Los términos "desmonte" o "roca de mina" generalmente se emplean para hacer referencia a la sobrecapa y rocas que deben extraerse para ganar acceso al mineral. La mayor parte de desmonte se produce en la explotación de minas a tajo abierto, generalmente con una proporción entre tonelaje de material estéril y tonelaje de mineral -"stripping ratio"- de 2:1 ó 3:1. Esta relación hace referencia al tonelaje de desmonte extraído por tonelada de mineral; por consiguiente, en una relación de 2:1, se extraen 2 toneladas de desmonte por cada tonelada de mineral. No obstante, cantidades menores de desmonte o escombros pueden producirse a partir del desarrollo de obras subterráneas.

Generalmente, esta roca es almacenada en la superficie, en grandes pilas o botaderos de desmonte. Esta roca también puede utilizarse para construcciones en el lugar; como relleno para la construcción de cimientos, especialmente en terreno montañoso, para la construcción de carreteras, represas, etc.

Estos botaderos de desmonte son, generalmente, mezclas de material proveniente de diferentes áreas de explotación o desarrollo minero. Los botaderos, por lo común, están constituidos por rocas gruesas y se almacenan sobre la napa freática. De este modo, cualquier mineral sulfuroso reactivo queda expuesto al aire y al agua que pasan por el botadero, inmediatamente después de haber sido depositado allí. Las reacciones de generación de ácido pueden iniciarse en cualquier lugar del botadero, y generalmente se producen en varios sitios. Esto se ilustra de manera esquemática en la figura 2.5.

La química del agua de drenaje proveniente del botadero dependerá tanto de la mineralogía de la roca en la fuente del DAR, como también de las reacciones con las diferentes rocas a lo largo de la ruta del flujo. Dado que toda pila de rocas o botadero puede estar compuesto por una mezcla de tipos de roca, puede surgir agua de química muy diferente de cada una de las diferentes áreas del mismo botadero.

### 2.8.2 Relaves

El desarrollo de DAR en un embalse de relaves es generalmente muy limitado durante la operación y se desarrolla lentamente a lo largo del tiempo, después que haya cesado la acumulación en el embalse. La ocurrencia de las reacciones de oxidación está limitada por la acumulación continua de capas frescas de relaves saturados y alcalinos durante la operación. Después de que se ha concluido la acumulación y los relaves empiezan a drenar, de manera que los sulfuros se exponen al oxígeno, en ese momento comienza la oxidación. Dado que las reacciones de oxidación requieren tanto de oxígeno como de agua, la generación de ácido por lo general comienza en la superficie y en los lados de la represa, que son los primeros en drenar. Así, la oxidación se inicia en la superficie de la represa y progresa en profundidad, a medida que los relaves drenan y la napa freática se mueve hacia el fondo del depósito. El secado y resquebrajamiento de la superficie de los relaves puede aumentar el suministro de oxígeno hacia los relaves que están en profundidad y mejorar la oxidación más profunda.

El desarrollo del DAR y el cambio en la calidad del agua de drenaje a través del tiempo, se ilustran esquemáticamente en la figura 2.6. Inicialmente, el drenaje contaminado puede ser detectado en la escorrentía superficial proveniente de los relaves.

Con el tiempo, a medida que el frente de oxidación progresa a más profundidad dentro de los relaves, y a medida que el drenaje contaminado reemplaza al agua del proceso, el DAR puede detectarse a partir de la base del depósito o en el agua subterránea. La velocidad a la cual progresa el DAR a través de los relaves depende tanto de los controles en la química del agua, como de los controles físicos en el flujo de agua (permeabilidad y pendiente hidráulica). Pueden pasar años o décadas antes de que pueda detectarse el DAR en las filtraciones provenientes de la base de los relaves.

### 2.8.3 Comparación de Botaderos de Desmonte y Relaves

Los relaves y las rocas de mina son probablemente las mayores fuentes del DAR en la mayoría de asientos mineros y es por eso que se les da prioridad en la mayoría de programas de predicción. Es importante comprender las diferencias entre las fuentes de generación de ácido

y los mecanismos de migración de contaminantes, para probar y predecir, con precisión, la calidad del agua de drenaje.

Las diferencias entre las condiciones que controlan el DAR en los botaderos de desmonte y en los depósitos de relaves se encuentran resumidas más adelante. El reconocimiento de estas diferencias es fundamental para la predicción del potencial de generación de ácido y la calidad del agua de drenaje, así como para la evaluación de las medidas de control que sean técnica y económicamente efectivas.

- Oxidación. En los relaves, la oxidación se inicia en la capa superficial expuesta, después de que ha culminado la disposición de pulpas frescas de relaves alcalinos (no durante la operación); así como en las resquebrajaduras verticales en los depósitos subaéreos. La oxidación puede desarrollarse en todo el botadero de desmonte, inmediatamente después de la deposición.
- Ruta del flujo de infiltración. Inicialmente, en una represa de relaves, el DAR es evidente en el agua de desagüe superficial. La infiltración se mueve lenta y uniformemente hacia abajo, a medida que el agua de porosidad del proceso drena del embalse y es gradualmente desplazada por agua contaminada con DAR, generada en la superficie. Pueden pasar varios años, o décadas, antes de que la filtración contaminada migre a través de la masa de relaves y aparezca como filtración de la base. El DAR puede detectarse en el botadero de desmonte después de horas o días de una lluvia, mediante el desarrollo de rutas de flujo de infiltración preferenciales. Puede surgir drenaje de agua con química variada del mismo botadero, como resultado de la heterogeneidad de la roca.
- Heterogeneidad de la distribución de sulfuros/alcalinidad. El desmonte puede provenir de una variedad de unidades rocosas con contenidos de sulfuros ampliamente variables. La mineralogía de la roca, la geoquímica y las propiedades físicas difieren a lo largo del botadero, con una distribución que depende del tamaño de las partículas, de la ocurrencia mineralógica y del método de construcción del botadero. Sin embargo, en los relaves, el procesamiento de mineral relativamente constante origina una masa fina, comparativamente homogénea en todo el depósito.
- Tamaño de la partícula. La roca de mina de tamaño D50 (diámetro del tamaño de partícula promedio determinado por peso) es usualmente mayor que 20 cm, comparado con los relaves, que pueden ser 100% más finos que 0.2 mm. Los minerales sulfurosos y alcalinos en un botadero de desmonte pueden estar físicamente separados por distancias sustanciales.
- Entrada de aire (oxígeno). En los relaves, el aire ingresa desde la superficie a través de los vacíos de los poros y resquebrajaduras, a una velocidad limitada por la forma en que el aire se difunde a través de estos materiales. En un botadero, el aire puede ingresar desde la cima, los lados y a lo largo de la base, y fluir libremente a través de las rutas de flujo advectivas. Los gradientes de temperatura, como resultado de las reacciones exotérmicas de oxidación, también pueden promover el flujo de aire.
- Temperatura. En un botadero de desmonte no saturado, la oxidación rápida puede generar temperaturas elevadas y convección térmica, asimismo pueden desarrollarse efectos de chimenea. La temperatura de los sólidos en los relaves permanece relativamente constante, controlada -en gran medida- por el contenido de humedad de los sólidos.

Los procesos que controlan la generación y migración de ácido en los botaderos de desmonte y depósitos de relaves, a pesar de ser química y biológicamente similares, son muy diferentes en términos de características físicas. Las diferencias entre las condiciones que se aplican a los botaderos de desmonte y a los depósitos de relaves, han sido discutidas por Robertson (1988), y Broughton y Robertson (1992). El reconocimiento de estas diferencias es fundamental para la predicción del potencial de generación de ácido y la calidad del agua de drenaje, así como para la evaluación de las medidas de control que sean técnica y económicamente efectivas.

#### 2.8.4 Labores Subterráneas

Las labores subterráneas pueden ser una fuente considerable de DAR, especialmente en labores antiguas. Las paredes expuestas se encuentran usualmente en áreas mineralizadas y, por tanto, tienen contenidos de metal más elevados que el desmonte. Además, toda roca sulfurosa rota, como parte de las labores subterráneas ejecutadas por el método de explotación minera (técnicas de excavación), como resultado del colapso y hundimiento en labores antiguas, o debido al relleno, puede generar una extensa área superficial de roca quebrada que, a su vez, puede producir DAR.

La fuente de agua de las labores subterráneas es usualmente una combinación de agua subterránea e infiltración de la superficie. Las minas a tajo abierto, los ductos de ventilación o las construcciones subterráneas, tales como los conductos de extracción tipo embudo, pueden originar la continua inundación de las obras.

Luego del cierre, si se permite la inundación de las obras, puede haber un arrastre inicial de contaminantes provenientes de los productos de oxidación almacenados. En el largo plazo, la inundación probablemente constituirá el mejor mecanismo de control de la generación adicional de ácido.

Las fuentes del DAR y el flujo de agua en las obras subterráneas se ilustran esquemáticamente en la figura 2.7.

#### 2.8.5 Mina a Tajo Abierto

Las operaciones en minas a tajo abierto generalmente no descargan agua durante su operación, excepto durante el secado y bombeo de la mina, por eso es algo más sencillo controlar la calidad del agua de descarga de minas a tajo abierto que de las labores subterráneas. La experiencia demuestra que el potencial para la generación de ácido durante la operación, puede limitarse mediante el mantenimiento de paredes competentes "limpias", con poca roca quebrada o material suelto en los bancos. La roca quebrada presenta un área superficial más amplia y, por ello, carga potencial más elevada que las paredes expuestas de la mina. En la figura 2.8, se muestran esquemáticamente las fuentes de DAR de una mina a tajo abierto.

La inundación de la mina, luego del cierre de la misma, controlará finalmente toda generación adicional de ácido, a pesar de que pueda haber oxidación y drenaje durante el llenado de la cantera y, nuevamente, pueda ocurrir un acarreamiento de productos solubles. La mina a tajo abierto también puede emplearse para la disposición de relaves o de rocas de mina de la superficie, debajo de una capa de agua. La predicción de la carga contaminante de las paredes de la mina y de cualquier roca adicional colocada dentro de ella, exige comprender la magnitud de la generación de ácido y de la lixiviación/almacenamiento de metales dentro de la roca.

#### 2.9 Resumen

El drenaje ácido de mina (DAM) o drenaje ácido de roca (DAR) es el drenaje contaminado que se origina de la oxidación de los minerales sulfurosos y de la lixiviación de los metales pesados asociados. Las reacciones de oxidación son reacciones que ocurren en forma natural, las cuales se aceleran por el aumento de exposición de la roca al oxígeno y al agua.

El DAR se desarrolla a través del tiempo, con cambios en la química del agua que reflejan la mineralogía y la cantidad de minerales sulfurosos, alcalinos, así como la velocidad y magnitud de la oxidación y neutralización. En las primeras etapas de la generación de ácido, el oxígeno es el oxidante principal para la oxidación química de los sulfuros (de hierro). La oxidación produce sulfato, hierro y acidez (H<sup>+</sup>). Los minerales alcalinos neutralizan la acidez y originan la precipitación del hierro como óxido o hidróxido.

A medida que los minerales alcalinos se consumen o se encapsulan por cubiertas de precipitado, disminuirá el pH en el área en torno al sulfuro, pasando a la segunda etapa en el

desarrollo del DAR. Mientras que el drenaje puede permanecer en un nivel cercano al neutro, las reacciones de oxidación bacteriamente catalizadas aumentan y el hierro férrico se convierte en el oxidante dominante. En la tercera etapa, el drenaje se vuelve ácido, con mayores concentraciones de metales disueltos.

### 3.2 Fuentes de Muestras

Las fuentes de información y muestras se resumen en el cuadro 3.1 (adaptado de Saskatchewan MPCB, 1991). La ubicación de las muestras siempre deberá anotarse en el plano del asiento y/o en la sección geológica apropiada. Si las muestras fueran recolectadas de una mina en operación, la ubicación deberá marcarse en el campo, en los casos en que fuera práctico hacerlo; la ubicación debería determinarse por levantamiento de plano. También, puede ser de ayuda fotografiar estas ubicaciones y anotar las condiciones de clima y agua de drenaje en el momento del muestreo. De manera ideal, las muestras deberán ser frescas al momento de evaluarlas, o bien estar almacenadas en un ambiente seco y fresco, de manera que estén protegidas contra la oxidación y el intemperismo.

Los geólogos e ingenieros de planeamiento de mina han reconocido que las técnicas estadísticas tradicionales con frecuencia no son suficientes para evaluar los datos y definir un programa de muestreo y pruebas estadísticamente "significativo". Los métodos estadísticos, como aquellos que se describen en Gilbert (1987), han sido aplicados a la determinación de asientos con suelos contaminados y para otras evaluaciones, tales como el monitoreo biológico. No obstante, actualmente existe un considerable interés en la aplicación de técnicas geoestadísticas para evaluar la variabilidad inherente de los depósitos geológicos. Sin embargo, hasta la fecha no existen reglas definidas para el muestreo. Los programas de muestro se diseñan asiento por asiento, para adecuarse a la variabilidad natural y las preocupaciones específicas de cada uno de ellos.

### 3.3 Etapa de Operación

Robertson y Broughton (1992) proporcionan la siguiente discusión sobre las diferencias entre el muestreo en las minas existentes y el muestreo en las minas nuevas. El muestreo y pruebas para las minas nuevas (minas que aún están por desarrollarse) generalmente presentan diferentes problemas y requerimientos, comparados con las minas antiguas. En el cuadro 3.2, se comparan las condiciones del DAR y la información disponible en minas nuevas y antiguas. En las minas nuevas, la preocupación principal es el potencial de las condiciones de generación de ácido que pueden desarrollarse y, si el DAR es posible, la efectividad de las medidas de control alternativas. La predicción de las calidades del agua de drenaje y cargas contaminantes para un largo periodo en el futuro a menudo se toma de muestras frescas de diversas unidades litológicas o de muestras compuestas.

Para las minas antiguas, el DAR con frecuencia está bien establecido y proporciona una clara demostración del comportamiento del material, así como de las cargas y concentraciones del contaminante hacia el ambiente. Las preguntas que requieren respuesta se relacionan con la cantidad de productos ácidos almacenados en los desechos (disponibles para la lixiviación, a pesar de la generación adicional de ácido), la etapa de generación de ácido en los diferentes botaderos de desmonte y la manera en que la producción futura de desechos se comparará con los desechos producidos en el pasado. Con frecuencia, la geología y la distribución de sulfuros en la mina y el cuerpo mineralizado restante pueden ser determinadas aunque la distribución de los tipos de roca de los botaderos de desmonte tal vez no haya sido registrada. La composición detallada de las pilas de roca, por tanto, puede ser incierta.

Para las minas antiguas y nuevas, es esencial el establecimiento de un inventario de los botaderos de desmonte y apilamiento de relaves existentes y por producirse. Para las minas

nuevas, éste se basará en la planificación y cronograma de la mina, pero las minas antiguas requieren del reconocimiento e investigación del sitio, en la forma descrita por Broughton et al., 1992. A esto le deberá seguir la caracterización del DAR de los materiales que se encuentren, o se encontrarán, en los diferentes botaderos. Finalmente, se deberán predecir la generación de ácido a largo plazo y la calidad del agua de drenaje, con y sin medidas correctivas y de control del DAR, con el fin de establecer el potencial de control y los costos. Estos constituyen información esencial para las decisiones que se refieren a las autorizaciones, la continuación de operaciones en la mina, y la selección y financiamiento de opciones de control adecuadas.

### 3.4 Tamaño de Muestra

El tamaño de cada muestra individual debe basarse en la heterogeneidad de la unidad. Una unidad de roca, en la que los minerales son de grano fino y se diseminan por toda la masa, es considerada homogénea si se la compara con una unidad de roca en la que los minerales se presentan en vetas, en algunos casos de hasta 50 cm de ancho.

Como pauta general, el tamaño de la muestra de una unidad homogénea (es decir, mineralización de sulfuros y alcalinos uniformemente distribuida o diseminada) deberá ser por lo menos el doble de la cantidad necesaria para la prueba. Sin embargo, para las pruebas estáticas, se requiere una pequeña muestra para el análisis; se recomienda un mínimo de un kg cuando hay heterogeneidad en pequeña escala, por ejemplo en la distribución del mineral en vetas; se puede necesitar una muestra mayor para considerar la heterogeneidad regular a pequeña escala.

En el capítulo 4, Predicción, se proporcionan pautas específicas en relación a la cantidad de muestra necesaria para las diferentes pruebas.

### 3.5 Muestras Compuestas

En algunas situaciones, particularmente en el desarrollo de una mina nueva, la cantidad de muestra disponible para pruebas es limitada. A menudo se requiere aumentar dichas muestras. Todas las muestras representan un compuesto de minerales de roca en cierta medida; con frecuencia, materiales de roca mezclados que tienen una amplia variación en contenido de sulfuros y alcalinos. Mientras mayores sean las dimensiones sobre las cuales se toma la muestra compuesta, mayor será la extensión de la mezcla y con mayor probabilidad la muestra será representativa de algún valor promedio, ocultando el rango de valores que se detectaría en las muestras individuales.

Existen ciertas técnicas de muestreo que originan muestras "compuestas", por ejemplo:

- . muestreo sobre un intervalo de longitud de testigo
- . combinación de diferentes tipos de roca para producir una muestra representativa de algún depósito más grande (como un botadero de desmonte)
- . muestreo del mismo tipo de roca o unidad de roca (en base a consideraciones de DAR) de diferentes lugares.

La mezcla de muestras de roca de diferentes lugares, sin definir las unidades de roca exclusivas, puede originar un compuesto con propiedades que no sean necesariamente representativas de ninguno de los tipos de material que contiene el compuesto.

La mayor preocupación está en las dos primeras estrategias. Se puede necesitar la composición para proporcionar suficiente muestra destinada a una prueba cinética, en cuyo caso se trata esencialmente de muestreo por lotes; o bien cuando las heterogeneidades de pequeña escala afectarían a una muestra individual. Siempre se deberá consultar al geólogo encargado, al determinar la técnica de muestreo apropiada para los programas de predicción del DAR.

La figura 3.1 (según Robertson y Broughton, 1992) ilustra el efecto sobre la distribución de los valores del potencial de neutralización neto (PNN), que se obtendrían del muestreo aleatorio con diferentes tamaños de compuestos provenientes de una masa de roca con contenido de sulfuros altamente variable.



Para el ejemplo escogido, la generación de ácido ocurriría (como lo demuestran las pruebas cinéticas) en aquellas muestras con PNN menor a -4. Partiendo de la figura, es evidente que el porcentaje de muestras "potencialmente generadoras de ácido" aumenta a medida que el tamaño (o longitud) del compuesto disminuye. En los extremos, una sola muestra compuesta de la población total de muestreo sería "no generadora de ácido", mientras que la distribución de un gran número de muestras pequeñas (cada una representativa de alrededor de 1 kg de roca tomada de una dimensión lateral de 10 cm) podría indicar que un 30% de las muestras es potencialmente generadora de ácido. El potencial de generación de ácido, dentro del botadero de desmonte resultante, depende del grado de mezcla de los tipos de roca. Si las diversas muestras estuvieron íntimamente mezcladas, como ocurriría en un depósito de relaves, entonces, las grandes muestras compuestas pueden ser representativas del depósito final. Sin embargo, si las diferentes muestras no están íntimamente mezcladas, como sucede en los botaderos de desmonte, entonces, algunas capas y porciones de éste podrían ser generadoras de ácido, mientras que otras serían consumidoras de ácido. El drenaje contaminado de las partes del botadero que son generadoras de ácido, dará por resultado el DAR.

Es esencial que se restrinja el alcance de las muestras compuestas para permitir la evaluación de las características geoquímicas de un tipo de roca. Por lo general, la práctica común para los testigos de perforaciones y muestras es restringir los compuestos a longitudes de 0.5 m, dependiendo de la presencia de mineralización y heterogeneidad de la muestra. Si fuera conveniente para la evaluación, se pueden sumar numéricamente los resultados BAB de muestras adyacentes, con la finalidad de derivar los valores BAB para muestras mayores.

### 3.6 Resumen

El programa de muestreo es tal vez la etapa más crítica en un programa de pruebas de predicción. Se recomienda utilizar un enfoque escalonado en la elaboración de un programa de muestreo con un costo efectivo. El programa inicial de muestreo debería incluir un rango representativo de todas las unidades geoquímicas y tipos de muestras relevantes (roca de mina, relaves, etc.), sobre las cuales se conducen pruebas estáticas baratas y relativamente simples. La siguiente etapa del muestreo y pruebas estáticas debería centrarse en unidades que demostraron alta variabilidad en el muestreo original (y que, por tanto, no son claramente generadoras o consumidoras de ácido), así como en los materiales sobre los cuales se requiere una mejor definición.

Con frecuencia, los programas iniciales de perforación y muestreo, en la etapa de exploración de un proyecto, se centran en el material con contenido mineral, pudiendo requerirse más perforación para definir el potencial DAR de la roca submarginal. Las etapas subsiguientes de muestreo y pruebas cinéticas deben centrarse en muestras que son potencialmente generadoras de ácido y en aquéllas que no son claramente generadoras o consumidoras de ácido, a partir de los resultados de las pruebas estáticas; además, deben centrarse en la evaluación y demostración de las medidas de control.

Igualmente, el tamaño y número de muestras deben reflejar la cantidad de cada unidad, la acumulación de material propuesta y el "nivel de preocupación" respecto al material. Por ejemplo, si el plan de la mina define que todos los relaves deberán depositarse bajo el agua (controlando así la generación de ácido), aún cuando sólo se haya definido un potencial marginal de DAR, se requerirán menos muestras que para los

relaves que pueden no estar permanentemente bajo la capa de agua, o de los relaves que tienen un potencial considerable para liberar metales solubles. Si bien el programa de muestreo varía de asiento a asiento, la experiencia norteamericana demuestra que, por cada mina nueva, se pueden seleccionar de 25 a 300 muestras para las pruebas estáticas, pudiendo evaluarse de 4 a 20 de ellas mediante pruebas cinéticas. Sin embargo, el número de muestras depende completamente del asiento, siguiendo los principios que se han discutido en el presente capítulo.

En resumen, los puntos esenciales que se deben considerar en el desarrollo de un programa de muestreo son los siguientes:

- . definición de la geología, mineralización;
- . consideración del plan de minado;
- . consideración de todas las fuentes de muestras;
- . conducción de un programa inicial de muestreo;
- . clasificación de la roca de mina; y
- . ejecución de muestreo y reclasificación adicionales, si fuese necesario.

## 4.0 PREDICCIÓN

### 4.1 Introducción

#### 4.1.1 Importancia de la Predicción

El reconocimiento prematuro de la posibilidad de que un tipo de roca, o componente de mina, generará drenaje ácido es esencial para prevenir el desarrollo de un problema de DAR. La intención del presente capítulo es describir el enfoque y las técnicas para la predicción del DAR. Se describen los pasos en el programa de muestreo y pruebas, tanto para las minas existentes como para las nuevas. Se describen, de manera genérica, las técnicas para las pruebas estáticas y cinéticas, con énfasis especial en los procedimientos (o modificaciones) apropiados para el Perú.

La predicción del potencial de generación ácida y lixiviación de metales es muy importante desde una perspectiva ambiental y también desde la económica. En el Perú, sólo recientemente se ha reconocido la magnitud de los impactos ambientales adversos del drenaje contaminado (DAR). Se ha reconocido también que puede haber considerables implicancias económicas en los requerimientos para dar solución al DAR en un asiento minero.

La identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas. Además, la identificación prematura y la incorporación de medidas de control, pueden reducir las obligaciones financieras de mantener instalaciones de recolección y tratamiento a largo plazo; por ejemplo, mantener a perpetuidad una planta de tratamiento químico. Es importante que tanto la compañía minera como las autoridades competentes efectúen las pruebas suficientes y apropiadas para garantizar que todos los problemas potenciales hayan sido identificados y tratados.

Este capítulo discute el enfoque del muestreo y predicción, tanto para el potencial de generación de ácido, como para la calidad del agua de drenaje. Aquí se describen las técnicas de muestreo y prueba, consideradas internacionalmente como la tecnología de punta, que son -además- consideradas apropiadas para las condiciones del Perú. Se discute igualmente la interpretación de los datos de pruebas de laboratorio, así como la extrapolación de los resultados a las condiciones de campo.

Sin embargo, debe reconocerse que, en la predicción del DAR, se intenta predecir el comportamiento de sistemas complejos y naturales, que varían de asiento a asiento y hasta de tipo de roca a tipo de roca dentro de un mismo asiento minero. Por tanto, se advierte al lector que no existe un único conjunto de pruebas, o número de muestras, que garantice una predicción absoluta del DAR. No obstante, con una comprensión cabal de los factores físicos y químicos que controlan el DAR, y con la aplicación práctica y científica de las técnicas que aquí se discutirán, se podrá utilizar las técnicas de predicción descritas en este capítulo para identificar el potencial de generación de ácido y para estimar la calidad del agua de drenaje, a corto y largo plazo.

El enfoque actual en la predicción de la calidad de drenaje es semiempírico; se utilizan pruebas de laboratorio para simular las reacciones de generación de ácido en un botadero de desmonte, y para estimar la calidad del drenaje en muestras representativas de roca. El trabajo de laboratorio se conduce utilizando los procedimientos estándar para pruebas de laboratorio y, usualmente, no pretende simular todas las condiciones de campo. Luego, estos datos son

extrapolados a las condiciones de campo, sobre la base de una interpretación de la relación entre valores de pruebas de laboratorio y condiciones de campo, y los factores físicos y químicos que controlan el DAR.

#### 4.1.2 Objetivos de la Predicción

Existen dos objetivos o etapas principales en las pruebas de predicción:

- la caracterización de la roca, para identificar el potencial de generación de ácido y/o de lixiviación; es decir: ¿Cuáles son las características geoquímicas de la roca?; y
- la predicción de la calidad del agua de drenaje; es decir: ¿Cuáles son las características del agua de drenaje?

La calidad del drenaje de agua de cada componente de una operación minera es realmente el factor clave en la evaluación del impacto ambiental de las actividades mineras. Sin embargo, en muchas minas sulfurosas, la calidad del agua de drenaje se determina por su potencial de generación de ácido.

Los objetivos específicos de un programa de pruebas dependen principalmente del tipo de mina y de su etapa de operación. Para una mina nueva, los objetivos de un programa de pruebas de predicción pueden incluir:

- identificación de todo el material potencialmente generador de ácido;
- identificación de todas las fuentes potenciales de contaminantes del agua de drenaje;
- determinación del nivel de cuidado (es decir: ¿Es el DAR un problema de todos los componentes o sólo de alguno de ellos?);
- evaluación de las medidas de control;
- diseño de un plan para el manejo del agua y los desechos; y
- cuantificación del potencial del DAR y calidad estimada del agua de drenaje.

Lo anteriormente descrito también podría ser aplicable para una mina existente. Sin embargo, si se ha identificado el DAR en el asiento, el énfasis de las pruebas de predicción se pondrá en la identificación y aislamiento de las fuentes del mismo; y además en la evaluación de las medidas de control.

El alcance del programa de pruebas de predicción deberá ser suficiente para abarcar todas las fuentes potenciales de contaminantes, pero el nivel de predicción deberá ser el apropiado para la cantidad de información disponible y la naturaleza de los problemas. Si el tiempo lo permite, por lo general resulta más eficiente conducir un programa de predicción por etapas, desarrollando cada conjunto de pruebas a partir de los resultados del conjunto previo. Por lo general, tres etapas de pruebas son suficientes. Esto permite que el investigador identifique los problemas específicos y que focalice sus pruebas, en vez de recolectar un gran número de muestras y preparar un gran número de pruebas que pueden no ser necesarias o que pueden no estar dirigidas a los problemas de DAR específicos.

#### 4.1.3 Enfoque

Este enfoque por etapas para diseñar un programa de predicción es similar, en principio, al enfoque utilizado en la identificación del yacimiento mineral. Se recolecta un gran número de muestras de un área extensa, las cuales se analizan empleando pruebas rápidas, relativamente baratas. A partir de estos resultados, se identifican ciertas zonas para un muestreo más detallado o análisis más extensos.

Los pasos generales en cualquier programa de predicción incluyen lo siguiente:

1. Definición de los objetivos.
2. Identificación de los componentes del lugar y la geología de cada uno de éstos.
3. Diseño e implementación de un programa de muestreo, con la asistencia de geólogos del asiento y los ingenieros de planificación de la mina.

4. Evaluación de las muestras mediante pruebas estáticas para la caracterización de la roca, y pruebas cinéticas para la caracterización de la calidad del agua.

5. Interpretación de los resultados.

6. Identificación de las medidas de control y repetición del muestreo y prueba, si fuese necesario.

En el cuadro 4.1., se resumen los pasos específicos para la evaluación del potencial de generación de ácido y lixiviación de metales en la roca de mina, en relación a la predicción del DAR de todos o algunos de los componentes de un asiento minero.

En el cuadro, también se incluyen sugerencias para el personal y para el ingeniero (coordinador ambiental) que tienen la responsabilidad total del programa, los cuales -por lo común- están involucrados en cada etapa; también se sugiere el periodo necesario para completar cada tarea.

Los pasos compilados en este cuadro se discutirán en los subcapítulos siguientes.

#### 4.2 Comparaciones Geográficas y Geológicas

En las primeras etapas de una evaluación del potencial de DAR, pueden ser provechosas las comparaciones con otras áreas del lugar, o con otras minas en una ubicación geológica y geográfica similar. A pesar de que estas comparaciones no pueden determinar definitivamente el potencial de DAR, pueden proporcionar un indicio que un problema pueda o no presentarse.

Las comparaciones geográficas en el Perú pueden ser útiles para la evaluación de la hidrología del lugar, que determina la cantidad de agua que puede transportar los productos de oxidación desde las rocas oxidadas hasta el ambiente receptor. Estas comparaciones también pueden utilizarse para comparar la factibilidad de diferentes medidas de control.

Las comparaciones geológicas pueden proporcionar una indicación preliminar del potencial de lixiviación y generación de ácido. Este tipo de comparación se basa en el supuesto de que paleoambientes similares originan características geológicas y mineralógicas similares, con similares potenciales de oxidación y de lixiviación de metales, dadas condiciones climatológicas semejantes. En el Perú, la ubicación geológica puede indicar una tendencia a generar acidez, pero no siempre identificará yacimientos que no generarán DAR.

Las comparaciones geológicas pueden ser especialmente útiles si se aplican a un asiento específico, pero se debe tener cuidado al comparar unidades geológicas similares en diferentes asientos. Existe un número de factores, aparte de la naturaleza geológica y mineralógica de la roca, que controlan la velocidad y la magnitud de la lixiviación de metales y la generación de ácido (temperatura, precipitación, temporadas secas/de lluvias), que pueden variar de lugar a lugar. Estas influencias climáticas y topográficas pueden hacer que la comparación de la calidad del agua de drenaje, de un lugar a otro, sea difícil de interpretar.

Para hacer comparaciones en base a la geología y mineralogía del yacimiento o del tipo específico de roca, debe haber una base común de comparación. Dicha clasificación deberá incluir el tipo y la relativa abundancia de mineralización, el proceso y la ocurrencia de sedimentación física, el estado de oxidación de los minerales, el tipo de sulfuros (mineralogía, estructura y tamaño de los cristales) y su distribución o exposición, tipo y distribución de la alcalinidad así como una descripción de la competencia de la roca.

#### 4.3 Tipos de Pruebas

Existen tres tipos principales de pruebas que se utilizan para la predicción; ellas se discutirán en los siguientes capítulos, y son:

- pruebas estáticas para determinar las propiedades geoquímicas del material;
- pruebas de extracción del lixiviado para determinar el total de componentes solubles; y
- pruebas cinéticas para determinar el comportamiento geoquímico del material a través del tiempo.

En años recientes, se han investigado considerablemente los métodos de prueba para la predicción del DAR, originando la publicación de varios manuales. La discusión que se presenta a continuación, ha sido adaptada de dos de las más recientes publicaciones (DIAND, 1992; Saskatchewan MPCB, 1991). Al final de este capítulo, se proporcionarán referencias adicionales en donde se encuentran descripciones detalladas de los procedimientos de prueba; además, dichas referencias están a disposición en la biblioteca de la DGAA.

#### 4.4 Pruebas Estáticas

##### 4.4.1 Propósito

El objetivo de la prueba estática es caracterizar el potencial de generación de ácido de una muestra. Es el primer paso en todo programa de pruebas para determinar el potencial DAR. Estas pruebas se conducen de manera simple, rápida y con costos relativamente bajos. Muchas de estas pruebas pueden utilizarse para caracterizar el material y, a partir de ello, para seleccionar muestras que servirán para pruebas (cinéticas) posteriores.

Una prueba estática define el balance entre los minerales potencialmente generadores de ácido y aquellos potencialmente consumidores de ácido en una muestra. Los minerales que producen ácido son, por lo general, minerales sulfurosos reactivos.

Los minerales que consumen ácido son principalmente carbonatos, si bien los hidróxidos, silicatos y arcillas también pueden proporcionar potencial de neutralización. En teoría, una muestra será generadora neta de ácido sólo si su potencial para la generación de ácido excede a su potencial de neutralización.

Las técnicas estáticas de predicción son útiles sólo para predicciones cualitativas del potencial DAR; no pueden utilizarse para predecir la calidad del agua de drenaje. Como su nombre lo implica, estas pruebas no están diseñadas para tratar las características geoquímicas que dependen del tiempo, las cuales controlan la calidad del agua de drenaje. Se requiere de las pruebas cinéticas para determinar la velocidad y magnitud de la oxidación y la generación de ácido, así como para la predicción de la calidad de agua.

##### 4.4.2 Procedimiento de Prueba

Los principales pasos en las pruebas estáticas son:

- . análisis del contenido metálico de la muestra sólida;
- . medición del pH en pasta
  - . determinación del contenido total de azufre y de las especies sulfurosas;
- . titulación para la determinación del potencial de neutralización.

En esta etapa, con frecuencia, también se efectúan análisis geoquímicos de rocas enteras o análisis elementales en muestras seleccionadas, en combinación con los análisis mineralógicos. Sobre la base de la comprensión teórica y de pruebas en muestras similares, puede ser posible estimar, a partir de estas pruebas, el potencial relativo de liberación de metales; por ejemplo, si hay presencia de productos secundarios de intemperismo, los cuales se sabe que son solubles en ambientes ligeramente alcalinos o ácidos, la muestra podría generar potencialmente drenaje contaminado.

Inicialmente, se mide el pH en pasta de la muestra, para determinar si antes del análisis ha ocurrido generación de ácido. Por lo general, si el valor del pH es mayor que 8, la muestra probablemente contenga carbonatos reactivos; si es menor que 5, probablemente haya habido generación de ácido en la muestra, o en el material circundante.

En una muestra, se mide el contenido total de azufre y las especies sulfurosas; luego, se calcula la acidez potencial máxima en la forma de ácido sulfúrico. Por lo común, el total de azufre se analiza utilizando un horno para determinar azufre tipo Leco. Las especies de azufre se precisan usando diferentes procedimientos de digestión y precipitación (APHA, 1985).

El potencial de neutralización se determina utilizando un procedimiento de titulación básico en una muestra previamente acidificada. En primer lugar, se realiza una "prueba rápida" para estimar la cantidad y la fuerza del ácido necesario para reaccionar con todos los materiales consumidores de ácido presentes en la muestra. En el procedimiento EPA (Sobek et al, 1978), se trata la muestra con un excedente de ácido clorhídrico estandarizado, luego se la calienta para asegurar la reacción completa. Se ha sugerido una modificación del procedimiento, en la cual la muestra no se calienta, sino que se agita por 24 horas. Después de que se haya completado la acidificación, se titula el ácido que no ha sido consumido con una base estandarizada a un pH 7 (por lo general, en dos o tres etapas), luego se calcula el equivalente de carbonato de calcio del ácido consumido. Un procedimiento alternativo, la Prueba Inicial de Investigación B.C., es la titulación directa de ácido sulfúrico de la muestra, desde un pH natural hasta un punto de viraje de pH 3,5.

Se han desarrollado muchos procedimientos de pruebas estáticas para determinar las proporciones de los minerales generadores de ácido y de aquéllos neutralizadores. Los procedimientos a los que se hace referencia en este documento son:

- . Prueba de Balance Acido-Base (método Sobek o EPA)
- . Prueba Modificada de Balance Acido-Base

Algunas otras pruebas, usadas en el pasado o que actualmente se encuentran en desarrollo, son:

- . Prueba Inicial de Investigación B.C.
- . Método Modificado de Oxidación con Peróxido de Hidrógeno
- . Prueba de Generación Neta de Acido

El procedimiento para pruebas estáticas más comúnmente usado es el de ácido-base (Sobek), o el procedimiento modificado para prueba de balance ácido-base (BAB). Cada uno de ellos determina los minerales potencialmente generadores de ácido (expresados como potencial de acidez máxima, PA) y los minerales potencialmente consumidores de ácido (expresados como potencial de neutralización PN).

#### 4.4.3 Resultados

En el cuadro 4.2, se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos por las pruebas de balance ácido-base.

El pH en pasta de la muestra proporciona una indicación de la acidez total almacenada en ésta y la extensión en la que ha ocurrido la oxidación en la muestra, antes del análisis.

#### Azufre

El contenido de azufre de la muestra indica la acidez potencial total. Usualmente, se expresa como el PA o potencial de ácido y se puede calcular por:

$$PA = \% \text{ de azufre} \times 31.25$$

El factor 31,25 se basa en la acidez generada, según se derivó por estequiometría química, para la oxidación completa de la pirita y la subsiguiente hidrólisis del Fe<sup>3+</sup> generado. Por tanto, este factor relaciona la acidez total producida con la alcalinidad equivalente como CaCO<sub>3</sub> requerida para la neutralización.

En la prueba inicial de investigación B.C., el PA se indica como unidades de masa de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por 1,000 unidades de masa de la muestra (por ejemplo, kg por tonelada); en tanto que el resultado se expresa en términos del equivalente en kg de CaCO<sub>3</sub> por tonelada de muestra, para los procedimientos, Sobek y modificado, de prueba de balance ácido-base.

Sin embargo, es importante reconocer que el análisis del azufre total incluye todas las especies sulfurosas, comprendidos los sulfatos. El cálculo de la acidez a partir del contenido total de azufre puede sobreestimar la cantidad que realmente es generadora de ácido, ya que el azufre, presente en la forma de sulfato, no contribuirá a la generación de ácido. Si el contenido de azufre es mayor que 0.05%, puede determinarse la especie sulfurosa o el contenido de sulfuro reactivo; el contenido de sulfuro puede usarse para estimar la acidez potencial. Generalmente, se determina la especie de azufre. Por tanto, para la mayoría de pruebas BAB, un cálculo más realista del PA deberá basarse sólo en el azufre como sulfuro; es decir:

$$PA = \% \text{ de azufre como sulfuro} \times 31.25$$

#### Potencial de Neutralización

El potencial de neutralización (PN) se mide por titulación de la muestra y se calcula a partir de la masa de la muestra y el volumen y normalidad del ácido y la base añadidos. El PN se expresa en términos del equivalente en kg de CaCO<sub>3</sub> por tonelada de muestra.

El potencial de neutralización neta (PNN) de una muestra está dado por:

$$PNN = PN - PA$$

Además, la proporción entre las especies que consumen ácido y aquéllas que lo generan se calcula por PN/PA.

Los resultados de cada prueba de balance ácido-base deberán incluir:

- . descripción de la muestra
- . pH en pasta
- . análisis de azufre - incluyendo el de especies de sulfuros, si se llevó a cabo
- . cálculo de PN, PA y PNN
- . proporción de PN/PA

Los procedimientos detallados del método estándar U.S. E.P.A., incluyendo los cálculos y la presentación de resultados, se encuentran disponibles en la literatura, con referencia específica a "Field and Laboratory Methods Applicable to Overburden and Minesoils", EPA-600/2.78-054, (1978).

La descripción de este método y del modificado, así como de otros métodos y opciones de predicción estática, están disponibles en el Draft Technical Guide, (B.C. AMD Task Force, 1989); y se describen con mayor detalle en el Prediction Test Procedure Manual (CANMET-MEND, 1990).

#### 4.4.4 Interpretación de Pruebas Estáticas

La interpretación de los resultados de pruebas estáticas se basa en la diferencia -y en la proporción- entre el potencial de acidez y el de neutralización. La diferencia entre la acidez potencial máxima y el potencial de neutralización bruta nos da el potencial de neutralización neta.

Por eso, las pruebas estáticas se refieren a la composición geoquímica de una muestra, y no a la velocidad ni a la magnitud de las reacciones que pueden producir o consumir acidez. Por eso, los procedimientos para pruebas estáticas son igualmente aplicables en cualquier región climática o geológica. Sin embargo, debería considerarse que la experiencia es importante en la conducción de cualquiera de estos procedimientos de prueba; así como se requiere de cierto juicio para seleccionar la normalidad de ácido y base en los procedimientos de balance ácido-base. Se deberían contratar los servicios de laboratorios experimentados para todo programa de pruebas.

La interpretación tradicional de los resultados de pruebas BAB se basaba en el potencial de neutralización neta, según se muestra en la figura 4.1. En teoría, una muestra es generadora

netas de ácido si su PNN es menor que cero. Sin embargo, la experiencia demuestra que valores de PNN entre -20 y +20 toneladas de  $\text{CaCO}_3$ /1000 toneladas de muestra (-2 a +2% de  $\text{CaCO}_3$ ) pueden ser generadores de ácido. Este rango de incertidumbre puede atribuirse a errores inherentes a los procedimientos de prueba, a las conversiones a acidez total, a error analítico y al tamaño pequeño de la muestra.

Experiencia más reciente demuestra que, además del valor PNN, también debería considerarse la proporción entre PN y PA, según se muestra en la figura 4.2. Las muestras con un potencial de neutralización de 2 a 3 veces mayor que su potencial de acidez, pueden ser consideradas como consumidoras de ácido. Es probable que las muestras con una proporción menor que 1:1 (es decir:  $\text{PNN} < 0$ ) generen acidez. Sin embargo, como pauta general, las muestras con proporciones dentro del rango de 1:1 a 3:1 no son ni claramente generadoras ni consumidoras de ácido, debido a otros factores que influyen en el potencial de generación de ácido. En relación a los relaves, generalmente se acepta una proporción de 1,2:1 para definir a la roca que no genera ácido.

#### 4.4.5 Ejemplo de la Importancia del Muestreo Representativo y su Interpretación

El muestreo representativo es la parte más crítica, tal vez la más difícil, de un programa de pruebas. En la figura 4.3, se ilustra un ejemplo de muestreo inapropiado para una cierta mina, cuyos resultados BAB se incluyen.

En la figura, se muestran los resultados de las pruebas BAB en muestras "representativas" de roca de mina para cada año entre 1986 y 1990. Sobre la base de la primera serie de muestras, se concluyó que la roca de mina no generaba ácido y no se implementaron medidas de control del DAR. El muestreo de los años sucesivos indica claramente un "cambio" en el potencial de DAR. Ahora, la mina se enfrenta a un problema de generación de ácido.

Si el programa original de muestreo hubiese reconocido la variabilidad de la roca, los cambios en el contenido de azufre cerca de la zona del mineral y si hubiese sido diseñado para ser más representativo de toda la zona de explotación, entonces se habría podido implementar la tecnología de control apropiada y se habrían evitado o reducido los problemas actuales.

### 4.5 Pruebas de Extracción

#### 4.5.1 Propósito

Las pruebas de corto plazo de extracción de lixiviado se utilizan para determinar los constituyentes fácilmente solubles en una muestra. Muchos tipos de roca tienen constituyentes fácilmente solubles, disponibles para la lixiviación inmediata, totalmente independiente de cualquier generación de ácido que pudiera ocurrir.

Al exponerse al aire, comenzará la oxidación de todo producto oxidable expuesto, contenido en el testigo de perforación, muestras por lotes o roca minada. La velocidad de oxidación y la acumulación de productos de oxidación dependerá de las condiciones de disponibilidad de aire y agua y de las condiciones de lixiviación a las cuales están sometidas las muestras o roca.

#### 4.5.2 Procedimientos de Prueba

Con los años, se han introducido muchos procedimientos de pruebas de laboratorio en Canadá y los Estados Unidos. Todos ellos tienen el propósito de cuantificar la movilidad de los contaminantes y, mediante ello, permitir la clasificación del material con el fin de escoger el método adecuado de disposición y contención de desechos. Dichas pruebas presentan una infinidad de nombres, tales como el Procedimiento Especial de Extracción de Desechos B.C., TCLP, EPA 1312, ASTM 3987, Prueba WET y así sucesivamente. A pesar de que el objetivo de estas pruebas es el mismo, el procedimiento, y por tanto la relevancia de los resultados de la roca de mina, varía de prueba a prueba. Entre las pruebas que se utilizan con mayor frecuencia se encuentran:



- ASTM D3987 extracción con agua destilada;
- Procedimiento Especial para Extracción de Desechos B.C. (SWEPE), que utiliza ácido acético como extractante;
- U.S. EPA 1312, procedimiento que utiliza ácido nítrico/sulfúrico como extractante;
- U.S. EPA 1312 o prueba de lixiviado TCLP, que utiliza extractante derivado del ácido acético.

Existen muchas variaciones en el procedimiento. Por lo común, la muestra se combina con agua o un ácido débil en una proporción de 1:20 y se agita suavemente para mantener los sólidos en suspensión por 18 a 24 horas. El pH de la solución puede controlarse o ajustarse periódicamente y el lixiviado final puede analizarse por parámetros tales como pH, Eh, conductividad, sulfatos, alcalinidad, acidez y metales. Estas pruebas proporcionan una indicación de la carga fácilmente soluble en un material, así como la magnitud de la generación de ácido que ya ha ocurrido en la muestra. Esta carga, a corto plazo, constituiría un problema para la calidad del agua que se libera de la roca de mina inmediatamente después de colocarla en el botadero de desmonte y que está expuesta a lixiviación por precipitación. La cuantificación de la carga inicial almacenada también es necesaria para la interpretación de los resultados de las pruebas cinéticas.

La mayoría de estudios que evalúan los méritos y la utilidad relativa de cada prueba, se han concentrado en las aplicaciones para desechos peligrosos. En la actualidad, parece ser que la prueba EPA 1312 (diseñada para suelos y desmonte de la mina) y un procedimiento de extracción en frasco de agitación con agua del emplazamiento o agua destilada, similar a la ASTM 3987, son las pruebas de mayor uso.

#### 4.5.3 Resultados

Los resultados de las pruebas de extracción generalmente se presentan en términos de la concentración de cada elemento en la solución, así como en términos del porcentaje total extraído del sólido (total de mg en solución/total de mg en sólido x 100%). A continuación, se presenta un ejemplo de las dos pruebas de extracción realizadas en muestras con resultados BAB similares, pero con cantidades muy diferentes de productos almacenados. En una prueba cinética, podría resultar agua de calidad muy diferente de cada muestra: la muestra 1 parece no ser generadora de ácido, mientras que la muestra 2 produce drenaje ácido. Las diferencias de estas dos muestras, que tenían contenidos similares de PN, PA (en base a azufre total) y contenidos metálicos, fueron las siguientes:

- contenidos de azufre como sulfato;
- grado en que ocurrió oxidación en cada muestra; y
- tipo de sulfuros: una muestra contenía pirrotita y calcopirita, mientras que la otra contenía principalmente calcopirita, que es de oxidación más lenta.

#### 4.6.1 Introducción

El objetivo de las pruebas estáticas es identificar las unidades geológicas de un asiento con potencial para generar acidez neta; así como cuantificar el contenido de metales que pueden lixiviarse. El objetivo de las pruebas cinéticas es confirmar el potencial de generación de ácido y predecir la calidad del agua de drenaje, a corto y largo plazo, en el campo. Las pruebas cinéticas geoquímicas comprenden someter a intemperismo a las muestras, bajo condiciones controladas de laboratorio o en el asiento, con el fin de confirmar el potencial para generar acidez, determinar las velocidades de generación de ácido, oxidación de sulfuros, neutralización y agotamiento de metales y, además, con el fin de probar las técnicas de control/tratamiento.

Las pruebas cinéticas geoquímicas constituyen la tercera etapa de un programa de predicción o de evaluación del asiento minero. Después de que se hayan clasificado la geología y el

desarrollo y la producción de desechos, y luego de la conclusión de las pruebas estáticas, se pueden seleccionar las muestras para las pruebas cinéticas. Mientras que las pruebas estáticas proporcionan información sobre las características de la roca y el potencial total para la generación de ácido, independientemente del tiempo; las pruebas cinéticas definen explícitamente las velocidades de reacción tanto para la disolución de metales, como para la generación de ácido y lixiviación, a través del tiempo y bajo condiciones específicas.

Como resultado de ello, las pruebas cinéticas son más caras y tardan más. Por eso, los objetivos y metas de las pruebas cinéticas deben definirse muy bien, con el fin de desarrollar un programa de pruebas eficiente y efectivo. Sin embargo, si bien las pruebas cinéticas indican efectivamente el comportamiento geoquímico, dependiente del tiempo, de una muestra por un periodo de semanas o meses, la predicción de la calidad del agua deberá realizarse para un período de años en el futuro. La predicción de largo plazo de la calidad del drenaje sólo será posible a través de modelos matemáticos cuantitativos que puedan extrapolar con confiabilidad los resultados, más allá del momento de las pruebas.

La naturaleza de las muestras y el número de pruebas que se requiere, dependerán de los objetivos del programa. Las pruebas de predicción cinética en una mina nueva se llevan a cabo para:

- validar los resultados de las pruebas estáticas;
- comparar el comportamiento de lixiviación de diferentes tipos o clases de roca de mina;
- predecir la calidad del agua de drenaje de tipos de roca y botaderos;
  - seleccionar o confirmar las opciones de disposición y control;
  - representar las condiciones del lugar para determinar los factores que controlan el DAR y proporcionar datos primarios para la confección del modelo.

En una mina existente, el programa de predicción y evaluación puede utilizarse para predecir el potencial de generación de contaminantes que podría ocasionar la explotación minera posterior; así como para predecir:

- la extensión de la oxidación y los productos de oxidación almacenados en el botadero, con la finalidad de estimar el potencial de lavado y liberación de contaminantes a largo plazo, incluso sin generación posterior de ácido y sin la incorporación de ninguna medida de control;
- la efectividad de las medidas de control;
- la calidad del agua de drenaje.

Un programa de predicción bien diseñado puede medir no sólo la magnitud de un problema de migración de contaminantes ya existente, sino también el potencial y la velocidad futura de la contaminación. Esta información es necesaria para la determinación de los requerimientos de cierre y sus costos, así como para mejorar los programas de control.

Una vez que se hayan establecido los objetivos del programa, se pueden seleccionar las muestras para las pruebas cinéticas.

Usualmente, estas muestras incluirán:

- . muestras que tienen un componente fácilmente soluble (según resultados de las pruebas de lixiviación estática o de corto plazo);
- muestras con proporciones PN:PA entre 3:1 y 1:1, rango en el cual las
- muestras no se definen claramente como generadoras o consumidoras de ácido;
- muestras consumidoras de ácido para probar el potencial de consumo de ácido; y
- muestras generadoras de ácido seleccionadas para evaluar la liberación de contaminantes y las medidas de control.

#### 4.6.2 Procedimiento de Prueba

Existen varias técnicas que se utilizan, o cuyo uso se propone, en las pruebas cinéticas:

- prueba de confirmación de Investigación B.C.;
- prueba de intemperismo en frasco de agitación;
- prueba de extracción soxhlet;
- pruebas de celda de humedad;
- pruebas de columna de humedad;
- pruebas de lixiviación en columna; y
- parcelas de prueba de campo.

Las últimas cuatro pruebas son las que más frecuentemente se usan en las pruebas cinéticas. Las diferencias entre ellas están dadas por el tamaño de la prueba y la velocidad y cantidad de agua utilizada para el acarreo. Cada una tiende a ser utilizada para un tipo diferente de predicción, como se discutirá en los subcapítulos que siguen. Tanto las pruebas controladas a

pequeña escala (por ejemplo, las celdas de humedad), como las pruebas de intemperismo a gran escala, realizadas en el lugar, han sido utilizadas para determinar la generación de ácido y la calidad del agua de drenaje. Las pruebas controladas tienen la ventaja de mantener condiciones constantes conocidas, pero no son necesariamente representativas de las condiciones de campo.

Las parcelas de prueba de campo pueden considerarse más representativas que las pruebas controladas, debido a las condiciones climáticas naturales bajo las cuales se conducen las pruebas; sin embargo, en vista de que los resultados varían a medida que las condiciones climáticas cambian, la interpretación y extrapolación de los resultados es más complicada.

Hay algunas pruebas para las cuales se han establecido y documentado procedimientos estándar. En el subcapítulo que sigue se resumirán estos procedimientos y se anotarán las referencias apropiadas. Sin embargo, hay algunas pruebas que han sido modificadas en términos de procedimientos o interpretación de resultados, éstas se discutirán en mayor detalle.

#### 4.6.2.1 Prueba de Celda de Humedad

##### Procedimiento

Las pruebas convencionales de celda de humedad son pruebas de laboratorio de pequeña escala, diseñadas para simular los procesos de intemperismo geoquímico para una muestra específica de roca, bajo condiciones de oxidación óptimas, aunque no necesariamente representativas de las condiciones de campo. La prueba es conducida en un aparato especial en el que se pueden controlar temperatura, flujo de aire y humedad. Los productos de oxidación son periódicamente lavados y sometidos a análisis. Los datos de las pruebas de celda de humedad pueden utilizarse para evaluar la velocidad relativa de liberación de productos de oxidación, el grado potencial del intemperismo y para estimar el tiempo que debe pasar para la generación de ácido.

La muestra se coloca en una cámara cerrada, de tubos de PVC de aproximadamente 20 cm de diámetro, o bien en un recipiente plástico rectangular. La muestra puede permanecer en el fondo de la celda o colocarse en una criba, suspendida del fondo de la celda, para permitir el flujo de aire hacia arriba a través de la muestra, como se ilustra en la figura

4.4. El procedimiento de prueba se basa en ciclos semanales en los cuales la muestra se somete a ciclos alternados de aire seco y húmedo (tres días cada uno) y un día de lavado con agua y evaluación del lixiviado. Existe cierto número de variaciones de esta técnica que pueden realizarse inoculando un cultivo bacteriano activo (*thiobacillus ferrooxidans*), dirigiendo aire húmedo ascendente a través de la celda y modificando los respectivos volúmenes relativos de sólido/agua de lavado y frecuencia del muestreo. Los parámetros típicos que se controlan incluyen el pH, potencial redox, acidez, alcalinidad, sulfatos, conductividad y metales disueltos.

El tiempo de duración de la prueba varía según los resultados del lavado con agua semanal y el objetivo de la prueba; se considera que el tiempo mínimo de prueba es de 20 semanas, dependiendo del intervalo de retardación pero, con frecuencia, se requieren periodos de 30

semanas o más para definir la composición química del agua. El intervalo de retardación hasta que se evidencie la producción de ácido, dependerá del potencial de neutralización neta de la muestra, del tamaño de la partícula y de la disponibilidad de los carbonatos y minerales sulfurosos. Inicialmente, la velocidad de liberación de sulfatos (de la oxidación de los sulfuros) y la liberación de alcalinidad y acidez proporcionan una indicación de la etapa de desarrollo del DAR y, por tanto, el tiempo de retardación hasta el establecimiento de la oxidación biológica, rápida, y la generación de ácido. A medida que el pH disminuye por debajo de 5.5., los cambios en otros parámetros se harán más rápidos; la conductividad y el potencial redox generalmente aumentan y se hacen más evidentes los niveles elevados de acidez y de metales disueltos.

## Resultados

Las pruebas no contemplan condiciones específicas del lugar, y solo proporcionan información semicuantitativa sobre la calidad del agua a predecirse. El procedimiento se conduce en muestras trituradas o molidas; en consecuencia, no hace referencia a la influencia del tamaño de la partícula o la relativa distribución espacial de los minerales sulfurosos o básicos, particularmente de la roca de mina. Estas pruebas generalmente se consideran más representativas del comportamiento de material finamente triturado, bien mezclado y esencialmente homogéneo, como los relaves de planta, pero no son representativos de roca gruesa (roca de mina, desechos, paredes de canteras o roca subterránea). Existe además cierta preocupación por que el lavado semanal completo de la muestra no sea representativo de las condiciones de campo, excepto en ciertos climas específicos y condiciones de campo, y porque puedan alterar significativamente el desarrollo de los ambientes locales de pH bajo y el almacenamiento y acarreo naturales de los productos de oxidación. Los ambientes locales que se desarrollan en la celda de prueba, así como el efecto físico y químico del almacenamiento y lavado, tienen una gran influencia en la generación de productos ácidos y en la calidad del drenaje en el campo.

Al final de este capítulo, se discutirán los resultados de pruebas específicas.

### 4.6.2.2 Columna de Humedad

El objetivo de este método de prueba es proporcionar un método de laboratorio que prediga con mayor precisión la calidad del agua de drenaje (no sólo el potencial de generación de ácido) de roca gruesa, incluyendo botaderos de minas subterráneas y de minas de tajo abierto, pilas de lixiviación y paredes de cantera. La prueba simula con mayor exactitud las condiciones que controlan el DAR en el campo, entre otras:

- la distribución representativa del tamaño de partícula del material en evaluación, que puede ser escalada para una distribución (de la partícula con diámetro -10 cm) en el botadero de desmonte;
- la variabilidad de mineralización de sulfuro y carbonato, la exposición del área superficial y la distribución física presentes en el botadero;
- la geoquímica de zonas localizadas de roca y su variabilidad en la escala representada por partículas de roca más grandes (en una escala de pocos centímetros o más);
- las pruebas representativas de la naturaleza física y geoquímica del botadero propuesto (por ejemplo, la exposición de área superficial por tamaño de partícula, la exposición mineralógica del área superficial), presente a lo largo de las rutas de flujo discretas, sujetas a variaciones en el flujo de filtración y que son características de lo que ocurriría en el campo;
- la predicción de la calidad del agua de drenaje de un botadero de desmonte, considerando:
- las zonas individuales y los tipos de roca en el botadero,
- las reacciones a lo largo de la ruta del flujo de drenaje, incluyendo la concentración o carencia de productos DAR,
- la calidad de drenaje resultante de la filtración a través de una combinación de zonas individuales en el botadero, y
- el rango estacional de las concentraciones que resultan de las velocidades de flujo variadas, períodos húmedos y secos y almacenamiento de productos de oxidación en el botadero; y

- el diseño de pruebas para establecer la naturaleza de consumo/generación de ácido del material y el suministro de datos para la predicción de la calidad del drenaje en un periodo razonable de tiempo.

El equipo que, a la fecha, ha sido desarrollado y utilizado para estas pruebas, generalmente consiste en una pequeña columna, de aproximadamente 30 cm de diámetro, para acomodar el material con una distribución del tamaño de partícula de -10 cm. El material reposa sobre una placa perforada para permitir el drenaje; por los lados o fondo de la celda se introduce aire. Las columnas de humedad deberán conducirse bajo las mismas condiciones de temperatura que las celdas de humedad convencionales, con un flujo constante de aire humedecido. En la figura 4.4. se muestra un ejemplo de esta prueba.

El ciclo de lavado con agua se limita a aproximarse al nivel de la precipitación, con el fin de eliminar el enjuague completo de la muestra con cada ciclo y para eliminar el almacenamiento natural de los productos de oxidación entre las rutas de flujo o alrededor de ellas. El lavado deberá realizarse mediante agua de alimentación por goteo, por periodos prolongados, para simular infiltración y flujo a través de botaderos. El volumen de agua de lavado se limita a las velocidades aproximadas, estimadas para el campo (por metro cuadrado), aunque puede ser incrementado con el objeto de proporcionar una muestra efluente adecuada para las pruebas. Por comparación, las pruebas convencionales de celdas de humedad se conducen en un ciclo semanal, con ciclos alternados de tres días de aire seco, tres de aire húmedo y luego un lavado completo de los sólidos con agua destilada. En la celda convencional, este lavado pretende extraer completamente todos los productos de oxidación, y altera significativamente el ambiente químico del espécimen de prueba.

El muestreo de agua se realiza semanalmente, pero el análisis completo de las muestras (incluso el ICP del lixiviado) puede ser necesario solo quincenalmente en la etapa inicial de las pruebas de largo plazo. El muestreo semanal podrá ser necesario una vez que el pH haya descendido por debajo de 5, o cuando se hagan evidentes cambios más rápidos en otros parámetros.

#### 4.6.2.3 Prueba de Lixiviación en Columna

Las columnas de gran escala, o lisímetros, también se utilizan para simular el intemperismo geoquímico en la predicción del potencial de generación de ácido y la calidad del agua de drenaje. Para estas pruebas, se requiere más muestra que para las columnas convencionales o de humedad. Las columnas también pueden emplearse para probar opciones de desecho y medidas de control alternativas.

Conforme se describe en la Draft Acid Rock Drainage Technical Guide (SRK et al., 1989), las pruebas de columna se conducen utilizando una variedad de materiales ad hoc, como plástico PVC, que se llenan con las muestras hasta un cierto nivel o con un cierto peso, en base a los objetivos específicos del programa. En general, se coloca una cantidad conocida del material en la columna y se hace correr agua destilada o solución acuosa, a través de la muestra, o se empoza en la parte superior de ésta y se permite que drene con el tiempo. Periódicamente, se recolectan muestras de agua, del agua de lavado o de la porción sobrenadante, las cuales se analizan químicamente. También, se pueden instalar ventanas de muestreo a intervalos, a lo largo de la columna, para muestreo intermedio.

Algunas variaciones son:

- ciclos húmedos/secos;
- grado de saturación de agua en la muestra;
- napa freática fluctuante o condiciones de inundación;
- velocidad de lavado de la muestra;
- agua forzada hacia arriba a través de la muestra;
- inoculación de bacterias;
- un solo paso o recirculación del lixiviado; y
- tipos de muestras, efecto del mezclado.

La interpretación y presentación de resultados de las pruebas de columna es similar a las pruebas de columna de humedad. Usualmente, el lavado de la muestra se conduce en la forma de flujo constante y se muestrea sobre una base temporal (diaria o semanalmente), en relación a la velocidad del flujo o volumen del lixiviado. Los resultados deberán interpretarse conforme a ello. También se pueden controlar el oxígeno y el dióxido de carbono disueltos y/o gaseosos, dependiendo de la naturaleza de la prueba.

#### 4.6.3 Procedimientos para la Conducción de Pruebas Cinéticas

El paso inicial en una prueba cinética es la definición de las características adicionales del material, a aquéllas evaluadas en las pruebas estáticas. Estas características son importantes para la interpretación de los resultados de las pruebas cinéticas y para la predicción de la calidad del agua de drenaje. Antes de iniciar una prueba cinética, se recopilará la siguiente información

clave:

- tipo de roca de mina
- mineralogía
- BAB
- distribución del tamaño de partícula

Durante la prueba, deberá observarse tanto en el lixiviado -o solución de lavado semanal- como en la roca, lo siguiente:

- química del lixiviado
- color del lixiviado
- precipitados en la celda o en el lixiviado

Los análisis químicos del lixiviado, que deberán conducirse por cada prueba, varían con los objetivos específicos del programa de pruebas y la naturaleza y mineralogía de las muestras probadas. Todos los programas de pruebas deberán diseñarse y conducirse consultando con los geólogos encargados. El programa de muestreo y los ensayos iniciales de las muestras (del testigo de perforación y/o muestreo por lotes) deberán proporcionar una indicación de los metales preocupantes, como mercurio o arsénico, los cuales pueden necesitar ser considerados con mayor detalle de lo que sería un programa estándar.

El conjunto de análisis generalmente incluiría pero no se limitaría a:

- pH, Eh
- alcalinidad, acidez
- conductividad
- sulfatos
- metales disueltos por ICP o AA

Al finalizar cada prueba cinética, se deberá lavar completamente la columna, con el objeto de retirar cualquier producto almacenado, y se analizará la solución. También, deberán retirarse los sólidos y muestrearse para su análisis. Al concluir la prueba, así como al inicio de ella, deberán realizarse análisis similares, como por ejemplo:

- química de la solución de lavado final
- características BAB
- distribución del tamaño de partícula
- mineralogía especialmente de precipitados, material cubriente de las celdas.

El cuadro 4.4 proporciona un resumen de los parámetros comunes que se miden por BAB, pruebas de celda y columna de humedad. Se enumeran los análisis y las mediciones estándar que deberían conducirse en todas las muestras por cada prueba. También, se han

recomendado otros procedimientos que pueden no ser necesarios en todas las muestras, o en todos los programas de pruebas, pero que deberían tenerse en cuenta.

#### 4.6.4 Interpretación de los Resultados

Los resultados de los análisis semanales del agua de lavado del lixiviado indicarán los cambios en la solución y en la química del sólido, ocurridos a partir del lavado anterior. Las velocidades y secuencia de oxidación relativas serán indicadas por los cambios en el pH y conductividad, así como por los cálculos de velocidades de producción de sulfatos, acidez, alcalinidad y metales disueltos, calculados en términos de peso y/o área superficial de la muestra. Entre la información que deberá tabularse por cada ciclo, se encuentra la siguiente:

- descripción de la muestra, número de ciclo, duración y volumen de lixiviado;
- lecturas o concentraciones de todos los parámetros medidos;
- acidez y alcalinidad calculadas (equivalente en mg/L de CaCO<sub>3</sub>), producción de sulfato (mg/L de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>);
- producción acumulada de acidez, alcalinidad y metales (mg/kg o mg/kg/m<sup>2</sup>); y
- producción acumulada de sulfato (mg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/kg o mg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/kg/%S/m<sup>2</sup>).

2) Depende del número de muestras enviadas

3) Periodo de prueba de 10 semanas (\$90/semana adicional)

4) Periodo de prueba de 26 semanas(\$105/semana adicional)

Por lo general, esta información también se presenta gráficamente como una función de tiempo o número de ciclo, para indicar las tendencias y velocidades de producción. Se deberá tener cuidado al evaluar los ciclos iniciales de lavado, cuando la muestra contenga productos de oxidación almacenados o una carga fácilmente soluble, donde ha habido un tratamiento previo de la muestra o se han evaluado medidas de control (por ejemplo, cubierta de agua, adición alcalina), puesto que estos primeros ciclos pueden reflejar el lavado y barrido de los productos almacenados y no las tendencias de largo plazo en la generación de ácido y lixiviación contaminante.

La figura 4.5 muestra ejemplos de curvas "típicas" para las diferentes fuentes de contaminantes. Estas son fundamentales para la interpretación de los resultados de pruebas cinéticas, dado que los procedimientos de prueba son los mismos para la evaluación de la calidad del agua de drenaje en relación a la lixiviación de metales y al DAR. En el control del agua de drenaje proveniente de pilas de roca, se podría observar un patrón similar. Por lo común, en la lixiviación de metales puede haber:

- un alto lavado inicial de contaminantes en los 2 a 5 primeros reemplazos de volúmenes de porosidad;
- una carga que disminuye con el tiempo y cuyo periodo varía conforme al contenido de metal, velocidad de lavado y solubilidad; y
- un periodo más prolongado de permanencia de los metales por su escurrimiento en la columna de lixiviación, si se compara con una mayor velocidad por lavado (por ejemplo, un volumen de porosidad diaria o semanal). En el DAR, puede haber:
- valores de sulfatos y acidez que se incrementan gradualmente, asociados a alcalinidad que disminuye;
- niveles de hierro que aumentan gradualmente y pH que disminuye, quedando un poco por debajo de los picos de sulfatos; y
- metales disueltos en aumento, en el drenaje.

Se espera que, en muchos asientos, la calidad del agua de drenaje sea controlada por ambos mecanismos. La medida en que predomine uno u otro, dependerá de la naturaleza de la roca y el tiempo.

La predicción del potencial de generación de ácido a largo plazo en una muestra, así como de su calidad potencial de agua, a partir de la interpretación de los resultados de las pruebas de celda de humedad, puede resultar complicada y requiere cierta experiencia con las pruebas de DAR. En esta guía, se proporciona una discusión de la interpretación de resultados de las

pruebas cinéticas; dicha discusión constituye la base para las pautas generales -que se presentan a continuación- que servirán para la interpretación de los datos obtenidos de las pruebas.

pH A valores  $> 5.0$ , la muestra no es considerada fuertemente generadora de ácido y/o la química es dominada por la liberación de alcalinidad del material calcáreo, durante el periodo de muestreo. A valores de  $3.0$  a  $5.0$ , la muestra genera ácido, a pesar de estar ocurriendo cierta neutralización de pH. La oxidación biológica se vuelve más importante (bacteria oxidante del hierro). Si se obtienen valores de pH  $< 3.0$ , la muestra es fuertemente generadora de ácido, el papel del thiobacillus ferrooxidans puede ser significativo.

Sulfato El sulfato es un subproducto directo de la oxidación completa del sulfuro y puede ser indicativo de la velocidad de oxidación de sulfuros y generación de ácido. Dependiendo del procedimiento de prueba, existe un número de factores que debe ser incorporado en las interpretaciones.

Por ejemplo: que todo el azufre oxidado es lavado y barrido de la muestra y que las restricciones de solubilidad no originan precipitación de yeso u otras sales de sulfato.

Los análisis elevados de sulfato pueden indicar la presencia de fuerte generación de ácido, a pesar de que el pH es neutro debido a la liberación de alcalinidad de los carbonatos. Un aumento en las concentraciones de sulfato y la velocidad de producción de sulfato durante el periodo de prueba, indicarían que la velocidad de generación de ácido estuvo en aumento. La liberación de sulfato en las semanas iniciales de la prueba, puede indicar solo la disolución del sulfato o la liberación de productos de oxidación.

Acidez La acidez es una medida acumulativa de varias especies acuosas tales como el  $Fe^{2+}$ ,  $Fe(OH)^{2+}$ ,  $Al^{3+}$  y  $HSO_4^-$ . Así, la acidez puede utilizarse como aproximación gruesa a la generación de ácido. El cambio en acidez/alcalinidad y la liberación de elementos tales como calcio y magnesio, asociados con los minerales alcalinos, es indicativo de la velocidad y extensión de las reacciones de generación de ácido y neutralización. Con frecuencia, existe una correlación entre sulfato y acidez, a menos que haya una significativa neutralización del drenaje.

Metales Los análisis de metales disueltos indicarán la velocidad del agotamiento de metales de una muestra, por comparación con su contenido original. Un aumento en metales disueltos indica que en la celda está ocurriendo el lavado de productos fácilmente solubles, o bien la movilización de los metales; sin embargo, no es un buen indicador de la velocidad de generación de ácido, debido a efectos secundarios tales como hidrólisis y precipitación de minerales secundarios.

En resumen, la evaluación de los datos deberá incluir:

- La verificación de inconsistencias o errores. Deberán revisarse los valores inusuales para determinar si se trata de errores analíticos o si constituyen una indicación de un cambio en la calidad del agua;
- La graficación de los cambios en parámetros indicadores claves a través del tiempo: pH, sulfato, acidez, alcalinidad. Los cambios en sulfato y alcalinidad pueden indicar el inicio de la oxidación antes de que se evidencien cambios en el pH.
- La graficación de la producción acumulada de sulfato y acidez, así como el consumo de alcalinidad a través del tiempo;
- La graficación de los metales en función de tiempo y de pH;
- La graficación de la producción de contaminantes por unidad de tiempo y por unidad de área superficial;
- La graficación de las proporciones geoquímicas de parámetros tales como sulfato, alcalinidad, calcio, magnesio, a través del tiempo, especialmente para las muestras que poseen un pH cercano a neutro;



- La revisión de la clasificación de la roca de mina y los resultados BAB;
- La comparación con otros datos del lugar y de otros asientos.

La evaluación de los datos deberá continuar a lo largo de las pruebas, con el fin de determinar si los resultados son útiles y si se deberían hacer cambios al cronograma de análisis de muestras, o si, finalmente, se puede concluir con las pruebas. Tan pronto como las pruebas indiquen que el material efectivamente genera agua de drenaje inaceptable, deberá cambiar la orientación del programa de predicción y centrarse en la evaluación de las medidas de control. Por lo común, se requiere que las pruebas cinéticas se efectúen veinte semanas o más, antes de que el análisis pueda indicar condiciones finales estables. Con frecuencia se terminan las pruebas cuando:

- el pH se vuelve ácido ( $< 5$ ), indicando la ocurrencia de generación de ácido (pero no es de interés la calidad final del agua); y
- después de 20 semanas, el pH es neutro o alcalino y el PN/PA  $> 1.0$ , y no hay indicación de incremento en la producción de sulfato.

Las pruebas deberán continuar mientras los datos indiquen que hay cambios en la calidad del agua, que son indicio del desarrollo de procesos de lixiviación u oxidación, o bien de que estos procesos se están agotando.

#### 4.7 Resumen

Las técnicas experimentales de predicción se utilizan para identificar:

- . el potencial de generación de ácido
- . la calidad del agua de drenaje.

El programa de muestreo probablemente sea el aspecto más crítico en el programa de predicción. El muestreo debe ser representativo de la variabilidad física, geológica, espacial y geoquímica del asiento. Por lo general, un programa de muestreo en dos o tres etapas proporciona el enfoque más eficiente y completo para realizar el muestreo de un asiento.

Las pruebas estáticas se utilizan para definir el potencial de generación de ácido de una muestra, determinando el balance entre los materiales potencialmente generadores de ácido y aquellos consumidores. El procedimiento más comúnmente utilizado es el de balance ácido-base (referencia a Sobek y a MEND). La proporción entre el PN y el PA de la muestra se utiliza para clasificar el potencial de generación de ácido.

Las pruebas de corto plazo de extracción en frasco de agitación se utilizan para cuantificar la carga total almacenada en una muestra. Estas pruebas proporcionan una indicación de la extensión de la ocurrencia de lavado y oxidación en una muestra.

Estos resultados también se utilizan para interpretar los resultados de las pruebas cinéticas de largo plazo.

Las pruebas cinéticas se utilizan para evaluar la calidad del agua de drenaje de una muestra. Se utilizan para simular las condiciones cambiantes a través del tiempo. Por lo general, se utiliza alguna forma de prueba en columna. Una muestra del tamaño de partícula, representativo de la fracción de tamaño más fino en el campo, se coloca en una columna bajo condiciones controladas de laboratorio.

Periódicamente, se hace correr agua de lavado a través de la columna, la que después se recolecta para su análisis. Los resultados de estas pruebas no pueden utilizarse directamente para predecir la calidad del agua de drenaje, sino que deben extrapolarse a las condiciones de campo. Los lotes de pruebas de campo pueden proporcionar una indicación de la calidad de agua del asiento, pero los resultados deben interpretarse en relación a las condiciones climáticas prevalecientes en la época de la prueba. Para las minas existentes, hay una cantidad de "lotes de prueba en campo" en los componentes operacionales en el asiento. El control de

los datos obtenidos de estos componentes puede ser útil para interpretar el potencial de DAR en unidades y estructuras geológicas similares.

## 5.0 CONTROL

### 5.1 Introducción

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. El agua de drenaje contaminado o DAR, que surge de la oxidación y la generación de ácido de minerales sulfurosos, puede tener diferentes características:

- neutro con concentraciones elevadas de sulfatos
- neutro con concentraciones elevadas de metales
- ácido con tenores elevados de metales
- pH bajo, alto nivel de sulfatos y acidez

Los factores que controlan las características de esta agua de drenaje han sido tratados en capítulos anteriores; entre ellos se puede mencionar:

- . velocidad y extensión de la disolución de metales
- . velocidad y extensión de la oxidación
- . hidrología del sitio
- . medidas de control

En el control del DAR, se deben reconocer dos términos diferentes:

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

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

Existen tres enfoques para el control del DAR:

- Control primario : control de las reacciones de generación de ácido (prevención);
- Control secundario : control de la migración de contaminantes (mitigación);
- Control terciario : recolección y tratamiento (mitigación).

La opción más conveniente es la prevención de las reacciones de oxidación, mediante la eliminación de uno o más de los componentes esenciales, o bien mediante el control del ambiente con el fin de limitar la velocidad de generación de ácido a un nivel insignificante. Si se puede lograr el control primario, los productos de la generación de ácido no se manifestarán y el control secundario o terciario será innecesario.

Sin embargo, en muchos asientos, el potencial del DAR no fue reconocido en un inicio. Una vez que se establecen las reacciones de oxidación, el control óptimo consiste en limitar la migración de los productos de oxidación y el transporte de contaminantes hacia el ambiente receptor. A menudo, la única opción práctica es una combinación de las dos últimas alternativas. La cantidad del DAR se limita en la medida de lo posible mediante el control del flujo de agua; al mismo tiempo, se recolecta y trata el DAR. La desviación y/o cubiertas de agua de superficie pueden limitar el volumen de drenaje contaminado y, con ello, reducir el tamaño de la planta de tratamiento de cal, necesaria para el tratamiento del drenaje contaminante restante.

En los subcapítulos siguientes se presentarán las técnicas que actualmente se utilizan, o cuyo uso se propone, para el control del DAR.

## 5.2 Control de Reacciones de Oxidación

Existen tres factores claves que se requieren en las primeras etapas de la oxidación química: sulfuros reactivos, oxígeno y agua.

Los factores secundarios que afectan la velocidad y extensión del DAR son las bacterias, la temperatura y el pH.

El objetivo del control de la generación de ácido es evitar o reducir la formación de ácido en la fuente, mediante la inhibición de la oxidación de sulfuros. Ello podría lograrse mediante el control de uno de los factores primarios de la oxidación. El control de los factores secundarios puede utilizarse para limitar la velocidad o establecimiento del DAR. En el cuadro

5.1, se resumen las medidas que actualmente se emplean o se tienen en cuenta para el control de las reacciones de lixiviación de metales y/o de oxidación.

### 5.2.1 Eliminación de Sulfuros

El objetivo de la eliminación de sulfuros es reducir el potencial ácido (PA) mediante la reducción del contenido sulfuroso. Esta medida ha sido considerada para algunos asientos con el fin de reducir el potencial de generación de ácido de los relaves, generalmente por flotación de un concentrado de sulfuro (pirita). Posteriormente sería necesaria la descarga separada de este concentrado. En algunas minas, este concentrado se combina con cemento y se utiliza como relleno subterráneo. A pesar de

que el cemento y la cal proporcionan una capacidad neutralizante, persiste un potencial limitado de oxidación y disolución de metales (especialmente de metales que son móviles en pH alcalino). Si la oxidación ocurre efectivamente, se puede reducir la estabilidad física del relleno, mediante la prueba de estabilidad física y química del mismo. También, se deberá determinar si hay suficiente capacidad subterránea para contener, a largo plazo, todo el relleno de pirita que se encuentra bajo el agua.

Para la roca de mina, la eliminación o aislamiento de sulfuros es de utilidad sólo si existe una zona específica, geológicamente distinta de material sulfuroso. De otro modo, los operadores tendrán mucha dificultad para lograr exitosamente la identificación y el manejo del material generador de ácido. Se requeriría la disposición separada de este material; por lo general, colocado bajo el agua.

El acondicionamiento de los sulfuros expuestos, para convertirlos en químicamente inertes mediante la aplicación de un compuesto de fosfato se vislumbra prometedor para el tratamiento de relaves. Se puede aplicar a roca de mina resistente, donde el intemperismo y el desmoronamiento no expongan las superficies no tratadas, siempre que todas las rocas puedan

estar cubiertas completamente. El revestimiento total requerirá el rociado o mezcla antes de colocarlo en la pila, dado que al aplicarlo a la superficie de la pila sólo originaría un revestimiento parcial en la parte profunda. A pesar de que tal aislamiento químico parece prometedor, aún se encuentra en etapa experimental y su efectividad a largo plazo es cuestionable.

### 5.2.2 Cubiertas y Sellos

Se pueden colocar cubiertas y sellos en la superficie y lados de un embalse de relaves reactivos, o botaderos, para restringir el acceso de oxígeno y agua y, así, inhibir la generación de ácido. Para limitar la entrada de oxígeno o agua, la cubierta deberá tener muy baja permeabilidad a estos elementos y no tener agujeros o imperfecciones a través de los cuales puedan ingresar.

No se considera una solución práctica excluir el agua hasta el punto de que no se presente la generación de ácido, excepto en climas muy áridos, dado que las cubiertas y sellos contribuyen

a inhibir la subsiguiente migración de contaminantes. En el capítulo 5.3, se tratará el uso de cubiertas y sellos para controlar la migración de contaminantes.

La exclusión de oxígeno deberá permitir todos los mecanismos de transporte de oxígeno, por ejemplo:

- la convección debido a diferencias de temperatura entre el aire en el botadero y el aire del exterior;
- la advección ocasionada por el bombeo barométrico, como consecuencia de los cambios en la presión barométrica y como resultado de las presiones y succión del viento, ocasionadas por el flujo de aire sobre el botadero; y
- el flujo difusivo en el botadero.

Experiencias en Norteamérica, Australia, Noruega y Suecia demuestran que el suministro de oxígeno puede reducirse a niveles muy bajos (< 2%) con una cubierta bien diseñada y construida y, de esta manera, reducir la velocidad de oxidación. Sin embargo, no se ha demostrado que alguna cubierta pueda eliminar completamente el flujo de oxígeno por los mecanismos anteriormente indicados. Además, una de las preocupaciones a más largo plazo en relación con la integridad de las cubiertas está vinculada a la resistencia de la cubierta a las roturas, los efectos horadantes de raíces y animales, la erosión y degradación debido al intemperismo y a la acción de las heladas. Estas acciones sirven para aumentar la permeabilidad de la cubierta a través de la producción de agujeros en ella, o mediante la modificación de la estructura del suelo.

Actualmente, se considera que el agua es la cubierta más efectiva para excluir el oxígeno, mientras que los otros materiales son más adecuados para controlar la infiltración y, por lo tanto, la migración de contaminantes. Con la descarga bajo el agua, los espacios libres de la roca se llenan con agua. Así, se elimina el potencial de suministro de oxígeno y aire, ocasionado por las presiones advectivas y convectivas, aunque sigue existiendo la posibilidad de que el oxígeno sea transportado en el agua que fluye a través de los intersticios. Se debe evaluar la cubierta de agua (descarga bajo el agua o una cubierta saturada de suelo/ciénaga) cuyo objetivo es evitar la generación de ácido con el fin de considerar su inclusión en cualquier plan de control, dado que el establecimiento de una cubierta de agua en un botadero de desmonte existente no es una opción práctica en la mayoría de los casos. En el siguiente capítulo, se presentarán las cubiertas de agua, conjuntamente con la descarga bajo el agua. Las cubiertas que combinen agua con materiales alternativos también pueden ser efectivas, pues dichos materiales establecen una capa de napa freática o saturada en la superficie.

### 5.2.3 Descarga Subacuática

Actualmente, la descarga subacuática es la medida más prometedora para el control de la generación de ácido. El objetivo de colocar roca o relaves potencialmente generadores de ácido bajo el agua es excluir el oxígeno. La solubilidad del oxígeno en el agua es muy baja (< 12 mg/l), comparada con la del aire (21%), la velocidad de difusión del oxígeno a través del agua es muy baja, menor en cuatro magnitudes a la difusión del aire. Así, a falta de transporte convectivo, la velocidad de transporte del oxígeno a través del agua es lo suficientemente lenta como para que las reacciones de generación de ácido puedan reducirse efectivamente y lograr que el impacto sea insignificante.

La efectividad de la descarga subacuática en el control de la oxidación, la generación de ácido y la disolución de metales de la roca de mina ha sido observada en la mina Skorovas, en Noruega (Liseth, 1991) y en la mina Island Copper, en Canadá. Canmet-MEND (1989) describe una casuística variada y documentos públicos que muestran resultados positivos de la descarga subacuática de los relaves. Continuamente hay informaciones de que la descarga subacuática de roca de mina, potencialmente reactiva, reduce la generación de ácido a niveles deleznales.

Existen dos métodos principales para establecer una cubierta de agua:

1. Dentro y debajo del agua por medio de:

- acumulación en un cuerpo de agua existente;
- acumulación e inundación en una mina de tajo abierto o labores subterráneas;
- acumulación en un depósito construido, como el embalse de relaves o lago artificial, y mantenimiento de una cubierta de agua:

2. Establecimiento de una capa de napa freática suspendida o una capa superficial saturada, con cubierta de tipo "ciénaga".

La selección del método más apropiado dependerá de un número de factores específicos de cada asiento, incluyendo la naturaleza y cantidad de roca de mina y/o relaves, la topografía del lugar y la disponibilidad de cuerpos de agua existentes, objetivos de uso y mejoramiento de tierras, precipitación y clima del sitio y, finalmente, requisitos normativos y aceptación pública. Se deberán realizar pruebas para demostrar los beneficios y limitaciones técnicas, así como los impactos ambientales, durante la construcción y a largo plazo. Por algún tiempo, también se requerirá efectuar el control de la estabilidad física y química.

La tecnología de diseño de cubiertas se ha desarrollado considerablemente en años recientes. Modelos tales como el código KEMAKTA - TRUST, desarrollado en Suecia (Collin et al., 1990) permiten la predicción del rendimiento de las cubiertas, perfiles de saturación a través del tiempo, difusión de oxígeno a través de la cubierta y velocidades de generación de ácido en los relaves o masas de roca subyacentes. El diseño y desarrollo exitoso de una cubierta saturada requirió cierta forma de evaluación hidrológica del sitio para determinar si el balance de agua aseguraría que la saturación diseñada se mantuviera. En muchas áreas del sur del Perú, las condiciones climáticas son demasiado secas para que ésta sea una alternativa factible.

Además, se deberá determinar la estabilidad física de la estructura bajo condiciones saturadas (o parcialmente saturadas).

Muchas de las instalaciones para relaves no están diseñadas para ser estructuras de retención de agua.

Los temas que deberán considerarse en el diseño de una instalación de descarga subacuática para el control de la generación de ácido, son los siguientes:

- Mantenimiento de la cubierta de agua. Deberá mantenerse permanentemente una adecuada cubierta de agua sobre las superficies reactivas con el objeto de evitar el inicio de las reacciones de oxidación. En un embalse construido o cubierta, o cuerpo de agua superficial, deberá determinarse el balance de agua a través de evaluaciones hidrológicas. Es de aceptación general que la limitación del flujo y la concentración de oxígeno en la interfase sólido/agua requiere de una cubierta de agua de tal vez 0.5 m de agua permanente.
- Movimiento de agua. La profundidad de la cubierta de agua en un cuerpo de agua también deberá tomar en cuenta: efectos de la acción de las olas, transporte en hielo, convección y cambios estacionales en los lagos que podrían incrementar el flujo de agua con oxígeno a los sólidos, o la perturbación de la superficie sólida (por ejemplo, por el uso recreacional de la superficie del agua) y la liberación de finos en la columna de agua subyacente. El aumento de la profundidad del agua y la inclusión de una capa de roca gruesa sobre los finos, o relaves, permite el control del movimiento de agua a través de los desechos depositados. Contaminantes solubles. En el programa de pruebas, se deberá considerar el potencial de disolución de contaminantes fácilmente solubles. Para la reubicación de roca ya oxidada en deposición subacuática, como es el caso del botadero en Skorovas, la acumulación de productos oxidados dentro del botadero será movilizad después de inundarlo. La mezcla de la roca de mina con un material alcalino, como la cal o piedra caliza finamente molida, puede proporcionar el suficiente control químico de los productos solubles como para prevenir la contaminación del cuerpo de agua subyacente. La disolución de contaminantes solubles en el cuerpo de agua subyacente puede reducirse y posiblemente controlarse mediante técnicas tales como:

- colocación de una cubierta de morrena sobre la roca antes de la inundación, con el fin de permitir la atenuación química de los contaminantes y limitar el flujo a través de la roca de mina; o
- colocación de capas alcalinas, de cal o piedra caliza finamente triturada, entre la roca.
- Impacto ambiental. Se puede evaluar el efecto de la descarga de relaves o roca de desecho en agua fresca o ambiente marino y compararse con la alternativa de descarga en tierra.

La selección de la opción más apropiada para la descarga subacuática, o con cubierta de agua, dependerá de los siguientes factores específicos del sitio minero:

- naturaleza y cantidad de roca de mina;
- topografía del sitio y cuerpos de agua existentes;
- objetivos de uso y mejoramiento de tierras y lagos;
- hidrología del asiento; y
- requisitos normativos y aceptación pública.

#### 5.2.4 Aditivos Básicos o Mezcla

El potencial de generación de ácido se basa en las proporciones relativas de los materiales productores y consumidores de ácido. El objetivo de mezclar o añadir material alcalino es controlar el pH en el rango cercano al neutro, limitando así la oxidación química; y prevenir el establecimiento de la oxidación bacteriamente catalizada. Se puede añadir material alcalino o neutralizante a los relaves, como por ejemplo, la piedra caliza, cal e hidróxido de sodio, durante el procesamiento; o bien se puede colocar estos materiales en capas dentro de la roca que genera ácido, durante la acumulación. Los aditivos básicos, como la piedra caliza finamente molida que se mezcla íntimamente con la roca, pueden ser adecuados en un corto plazo, dependiendo de la cantidad, tipo y reactividad de los minerales sulfurosos. Alternativamente, la roca de mina consumidora de ácido podría mezclarse con roca generadora de ácido, con el fin de reducir el potencial total de generación de ácido (BAB).

La mezcla de rocas de mina es una forma de adición de base, en la que la roca con exceso de alcalinidad se mezcla con la roca generadora de ácido. Para la mezcla adecuada de materiales alcalinos con desechos gruesos de roca se puede requerir de la trituración y de una mezcla profunda; igualmente, se podrían requerir pruebas de laboratorio o de campo apropiadas para demostrar su efectividad.

La efectividad de la mezcla depende principalmente de la minuciosidad del mezclado, del movimiento de agua a través del sistema, la naturaleza del contacto de la roca o agua ácida con los aditivos neutralizantes o agua, la proporción de material neutro en exceso y, finalmente, el tipo y pureza del aditivo neutralizante. Por lo común, se requiere de exhaustivas pruebas de laboratorio con el objeto de demostrar la efectividad de la mezcla; además, se podría requerir otras medidas de control suplementarias. En los asientos con grandes cantidades de roca generadora de ácido, los requerimientos adicionales para el manejo del material podrían hacer inviable esta opción para el control de la generación de ácido. De otro lado, si hay metales presentes en la roca, que pueden variar de valores de pH neutro a alcalino, no se podrá obtener el suficiente control de la química del agua.

A continuación se presenta un ejemplo del material necesario para la mezcla:

Resultados del Balance ácido-base

Roca generadora de ácido: PA = 94 kg CaCO<sub>3</sub>/t

PN = 5 kg CaCO<sub>3</sub>/t

PNN = -89 kg CaCO<sub>3</sub>/t

Roca consumidora de ácido: PA = 0 kg CaCO<sub>3</sub>/t

PN = 60 kg CaCO<sub>3</sub>/t

PNN = 60 CaCO<sub>3</sub>/t

Roca consumidora de ácido necesaria

Roca generadora de ácido = 5 x 10<sup>6</sup> toneladas

Acidez potencial total = 5 x 10<sup>6</sup> x 89

= 445 X 10<sup>6</sup> t CaCO<sub>3</sub>

- @ PN/PA = 3:1 = 3 x 445 x 10<sup>6</sup> t CaCO<sub>3</sub>

60

= 22 x 10<sup>6</sup> toneladas

- @ PN/PA = 1:1 = 7 x 10<sup>6</sup> toneladas

De este modo, la mezcla o la adición alcalina pueden constituir alternativas factibles en asientos con baja cantidad de material generador de ácido y con una fuente de alcalinos. Se requiere una mezcla minuciosa de los materiales generadores y consumidores de ácido con el fin de obtener un control exitoso del DAR.

### 5.3 Control de Migración

En muchos asientos, particularmente en las minas existentes, el potencial del DAR no fue identificado antes de la operación. En estos sitios, la medida más efectiva de control es con frecuencia evitar la migración de los contaminantes. Estos son transportados al ambiente receptor con el agua tanto superficial como subterránea. Así, el control de la migración se obtiene con el control del flujo aguas arriba del agua superficial o subterránea y/o con el control de la infiltración en la superficie de la instalación. Actualmente, se están realizando muchas investigaciones sobre los materiales y diseños alternativos de cubiertas con fines de control de la migración. El cuadro 5.2 resume las medidas que se utilizan o se tienen en cuenta actualmente para el control de la migración de contaminantes.

Saskatchewan MPCB (1991) presenta una discusión sobre las medidas más comunes de control para los botaderos. A partir de esa información, se ha realizado la siguiente adaptación con el fin de revisar las medidas de control en relación a todos los componentes de los asientos mineros peruanos.

#### 5.3.1 Desviación del Agua Superficial

El agua superficial puede desviarse de la mayoría de áreas de un asiento minero mediante el apilamiento de desmonte en forma de bermas y perfiles superficiales y también a través del empleo de zanjas. La desviación de flujos superficiales, de implementación sencilla, es generalmente difícil de conservar a largo plazo sin mantenimiento. Las zanjas y bermas generalmente requieren mantenimiento anual, particularmente en áreas donde la formación de hielo y los ciclos de hielo/deshielo perturban la integridad física de la estructura. Para el largo plazo, la medida de diseño más efectiva, en cuanto a costos, es la selección apropiada del asiento, con el fin de evitar canales de drenaje naturales y minimizar el contacto con el desagüe de agua superficial. Los asientos favorables para la minimización del desagüe de agua superficial se encuentran en la cresta de los declives o en pequeñas mesetas, cerca del extremo de corriente cuesta arriba de una fuente de agua; sin embargo, podrían presentarse implicancias desfavorables en cuanto a costos, por las distancias o la ubicación con respecto a la mina. Si fuese necesario, se podrán utilizar zanjas, bermas y otras estructuras en el largo plazo, a pesar de que se requerirá de cierto nivel de inspección y mantenimiento permanentes.

### 5.3.2 Interceptación de Agua Subterránea

En la mayoría de minas de las regiones central y septentrional del Perú, el agua subterránea debe ser controlada, por medio de bombeo desde el subsuelo, durante la operación con el fin de mantenerla a un nivel por debajo de las labores mineras. Por lo general, esta actividad disminuye la napa freática hasta un grado en el que la infiltración subterránea no es significativa en la mayoría de los componentes de la mina. Sin embargo, después del cierre, dado que la napa freática natural se reestablece (véase figuras del capítulo 2), el agua subterránea podría proporcionar un componente considerable de flujo en el asiento.

La interceptación del agua subterránea puede ser, como alternativa, todo un reto técnico para el control del DAR; para ello se requiere de una detallada investigación con el propósito de definir el sistema de flujo subterráneo tanto local como regional, los efectos del uso corriente abajo de cualquier interceptación de este sistema y, finalmente las alternativas técnicamente adecuadas para el control. Las técnicas para la interceptación de agua subterránea son las siguientes:

- colocación selectiva
- paredes de pulpa
- cortinas de inyecciones
- zanjas profundas para drenaje
- perforaciones o excavaciones con descarga de bombeo controlada
- 5.3.3 Reducción de Infiltración
- La fuente principal de agua que contribuye al transporte de contaminantes es, con frecuencia, la infiltración de la precipitación.
- Las cubiertas y sellos de baja permeabilidad constituyen el método más práctico para controlar la infiltración de precipitación; éstos pueden ser desde cubiertas simples de suelo, como morrena compactada, pasando por cubiertas de compuestos, que consisten en dos o más capas de suelo con diferentes grados de permeabilidad, hasta cubiertas sintéticas y cubiertas de agua. Los materiales y la complejidad de una cubierta debe balancearse contra la reducción del flujo de agua que se requiere y la duración necesaria del control. Las cubiertas han sido desarrolladas y utilizadas para diversos propósitos:
  - para controlar el flujo de oxígeno (generalmente no es suficiente para evitar la oxidación)
  - para controlar la migración mediante la reducción de la infiltración
  - otros:
    - recuperación
    - revegetación
    - control de polvo

#### Cubiertas Simples de Suelo

Las cubiertas simples se construyen con una sola capa de suelo y su instalación cuesta entre \$2 y \$6 por metro cuadrado. Para reducir la infiltración, puede utilizarse un suelo de grano fino, como arcilla, ciénaga o morrena.

Las velocidades de infiltración pueden estimarse mediante el uso del modelo HELP (Schroeder et al., 1984) o modelos de flujo saturado/insaturado más sofisticados. En la figura 5.1, se presenta un ejemplo de cálculos de infiltración utilizando el modelo HELP para las cubiertas alternativas; estos cálculos se tratan con mayor detalle bajo el acápite "cubiertas complejas". La experiencia demuestra que las cubiertas simples pueden reducir la infiltración hasta en un 50%, dependiendo del patrón de infiltración (es decir, mientras mayor sea la tasa de precipitación, mayor será el grado de escorrentía).

Se requiere un alto contenido de humedad para limitar el transporte de oxígeno a través de una cubierta. En la figura 5.2, se ilustra la reducción típica del flujo de oxígeno debido a difusión en las cubiertas no saturadas de suelo. Esta ilustración muestra que la entrada de oxígeno por difusión se reduce, pero sigue siendo considerable hasta por algunos metros de la cubierta. Cuando el contenido de humedad aumenta hasta la saturación, el agua llena los espacios vacíos del suelo y la capacidad para transferir oxígeno se limita a la velocidad de difusión de



oxígeno a través del agua de porosidad. Para los suelos saturados, el flujo de oxígeno puede encontrarse en órdenes de magnitud inferiores a los suelos parcialmente saturados.

Como evaluación preliminar de los requerimientos de saturación que debe cumplir una cubierta, se puede utilizar una ecuación relativamente simple que sirve para estimar el coeficiente de difusión del oxígeno (Reardon and Moddle, 1991):

$$DO_2 = 3.98 \times 10^{-5} [(e - 0.05) / 0.95]^{1.7} T^{3/2}$$

donde:

$DO_2$  = coeficiente de difusión de oxígeno que ingresa

$e$  = porosidad llena de aire

$T$  = temperatura (Kelvin)

Las cubiertas simples están sujetas al resquebrajamiento por desecación, como consecuencia de las grandes variaciones estacionales en el contenido de humedad, que pueden originar un aumento de permeabilidad. Además, los suelos de grano fino, necesarios para limitar la infiltración, pueden ser susceptibles al daño por heladas, erosión del viento y del agua, sedimentación, acción horadante de raíces y animales, que también podrían aumentar la conductividad hidráulica y la infiltración a través del tiempo. Las cubiertas de una sola capa de suelo probablemente no reduzcan de manera suficiente la infiltración, como para reducir la carga de contaminantes que emana del botadero.

### Cubiertas Complejas

La efectividad de una cubierta puede mejorar significativamente mediante la incorporación de varias capas con diferentes características. El diseño y composición de la cubierta determinan la permeabilidad de la misma al agua y al aire, así como el posible flujo que atraviese hasta la roca subyacente. Cada capa está diseñada para realizar una función específica orientada a mejorar la exclusión del agua y oxígeno, y la estabilidad a largo plazo. Tal como se ilustra en la figura 5.3, la cubierta está hecha usualmente de una combinación de los siguientes componentes:

- capa de erosión controlada para proteger la superficie de la erosión del viento y del agua;
- zona de retención de humedad para limitar la desecación de las capas subyacentes;
- capa superior de interrupción de drenaje o succión para drenar el agua de la capa de infiltración y para evitar la pérdida de humedad de la barrera de infiltración;
- barrera para evitar la infiltración hacia abajo del agua y la difusión del oxígeno; y
- barrera capilar inferior para evitar la desecación de la barrera de infiltración y prevenir la succión del agua de porosidad contaminada hacia la cubierta, durante los periodos secos.

Las consideraciones importantes para el diseño de cubiertas complejas son presentadas por Barton-Bridges y Robertson, 1989. Las cubiertas complejas pueden construirse con suelos y/o materiales sintéticos o con una combinación de éstos. La figura 5.1. muestra diferentes tipos alternativos de cubiertas, aplicados a los relaves para las condiciones específicas de Elliot Lake, en Ontario (SRK et al., 1989). También, se presentan los principales componentes que afectan el balance de agua total de la cubierta. Sin cubierta, casi toda la precipitación se infiltra en el botadero, pudiendo emerger luego como rezumadero. Los resultados demuestran la ventaja significativa del diseño de una cubierta compleja sobre la simple, así como la ventaja adicional de añadir una capa sintética. Una cubierta provista de una capa de membrana sintética es, sin duda, la barrera de infiltración más efectiva; sin embargo, la selección de una cubierta adecuada dependerá de las condiciones del sitio y del nivel de control que se requiera.

La evaluación de los diseños alternativos de cubiertas puede hacerse mediante las parcelas de prueba de campo y/o pruebas de laboratorio combinadas con modelos de computación. La modelación del flujo de oxígeno a través de una cubierta puede hacerse con un modelo como

el KEMAKTA (Colin et al., 1990), que calcula el flujo de oxígeno a través de una cubierta y la velocidad de oxidación en los sólidos subyacentes.

En Europa, existen dos minas que han construido cubiertas complejas sobre la roca de mina generadora de ácido para mantener una capa de permeabilidad baja y reducir, de esta manera, la entrada de oxígeno y el flujo de agua a niveles muy bajos. La mina Bersbo, en Suecia (Södermark y Lundgren, 1988; Lindahl, 1990) ha incorporado capas de arcilla y Cefyll (ceniza fina estabilizada con cemento), mientras que la mina Kjöli, en Noruega, ha instalado una cubierta compleja que incorpora una membrana HDPE sintética de 2 mm. Por lo general, los costos de estas cubiertas complejas de múltiples capas están en el rango de \$20 a \$30 por metro cuadrado.

Se puede obtener una relativa efectividad de las cubiertas de suelo simples y complejas para el control de la migración mediante simulaciones de modelo matemático de las cubiertas y el control de un número limitado de cubiertas reales. Si bien las simulaciones teóricas son útiles al comparar tipos alternativos de cubierta, su relativa confiabilidad aún está en discusión; por ello, la verdadera efectividad de las cubiertas para controlar el drenaje ácido de roca tendrá que ser determinada a partir del control del rendimiento de las cubiertas reales en el campo. Desafortunadamente, los resultados del control son limitados. La medida final de la efectividad de estas cubiertas es la reducción de las cargas de metales en el sistema fluvial local.

### Cubiertas Sintéticas

Se han desarrollado muchos materiales sintéticos como cubiertas "impermeables" (de muy baja permeabilidad) en otras aplicaciones industriales; pero que ahora están siendo considerados en la industria minera. El tipo más común de estas cubiertas es una especie de geomembrana. Además, existen programas de investigación de otras cubiertas sintéticas, incluyendo los selladores asfálticos y por rociado así como los geopolímeros. Los selladores de superficie asfálticos y por rociado (asfalto, concreto, epoxia, poliéster, polisulfuro, silicona, caucho sintético, etc.) pueden, en teoría, aplicarse sobre una superficie adecuadamente nivelada y preparada, para formar una barrera contra la infiltración y la difusión de oxígeno. En general, estos materiales han sido desarrollados para ser aplicados como selladores de calafatura, estabilizadores de suelos, barreras a prueba de agua y revestimientos anticorrosivos; la aplicación de estos materiales en las cubiertas de desechos mineros aún no ha sido demostrada.

El término "geopolímero" se utiliza para describir un compuesto de minerales, principalmente sílice, fosfato y oxígeno, que se unen para formar un producto de tipo cerámico. El torcreto con un aditivo de humo de sílice y un refuerzo de fibra de polipropileno, puede ser efectivo para controlar las resquebraaduras. La ventaja del torcreto es que se trata de un relleno relativamente barato y que puede aplicarse como

### Figura 5.3 Componentes Típicos de una Cubierta Compleja

(según Rasmusson y Eriksson, 1987)

cubierta para impregnar pendientes de roca u otras superficies cuyo recubrimiento podría resultar dificultoso mediante el empleo de otros métodos. El uso efectivo del torcreto como cubierta, depende de la estabilidad del material subyacente. Sin embargo, en la literatura no existen ejemplos de aplicaciones de largo plazo a gran escala de esta tecnología.

La colocación de materiales geosintéticos como capas impermeables es una tecnología usada por años en aplicaciones como la lixiviación en pilas y relleno. En los últimos años, la industria minera ha considerado el uso de estas membranas "impermeables" como cubiertas contra la generación de ácido para limitar el flujo tanto de oxígeno como de agua (es decir, como control tanto de la generación de ácido como de la migración de contaminantes).

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

prohibitivo, en términos de costos. Las pendientes de pilas usualmente se colocan en su ángulo de reposo y, en consecuencia, se vuelven inaccesibles y sólo marginalmente estables. La colocación de cubiertas en tales pendientes es básicamente inaplicable y requiere de una reestructuración de por lo menos 3 horizontales a 1 vertical (3:1). El costo por volver a formar pendientes de botaderos es bastante elevado, a menos que haya sido planificado y que los botaderos se hayan construido con una pendiente escalonada. La parte superior de un botadero de desmonte generalmente es de fácil acceso y tránsito y casi plana. La colocación de cualquier tipo de cubierta superficial, con excepción de la de agua, generalmente es sencilla. Los botaderos de desmonte están sujetos a consolidación y sedimentación de largo plazo, bajo el peso mismo de la roca y a medida que ésta se somete al intemperismo. Estas sedimentaciones son considerables y desiguales, reflejan la variación natural de los botaderos y de los métodos de construcción. La colocación de cubiertas sobre relaves está limitada por el grado de saturación, tamaño de partícula y estabilidad física resultante de la superficie de sólidos.

Todos los tipos de cubierta requieren de control y mantenimiento de largo plazo aunque la proporción de ellos puede diferir sustancialmente entre los diferentes tipos.

#### Selección de Materiales de Cubierta

La selección de materiales para cubierta depende de los objetivos de la colocación de estas cubiertas (es decir, el grado de reducción de infiltración, tanto de oxígeno como de agua, que se requiere); así como de la disponibilidad de diferentes materiales en el asiento. El cuadro 5.3 resume algunos materiales alternativos para cubiertas, así como sus ventajas y limitaciones.

#### 5.3.4 Ubicación de Roca de Mina

Los métodos de ubicación de desmonte, residuos o relaves para minimizar la infiltración deberían considerarse como parte de las operaciones de planificación para el manejo de residuos, conjuntamente con otros métodos de control.

El control de migración de contaminantes en los botaderos puede basarse en métodos de ingeniería de ubicación, como la construcción de botaderos celulares, compactación, mezcla con material de baja permeabilidad, etc. La construcción de botaderos celulares, cuando se usa con una capa cobertora, puede reducir considerablemente el área de roca lixivante expuesta a la precipitación.

El control de la migración de contaminantes, mediante la compactación o mezcla con material de baja permeabilidad, pretende reducir tanto la permeabilidad del conjunto de la roca de mina como la filtración. La compactación de la roca requerirá la construcción en capas delgadas, siendo apropiada sólo para rocas blandas, como las unidades con apariencia de arcilla alterada. Este enfoque también reducirá el sedimento y aumentará la estabilidad de vaciado. Mientras que estas actividades de colocación pueden tener resultados favorables, los alcances de estas ventajas generalmente no son muchos comparados con su alto costo, y puede no ser justificable, salvo en circunstancias muy especiales.

#### 5.4 Recolección y Tratamiento

Existen dos tipos principales de sistemas de tratamiento del DAR:

- los sistemas activos que requieren la operación y mantenimiento continuos; y
- los sistemas pasivos que se basan en el tratamiento "natural" y pretenden funcionar sin cuidados ni mantenimiento.

La tecnología demostrada para el tratamiento activo es el proceso de neutralización química (con cal). Se elimina la acidez de la solución mediante neutralización, los metales pesados se precipitan en la forma de óxidos, hidróxidos o sulfuros. Otros componentes nocivos, como el arsénico y el antimonio, se extraen por precipitación; el arsenato o antimoniato se extraen a través del uso de hierro férrico y aereación.

Mientras crece el nivel de aceptación con respecto al hecho de que no se puede efectuar una "retirada" en cada asiento minero, las obligaciones técnicas y financieras de mantener a perpetuidad una planta de tratamiento químico han aumentado el interés por desarrollar opciones efectivas de cuidado pasivo.

#### 5.4.1 Recolección

El éxito de cualquier sistema de tratamiento depende de la capacidad para identificar, recolectar y controlar el flujo de toda agua contaminada. Se diseña un sistema para recolectar toda la filtración y el drenaje, y también para minimizar el volumen destinado al proceso de tratamiento. Ello significa que toda corriente "limpia" será separada de la contaminada, y no incluida en el flujo que va a la planta de tratamiento. La interceptación, para desviar el agua fresca de la toma donde se generan los contaminantes, es esencial para minimizar el volumen de flujo contaminante que puede ser generado en el asiento. El volumen de flujo a tratarse será minimizado y, con ello, la capacidad de diseño requerida para la alternativa de tratamiento del agua.

La recolección de escorrentía se logra mediante zanjado superficial. La recolección de flujos subterráneos puede requerir la instalación de surcos colectores, pozos hacia los cuales se descarga la pluma del contaminante, o bien muros interceptadores para forzar el flujo de agua subterránea hacia la superficie para su recolección y tratamiento.

El diseño de los sistemas de recolección es extremadamente específico para cada asiento y puede depender de la ubicación del flujo contaminante, la topografía, cantidad y forma de la precipitación, geología e hidrología del lugar. Los sistemas de recolección están compuestos invariablemente por diferentes componentes que contribuyen a la eficiencia del sistema total de recolección. Entre ellos se puede mencionar:

- la interceptación para la derivación del agua fresca;
- la recolección del flujo contaminado; y
- la capacidad de almacenamiento.

El diseño de los sistemas tanto de interceptación (desviación) como de recolección dependerá de la descarga instantánea pico de estas tomas; los periodos de retorno del diseño dependerán del riesgo determinado de descarga de una porción del efluente contaminado.

Dado que el diseño de plantas de tratamiento para descargas instantáneas pico es poco probable, un sistema de almacenamiento para regular los flujos a la planta de tratamiento deberá formar parte integral de todo sistema de recolección.

Dependiendo de una evaluación del riesgo, la capacidad de almacenamiento se determinará con el fin de mantener los eventos de inundación hasta un evento de inundación con un periodo de retorno específico.

#### 5.4.2 Tratamiento Activo

El tratamiento químico del DAR es una tecnología ampliamente conocida y aceptada. Por lo general, el tratamiento consiste en un circuito de neutralización química para extraer de la solución:

- la acidez - por neutralización
- los metales pesados - por hidrólisis y precipitación
- otros contaminantes como sólidos suspendidos, arsenato, antimonioato por formación de un complejo y precipitación.

A continuación se presentan ejemplos de estos procesos:

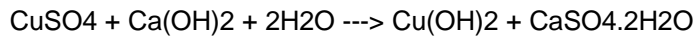
Neutralización

ej.  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

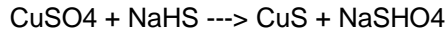
cal apagada yeso

Eliminación de Metales

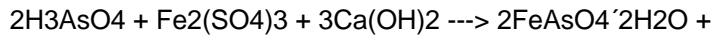
Precipitación como hidróxido o sulfuro; por ejemplo, cobre



o



Precipitación de aniones con hierro férrico; por ejemplo, arsénico



Las principales operaciones unitarias en una planta de tratamiento químico del DAR pueden ser:

- . poza de retención aguas arriba para el DAR
- . preparación de cal (hidratación, mezcla de pulpa)
- . una o dos etapas de neutralización por agitación
- . tercera etapa para la eliminación de otros metales o aniones
- . separación líquido/sólido
- . retención de solución del efluente tratado para muestreo previo a la descarga
- . disposición de residuo

Los agentes de neutralización más comunes son:

- caliza ( $\text{CaCO}_3$ )
- cal viva ( $\text{CaO}$ )
- cal hidratada ( $\text{Ca(OH)}_2$ )

La primera y, tal vez, la segunda etapa de una planta de tratamiento u 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 preocupación seleccionados que no se extraen con la cal. Entre ellos:

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

Se debe tomar precauciones para utilizar otros desechos con el fin de asegurar que los metales solubles adicionales no sean añadidos al agua de drenaje. Además, se debe aceptar que el uso de desechos, como los relaves, aumenta la masa total de sedimento producido por la planta de tratamiento y del cual deberá disponerse.

#### 5.4.3 Disposición de Lodos

Uno de los aspectos más difíciles del tratamiento químico es la descarga del lodo de tratamiento. El proceso extrae acidez y metales por precipitación de óxidos e hidróxidos metálicos, y yeso. Usualmente, existe lodo de grano fino que es de difícil filtración o sedimentación. Por lo común, los lodos de las plantas de tratamiento están constituidos por un 10 a 15% de sólidos por peso.

Además, se debe mantener la estabilidad química del lodo con el fin de evitar la redisolución de los contaminantes metálicos. Por lo general, los lodos deben desecharse en un área preparada para limitar el posible lavamiento y/o mantener condiciones alcalinas. La práctica actual en algunos asientos consiste en incluir los lodos de la planta de tratamiento con los sólidos de relaves alcalinos, o bien desecharlos en un área de depósito bajo el agua. En todo caso, la descarga de lodos constituye un área de investigación activa, que requiere de una cuidadosa planificación como parte del diseño de planta.

#### 5.4.4 Tratamiento Pasivo

Uno de los avances más prometedores en el tratamiento del DAR es el reconocimiento del papel que cumplen los procesos naturales en la eliminación de la acidez, sulfato y metales de las aguas de drenaje ácido. La reducción biológica de sulfato ha sido identificada como uno de los principales contribuyentes a los procesos de mitigación de la calidad del agua en tierras húmedas. Se trata de reacciones que ocurren naturalmente y que producen alcalinidad, reducen los sulfatos y promueven la precipitación de los metales en solución en la forma de sulfuros metálicos.

La reducción directa del sulfato a sulfuro de hidrógeno es producida por bacterias especializadas, estrictamente anaeróbicas, específicamente por dos géneros de bacteria anaeróbica: *Desulfovibrio* (cinco especies) y *Desulfotomaculum* (tres especies).

Estas bacterias son organismos heterotróficos y tienen un metabolismo respiratorio en el que los sulfatos, sulfitos y/u otros componentes reducibles de azufre sirven como aceptores finales de electrones, con la consiguiente producción de sulfuro de hidrógeno. Los substratos orgánicos de estas bacterias generalmente son ácidos de cadena corta, tales como el ácido láctico y el pirúvico. En la naturaleza, estos substratos se obtienen a través de actividades de fermentación de las bacterias anaeróbicas sobre substratos orgánicos más complejos (tales como la putrefacción de vegetación en tierras húmedas).

La actividad de estas bacterias reductoras de sulfatos es importante no sólo debido a la producción de sulfuro de hidrógeno, sino también debido a la subsecuente interacción y precipitación de los metales y al aumento de alcalinidad. El sulfuro de hidrógeno reacciona fácilmente, por ejemplo, con cobre solubilizado a valores bajos de pH, para formar el mineral sulfuroso

insoluble. De manera similar, la precipitación del zinc es posible siempre que existan condiciones adecuadas (función, por ejemplo, del pH en solución).

Recientemente, la reducción de sulfatos ha sido reconocida, con toda justificación, como un potencial proceso de tratamiento del DAR. La reducción natural in situ de sulfatos ha sido identificada en una mina subterránea en Noruega. Esta tecnología puede tener potencial para instalar un sistema de tratamiento biológico de relativamente bajo mantenimiento para minas subterráneas abandonadas, que no sólo modificará el pH en el efluente, sino que también extraerá el contenido de metales solubles como compuestos sulfurosos estables. Las condiciones reductoras bajo las cuales se depositan estos compuestos de sulfuros metálicos también proporcionan una instalación de almacenamiento ideal de largo plazo para la preservación de lodos de tratamiento.

#### 5.5 Evaluación de las Opciones de Control

La selección de las opciones de control más factibles técnica y económicamente implica un balance de las ventajas técnicas de la opción para mejorar la calidad del agua. El éxito de toda medida de control radica en su capacidad para controlar el DAR y para limitar el impacto ambiental adverso. La evaluación de las opciones alternativas de control deberá considerar:

- efectividad
- riesgo de fracaso
- estabilidad a largo plazo
- costo

En muchos casos, la evaluación de estos factores es materia de juicio antes que de análisis determinativo. Las evaluaciones cuantitativas y cualitativas se están convirtiendo en una herramienta cada vez más popular para determinar los efectos ambientales. Sin embargo, para la mayoría de situaciones, una simple determinación cualitativa puede servir para evaluar las opciones de control.

Se puede efectuar la mayoría de evaluaciones a través de la comparación de los siguientes factores:

- funcionalidad o factibilidad técnica
- durabilidad o longevidad
- seguridad o riesgo de fracaso
- impactos ambientales como consecuencia tanto de la construcción como de la operación
- requerimientos y tiempo de construcción
- requerimientos de inspección y mantenimiento
- efectividad

Cada factor puede ser medido en un sistema simple de cinco puntos (bajo=1, medio, alto=5). La importancia relativa de los factores puede evaluarse; por ejemplo, en ciertas ubicaciones de acceso remoto, la longevidad y los requerimientos de mantenimiento constituirán factores significativos en la selección de una opción de control. Estos factores pueden compararse con los costos de cada alternativa para seleccionar la opción que proporcione el mayor beneficio por el costo más razonable.

## 6.0 MONITOREO

Existen dos objetivos para un programa de monitoreo, específicos para el drenaje ácido de mina.

- detectar el inicio de la oxidación, la cual puede conducir al desarrollo del drenaje ácido; y
- evaluar la efectividad de la prevención y/o medidas de control.

Los principios y procedimientos básicos para el monitoreo del drenaje ácido de mina son los mismos que para el monitoreo de otros efluentes y aguas superficiales en cualquier emplazamiento minero. Se ha preparado un protocolo de monitoreo de calidad de agua para la industria minero-metalúrgica, distribuido por la DGAA, que resume estos procedimientos. Se debe consultar este documento al establecer cualquier programa de monitoreo.

Existen algunas características específicas para el monitoreo del drenaje ácido de mina que deben tomarse en cuenta:

- los cambios estacionales en la precipitación y evaporación pueden afectar sobremanera la química del drenaje, particularmente en las instalaciones superficiales tales como las pilas de desmonte. Además, ya que el desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo, la química del agua de drenaje puede cambiar cada año. El análisis de la información recopilada muestra que las variaciones más significativas (tal como lo indica el coeficiente de variabilidad en una colección de datos) se observan en el cobre, hierro, aluminio, arsénico y sulfato;
- las mayores concentraciones y cargas contaminantes generalmente se observan en los periodos de flujo alto, a los que les siguen inmediatamente periodos más secos de flujo bajo, debido al lavado de productos acumulados de la oxidación;
- Por lo tanto, a menudo, el muestreo de frecuencia fija resulta inadecuado para definir la carga total de contaminante proveniente del DAR, y para la interpretación de datos. El programa de monitoreo debe ser adaptado a los modelos de flujos con muestreo de mayor intensidad durante las condiciones variables;
- Los cambios químicos y físicos a lo largo del flujo pueden alterar significativamente la química del agua de drenaje. El flujo del drenaje ácido a través de los minerales carbonados puede aparecer en pH alcalino. Sin embargo, todavía existe oxidación y la generación de ácido se presenta en pH alcalino. En algún momento en el futuro, la alcalinidad a lo largo del flujo puede ser consumida o no estar disponible por el

revestimiento de precipitados, y el agua de drenaje entonces permanecerá ácida. El monitoreo de los parámetros no susceptibles al control de pH, tales como los sulfatos y el zinc, o de los parámetros asociados con la disolución de los minerales alcalinos, tales como el calcio y el magnesio, puede proporcionar una indicación de la magnitud de la generación y neutralización del ácido;

- los cambios estacionales en los flujos también afectan la sensibilidad del ambiente receptor a la contaminación del DAR. Muchos cursos de agua superficial tienen cierta capacidad neutralizadora;
- el monitoreo de aguas subterráneas y del drenaje subterráneo también es importante para evaluar el DAR en un emplazamiento minero.

En la evaluación del DAR, es importante diferenciar entre programas que se realizan como parte de un programa de monitoreo regular del sitio, y las investigaciones específicas. Estas últimas generalmente son programas de muestreo más intensivos y, a menudo, incluyen no sólo el muestreo del agua sino también el muestreo de sólidos para pruebas, tal como se ha descrito en este documento. Los estudios de filtración anual pueden ser útiles en un emplazamiento en el cual el DAR debería ser anticipado, pero no ha aparecido en el monitoreo regular. Un estudio de filtración es un evento de muestreo intensivo de una vez, de todos los flujos de agua, generalmente realizado alrededor de los componentes individuales del sitio, por ejemplo, en los alrededores de una pila de desmonte o pozas de relaves.

## 7.0 CIERRE

Los problemas a largo plazo, relacionados con el drenaje ácido de roca en las minas, han demostrado que pueden ser graves a nivel ambiental y económico en algunos asientos, si no se realiza la necesaria planificación y manejo de ingeniería antes del cierre. Se está preparando un guía detallada sobre el tema de la planificación del cierre. El presente capítulo resume brevemente las consideraciones que se deben tomar en cuenta para llevar a cabo un cierre seguro, a largo plazo, de un asiento minero.

### 7.1 Necesidad de la Planificación del Cierre

La industria minera ha reconocido hace mucho la necesidad de recuperar la tierra afectada al cese de las operaciones de explotación minera; así como la de proteger la salud y seguridad de la población en el área. Incluso para aquéllos dedicados a la actividad minera, el término "recuperación" evoca imágenes de botaderos de moderada inclinación y pendiente y terrenos mineros recientemente e implantados. A pesar de ello, cada vez somos más conscientes de que la recuperación o rehabilitación no sólo incluye la apariencia, la salud y seguridad sino también la protección ambiental y la recuperación de la tierra para su uso futuro.

Con los recientes cambios en la legislación y los ejemplos en la industria, resulta evidente para el sector minero que la planificación de los requerimientos técnicos y financieros para asegurar la protección del medio ambiente al cierre de la mina constituye un componente esencial del desarrollo y la operación minera. Se ha incurrido en altos costos de cierre en asientos mineros a nivel internacional, debido al fracaso en la identificación y control de las condiciones que tendrían un impacto

ambiental adverso al momento de cerrar las minas. La lixiviación de contaminantes y el drenaje ácido de roca, con frecuencia, son las causas principales de los altos costos del cierre.

Existe el convencimiento general de que el drenaje ácido de roca (DAR) es la única gran responsabilidad ambiental y económica que enfrenta la industria minera hoy en día. El cierre de las minas que generan drenaje ácido, o que pudiera generar DAR, constituye una tarea costosa e incierta. Sin embargo, también se reconoce que con la adecuada planificación del cierre, y la oportuna identificación de todos los "problemas" potenciales, se pueden diseñar e incorporar al diseño y operación de la mina los requerimientos de recuperación o acciones necesarios. En efecto, prevenir es mejor que curar.

### 7.2 Consideraciones para el Cierre



En consecuencia, la industria minera está reconociendo la funcionalidad de diseñar y operar de manera tal que los problemas del DAR a largo plazo se reduzcan o eliminen. Ello se está logrando a través del desarrollo de un "plan de cierre" como parte integral del diseño y la operación de la mina. Es importante reconocer, empero, que el "cierre" no sólo se refiere al momento en el que termina toda actividad minera, sino también al cierre de todos los componentes que se encuentran en el asiento minero. Los ejemplos más conocidos son las labores subterráneas antiguas, o los embalses de relaves en los que la acumulación ha terminado.

El desarrollo de un plan de cierre para la rehabilitación de un botadero de mina supone la existencia de tres objetivos:

- proteger la salud y seguridad públicas
- aliviar o eliminar el daño ambiental; y
- permitir el uso productivo, restableciendo la condición original del lugar, o bien una alternativa aceptable.

Hay tres tipos principales de planes de cierre:

- retirada
- cuidado pasivo; y
- cuidado activo.

La solución de retirada es aquella en la que no se requiere de actividades adicionales de monitoreo o mantenimiento después de que se ha llevado a cabo el trabajo de rehabilitación.

El cuidado pasivo se logra cuando existe una necesidad mínima continua de monitoreo ocasional y mantenimiento menor con poca frecuencia.

El cuidado activo requiere que haya una necesidad anual y continua de operación, mantenimiento y monitoreo del asiento minero por largo tiempo en el futuro. Esta situación se aplicaría usualmente a la recolección y al tratamiento químico continuos del drenaje ácido de roca o lixiviado proveniente de botaderos de desmonte. Un plan de cierre de estas características requeriría el desarrollo de un plan operativo, estructura gerencial y financiación permanentes.

"Los planes de cierre de minas deberían utilizar la mejor tecnología disponible económicamente factible (MTDEF). Ello implica la selección de tecnología de control comprobada para la cual el incremento de costos de su aplicación se justifique por la protección ambiental resultante; pero no implica la limitación de la capacidad económica del proponente" (MPCB, 1991). Este documento resume la tecnología actual para la predicción, prevención, control y monitoreo del drenaje ácido de roca.

En el desarrollo del plan de cierre, se deben considerar todos los componentes del sitio minero:

- labores mineras
- instalaciones de desechos incluyendo relaves, roca de desecho, pozas
- instalaciones de procesamiento del mineral, incluyendo el apilamiento de éstos, concentradora, instalaciones de descarga de concentrados, refinería
- infraestructura y edificios

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

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

Estabilidad Física

La consideración fundamental de largo plazo en relación a la estabilidad física del DAR consiste en asegurar que todas las estructuras que contienen material potencialmente generador de ácido sean estables y que no degradarán ni liberarán dicho material. Además, se deberá asegurar la estabilidad física de cualquier medida tomada para controlar las reacciones de generación de ácido, o para controlar la migración de contaminantes. La estabilidad del embalse de relaves (especialmente si se ha seleccionado la cubierta de agua como opción de control), así como la estabilidad de las cubiertas y de la estructura de manejo del agua superficial constituyen las consideraciones principales.

#### Estabilidad Química

El criterio fundamental con respecto al DAR consiste en asegurar la "estabilidad química"; es decir, evitar la generación y migración de contaminantes. En el capítulo 4, se presentaron las técnicas de predicción del DAR. Por lo general, se utiliza una combinación de pruebas estáticas y cinéticas para caracterizar el potencial de generación de ácido de los materiales y la calidad del agua de drenaje, tanto bajo condiciones "naturales" como controladas.

En el Capítulo 5, se presentaron las medidas para controlar la generación de ácido y la lixiviación de metales. Estas medidas, en orden de preferencia, son: prevenir las reacciones de generación de ácido, limitar la migración de contaminantes y recolectar y tratar el drenaje contaminado. Por lo general, es necesario considerar las condiciones de precipitación media, los altos niveles de carga debido al lavado de productos ácidos acumulados durante las tormentas, y las condiciones de baja dilución durante los periodos de sequía.

#### Uso de la Tierra

Tanto durante la operación como al concluir la explotación minera, la alteración de la tierra debería ser mínima. La experiencia con minas históricas del Perú ha demostrado que el drenaje ácido puede continuar mucho después de haber finalizado la explotación, originando drenaje ácido y contaminación, tanto de la tierra como del agua, hasta el punto que sólo es posible un bajo nivel de uso productivo de éstos. La planificación del cierre para controlar el DAR siempre deberá contemplar los posibles usos de la tierra una vez concluida la explotación minera.