

Guía Ambiental de Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas

INTRODUCCION

El manejo de los recursos de agua constituye una parte vital e integral en las operaciones mineras debido al potencial de contaminación del agua y su efecto consecuente en la salud humana y el medio ambiente. El manejo ambiental de este recurso comprende el manejo de aguas en minas, efluentes de procesos de beneficio, escorrentías de las soluciones de lixiviación, aguas superficiales provenientes de depósitos tales como las pilas de desmonte y canchas de relaves, y los desechos humanos.

1. Propósito del Documento Guía

Esta guía ha sido desarrollada para proporcionar al usuario una visión global del manejo de aguas, centrándose en la prevención o reducción de impactos ambientales a las aguas del Perú, como consecuencia de las operaciones mineras y de beneficio. En este documento se identifican y resumen las técnicas de manejo potenciales para lograr este objetivo.

En esta guía sólo se discuten los elementos fundamentales del manejo ambiental del agua y, por lo tanto, se debe considerar que la información proporcionada no incluye todos los aspectos sobre este tema. Las técnicas que pueden ser empleadas en el manejo de aguas varían dependiendo de la mina y las operaciones de beneficio y es responsabilidad del operador de la mina/beneficio determinar qué técnicas usar y cómo aplicarlas.

2. Resumen del Manejo Ambiental del Agua

El manejo ambiental del agua comprende la fusión del manejo de los recursos de agua con el manejo de agua de mina, efluentes de procesos de beneficio y desechos provenientes de las actividades humanas. Este sistema integrado comprende el Sistema del Manejo de Recursos de Aguas (SMRA).

Un SMRA debe considerar:

Las fuentes potenciales de descargas de contaminantes relacionadas con las operaciones mineras y de beneficio, las características y utilización de las aguas subterráneas y superficiales que potencialmente pueden ser impactadas por las operaciones mineras y de beneficio y,

las metodologías que pueden ser seguidas para eliminar o reducir, tratar y manejar apropiadamente las descargas.

Todo SMRA puede variar de un lugar a otro dependiendo de:

El tipo, tamaño y extensión de las operaciones mineras/de beneficio,
los procesos llevados a cabo en las operaciones mineras/de beneficio,
las condiciones climatológicas del sitio, y
las características físicas y de ubicación del sitio.

Los impactos tratados en este documento son aquéllos relacionados con la calidad del agua. Ciertas actividades asociadas con el manejo de agua, tales como la construcción de canales de drenaje, pueden ocasionar otros impactos como:

Destrucción del paisaje,
degradación del ambiente visible,
destrucción de la tierra agrícola y forestal,
daño a las áreas recreacionales,
emisión de polvo durante la construcción,

incremento de la erosión y sedimentación, e incremento de los niveles de ruido.

A pesar que no se tratan explícitamente en esta guía, los impactos asociados con las actividades de manejo de agua deben ser considerados y discutidos de manera adecuada. La Guía para Elaborar Estudios de Impacto Ambiental (1) puede ser útil al respecto.

PROPUESTA

Capítulo I. UNA PROPUESTA PARA DESARROLLAR LOS SISTEMAS DE MANEJO DE RECURSOS DE AGUA

La planificación del manejo de recursos de agua debe comenzar en la etapa de exploración minera y continuar hasta el cierre del sitio minero.

Los sistemas de manejo de recursos de agua se ocupan de la reducción del efluente de mina y beneficio a través de métodos de reciclaje y manejo, y la disposición y tratamiento adecuado del efluente. También tratan la derivación, colección, tratamiento y disposición de la escorrentía de aguas superficiales del sitio minero, y la derivación de escorrentías de las áreas que circundan el sitio minero. A grandes rasgos, el manejo ambiental del recurso de aguas requiere:

La identificación de fuentes potenciales de descargas contaminantes, la identificación y caracterización de las aguas que pueden ser impactadas por las descargas contaminantes, y la identificación e implementación de metodologías para evitar, reducir, tratar y manejar apropiadamente las descargas.

1. Fuentes Potenciales de Descargas Contaminantes

Las fuentes potenciales de descargas de contaminantes relacionadas a las operaciones mineras y de beneficio incluyen:

- a) Drenaje de la mina,
- b) operaciones durante el proceso de beneficio,
- c) unidades de desechos y pilas de mineral, y
- d) actividad humana

a) Drenaje de la Mina

Durante las operaciones de drenaje se deben eliminar grandes cantidades de agua provenientes de las labores mineras. El agua resultante de las operaciones de drenaje en el tajo, del proceso de desbroce y de las minas subterráneas es descargada generalmente en aguas superficiales, aunque algunas pueden ser utilizadas como agua de reemplazo en los procesos de molienda-concentración.

El agua proveniente de las operaciones de drenaje puede contener alta concentración de metales y, por lo tanto, contaminar las aguas superficiales. Además, el drenaje ácido de mina (DAM) generado en las labores mineras y en los tajos puede ser bombeado y descargado a las aguas superficiales.

b) Operaciones durante el Proceso de Beneficio

El cuadro 2.1. presenta algunos procesos comunes utilizados en el procesamiento metalúrgico de diversos minerales. Las corrientes de efluentes residuales de procesos pueden originarse en cada uno de ellos tal como se muestra en la figura 2-1. El efluente del proceso puede contener constituyentes orgánicos e inorgánicos, incluyendo reactivos utilizados en procesos tales como el cianuro, y puede ser altamente ácido.

El efluente del proceso puede ser depositado en canchas de relaves donde los contaminantes se pueden lixiviar y contaminar las aguas superficiales o subterráneas o ser transportado a corrientes y áreas adyacentes, mediante escorrentías superficiales. En muchas operaciones de beneficio, el efluente del proceso se descarga directamente en el suelo o en corrientes receptoras sin tratamiento lo que conduce a la contaminación del agua superficial y subterránea. A pesar que la calidad de algunos efluentes puede ser relativamente buena y éstos pueden ser reciclados o eliminados con mínimo o sin tratamiento, frecuentemente, estos efluentes se combinan con otros de menor calidad y son eliminados.

En los procesos de beneficio también se generan residuos sólidos y si los efluentes del proceso se tratan antes de la descarga, también pueden generarse lodos en el proceso de tratamiento del agua. Estos residuos comúnmente se disponen en canchas de relaves y pueden contener niveles elevados de metales pesados y reactivos que pueden lixiviar en aguas subterráneas o superficiales o ser transportadas en áreas y corrientes adyacentes a través de escorrentías superficiales. Igualmente, si se depositan directamente en el suelo o en depósitos que pueden filtrarse o derramarse se puede producir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Las presas de agua de proceso son fuentes potenciales adicionales de contaminación asociadas con el proceso de beneficio. En las operaciones de lixiviación en pilas, las pozas de proceso se utilizan para almacenar soluciones cargadas para la extracción de metales o soluciones gastadas para el reciclaje. Las pozas de proceso pueden ser una fuente de contaminación de agua a través de la filtración de soluciones en las aguas superficiales y subterráneas y flujos que se derraman.

c) Depósitos y Pilas de Mineral

Los depósitos incluyen:

- Pilas de desechos (por ejemplo, desmonte y material de desbroce, pilas de material residual de lixiviación)
- canchas de relaves, y
- pozas de agua residual

Los depósitos pueden contribuir a la contaminación del agua a través de: 1) generación de DAM y el transporte subsecuente de metales a las aguas superficiales y subterráneas a través de escorrentías superficiales y lixiviación, 2) descarga de sedimentos en aguas superficiales a través de la erosión y transporte en escorrentías superficiales, 3) filtración y derrame de pozas de aguas residuales. Un resumen de impactos potenciales en la calidad asociado con los depósitos se presenta en el cuadro 2.2. Las figuras 2-2 y 2-3 muestran la configuración típica de pilas de desechos y canchas de relaves respectivamente.

Las pilas de mineral pueden contribuir a la contaminación de aguas superficiales por medio de la descarga de sedimentos a través de la erosión y transporte en las escorrentías superficiales. Debido a su naturaleza transitoria, las pilas de mineral rara vez constituyen una fuente de DAM.

d) Actividad Humana

Las fuentes de contaminación del agua provenientes del incremento de la actividad humana en un emplazamiento minero incluyen las aguas servidas y la basura. Las aguas servidas domésticas descargadas en aguas superficiales contribuirán a la presencia de microorganismos patógenos en el agua que pueden causar enfermedades, dar sabor y olor al agua y, posiblemente, interferir con los procesos de tratamiento del agua. Los tanques sépticos mal diseñados y los campos de lixiviación pueden ocasionar impactos en aguas superficiales y subterráneas. Las áreas de depósito de basura también pueden ocasionar impactos en aguas superficiales y subterráneas a través de la lixiviación y transporte de desechos en escorrentía de aguas superficiales.

2. Identificación y Caracterización de Aguas Receptoras Potenciales

Un aspecto importante del manejo ambiental del agua es la identificación y caracterización de las aguas receptoras potenciales que pueden ser impactadas por descargas contaminantes. La información requerida para completar esta tarea incluye:

La ubicación y usos benéficos de las aguas superficiales que pueden ser impactadas por actividades del proyecto; la ubicación (profundidad y extensión del área), dirección del flujo, y usos benéficos de las aguas subterráneas subyacentes al lugar del proyecto que podrían ser impactadas por las actividades del proyecto, y la identificación de todos los criterios de calidad de agua existentes aplicables a las aguas superficiales y subterráneas, y a la presente calidad de las aguas superficiales y subterráneas potencialmente impactadas.

La ubicación de las aguas superficiales puede ser determinada refiriéndose a mapas existentes, información de agencias públicas, atlas y a informes existentes de investigaciones del área del proyecto, o si dicha información no estuviera disponible, a través del mapeo aéreo y estudio del suelo. La presencia de aguas subterráneas puede ser determinada por la literatura y los atlas de aguas existentes, o si se requiere, por la instalación de pozos o piezómetros. La dirección de flujo del agua subterránea también puede ser obtenida de la literatura existente o las medidas del nivel de agua de pozos instalados y piezómetros.

Depositos

Posibles Impactos en la Calidad de las Aguas

Pilas de desechos (desmontes y materiales de desbroce, material residual de pilas de lixiviación, relaves secos)

Erosión con la consecuente descarga de sedimentos en las aguas superficiales.
Producción de solución ácida de lixiviación y transporte de metales pesados a las aguas superficiales y subterráneas.
Defectuosa inclinación del talud, produciendo la descarga de sedimento y la dispersión de desechos en las aguas superficiales.
Transporte de finos mediante el viento hacia aguas superficiales.

Canchas de Relaves

Relaves depositados como pulpa

Formación de solución de lixiviación y filtración de desechos hacia aguas subterráneas y superficiales.
Erosión, con la consecuente descarga de sedimentos hacia aguas receptoras.
Transporte de finos a las aguas superficiales por acción del viento.
Deterioro de las presas de pulpas, de relaves, particularmente

durante

tormentas.

Pozas de almacenamiento de aguas residuales

Filtración de la poza hacia aguas superficiales y subterráneas.
Derrames, incluyendo la acumulación de agua de inundaciones que ocasionan el desborde y rompimiento de la presas.

Los usos productivos de las aguas superficiales comprenden el abastecimiento de agua para uso municipal, industrial, agrícola, doméstico, navegación, multiplicación de peces y vida salvaje, generación hidroeléctrica, distracción estética y visual, alimentación de aguas subterráneas, recreación y otros usos públicos. Las aguas subterráneas aún no se utilizan con tanta frecuencia como las aguas superficiales, pero sus usos benéficos pueden incluir fuentes de agua municipal, industrial, agrícola y doméstica. La información sobre los usos del agua que puede ser impactada por las actividades del proyecto puede ser proporcionada por el Ministerio de Salud, si dicha información existiera. Si éste no fuera el caso, se puede recopilar una lista de usos del agua a través de la observación y estudio de personas que vivan en el área y la recopilación de información sobre el uso del agua por parte de la vida silvestre acuática y terrestre.

Los criterios de calidad de agua aplicables a las aguas que pueden ser impactadas por las actividades del proyecto pueden obtenerse en el Ministerio de Salud, si es que existieran. De lo contrario, el operador del proyecto debe proponer estándares de calidad de agua al Ministerio de Salud basados en la información del uso del agua recolectada.

La calidad de agua existente debe establecerse para todas las aguas que pueden ser impactadas por descargas de contaminantes. Esta información junto con los criterios de calidad de agua influyen en el grado en que las descargas a las aguas pueden reducirse o eliminarse, y también en los requerimientos de tratamiento para los efluentes descargados.

3. Metodología para el Manejo de los Recursos de Aguas

En las siguientes secciones se tratarán las metodologías para la prevención y reducción de descargas contaminantes, el tratamiento de descargas y la eliminación.

El manejo de escorrentías de aguas superficiales se discuten primero en el Capítulo II debido a su naturaleza e importancia general en el manejo de descargas contaminantes. Por su significado para los emplazamientos mineros, el drenaje ácido de mina y su control se discute a continuación en el Capítulo III, seguido por discusiones del manejo de descargas provenientes de depósitos en el Capítulo IV, agua de procesos de beneficio en el Capítulo V y residuos humanos en el Capítulo VI.

Se consideran aspectos importantes del manejo ambiental de los recursos de agua al balance de agua en un proyecto y al tratamiento de descargas. Ambos aspectos juegan roles importantes en el manejo de aguas superficiales, DAM y descargas provenientes de depósitos y operaciones de beneficio. El balance de aguas se discute en el Capítulo VII y el tratamiento de aguas, en el Capítulo VIII.

Otros aspectos importantes del manejo ambiental de los recursos de agua son los programas de monitoreo durante las operaciones del proyecto y los planes de cierre del sitio. Estos aspectos se discuten en los Capítulos IX y X respectivamente.

METODOS

Capítulo II. METODOS DE MANEJO DE ESCORRENTIAS DE AGUAS SUPERFICIALES

El manejo de escorrentías de aguas superficiales puede comprender:

- 1) la derivación, colección y tratamiento de escorrentías provenientes del sitio minero y
- 2) la derivación y colección de escorrentías de las áreas adyacentes al sitio.

Los objetivos primarios del manejo de escorrentías de aguas superficiales son:

t la prevención de deslizamientos de los depósitos a fin de reducir el potencial de erosión y el transporte de constituyentes en escorrentías de aguas superficiales para reducir el contacto del agua con los desechos mineros que pueden generar DAM.

t la prevención de deslizamientos de las pozas de agua de proceso/pozas de aguas residuales para reducir el riesgo de desbordes de las pozas con descargas controladas de constituyentes al medio ambiente,

t la derivación y contención de escorrentías contaminadas de los depósitos de desechos o que han sido contaminados por las operaciones del sitio para su tratamiento y eliminación.

t la derivación y contención de escorrentías para ser usadas como fuentes de abastecimiento de agua.

En la lista de objetivos para el manejo de escorrentías superficiales anteriormente mencionada se encuentra la separación de las escorrentías limpias de aquellas contaminadas para minimizar la contaminación de drenaje superficial y los requerimientos de tratamiento.

El manejo de aguas pluviales se realiza a través del diseño e implementación de estructuras hidráulicas tales como canales de drenaje, diques, pozas de detención/retención y pozas de almacenamiento para interceptar, contener y transportar escorrentías pluviales. El uso de cada una de estas estructuras se discute brevemente a continuación.

1. Canales de Drenaje

Los canales de drenaje pueden ser construidos en la parte superior de las instalaciones del proyecto, las superficies impermeabilizadas de las pilas de lixiviación, los depósitos y las pozas de agua de proceso a fin de interceptar y conducir las escorrentías de aguas superficiales de estas áreas a zonas alejadas de las instalaciones (ver figura 3.1). Esta escorrentía puede ser descargada al cuerpo de agua más cercano o dirigida a una poza de almacenamiento de agua para utilizarla como agua para el proyecto. Alternativamente, los canales de drenaje pueden ser construidos en la parte inferior de las instalaciones del proyecto a fin de interceptar las escorrentías contaminadas de estas instalaciones para el tratamiento o eliminación en la cancha de relaves.

Las consideraciones importantes para el diseño de los canales de drenaje incluyen:

t La magnitud de flujo del diseño: la magnitud de flujo del diseño se utiliza para dimensionar el canal y se basa en la magnitud del área de drenaje, las características hidrológicas del área de drenaje y el diseño en caso de lluvia usado para calcular escorrentías provenientes del drenaje.

t Tamaño y configuración: el tamaño del canal está en función de los requerimientos de capacidad y altura libre del canal, su pendiente y el tipo de material de estratificación de la base. El canal puede ser de cualquier configuración a menos que existan ciertas limitaciones

(por ejemplo: límites en el ancho y profundidad), o puede ser construido de acuerdo a la disponibilidad de equipo para su construcción.

t Protección y recubrimiento contra la erosión del canal: se puede utilizar grava, gravilla y pasto para proteger un canal de la erosión. Se debe prestar atención al mantenimiento requerido y a la disponibilidad de los materiales escogidos para la protección de la erosión. En algunas situaciones, como en el caso de drenajes, los canales se localizan aguas abajo de las pozas de solución de las pilas de lixiviación para interceptar el rebalse de la solución, se debe tomar en cuenta el recubrimiento de los canales con materiales impermeables para prevenir la infiltración de constituyentes del canal.

t Protección del canal aguas abajo: la construcción de los canales de derivación generalmente ocasionan incrementos en los caudales de flujo de corrientes naturales localizados aguas abajo del canal construido por el hombre. Como resultado, la corriente receptora puede erosionar. Los enrocados y caídas deben ser construidos al final de los canales de derivación para reducir la magnitud del flujo del canal y proteger la corriente receptora.

2. Diques

Se puede utilizar diques alrededor de las instalaciones del proyecto para prevenir deslizamientos de aguas superficiales a las instalaciones e inundación de éstas durante crecidas y/o prevenir la descarga de aguas contaminadas de una instalación hacia áreas adyacentes como en el caso de un dique construido alrededor de superficies impermeabilizadas de lixiviación. La altura del dique construido y los requerimientos de estabilidad son parte de las consideraciones que se deben tomar en cuenta en el diseño de los diques.

3. Pozas de Detención/Retención

Las pozas de detención/retención se utilizan para controlar las aguas superficiales mediante el almacenamiento y reducción en la magnitud de flujo. Un ejemplo de uso podría ser una poza de detención localizada en la boca de un embalse de drenaje utilizado para reducir flujos pluviales de manera que un canal de drenaje que será construido aguas abajo de la poza de detención puede ser reducido en tamaño. Las diferencias primarias entre las pozas de detención y retención es que la poza de detención permanece seca entre periodos de lluvia mientras que una poza de retención siempre contiene agua.

El tamaño de las pozas de detención/retención se basa en el diseño de precipitación, área de la cuenca hidrográfica, magnitud de flujo del diseño, volumen de escorrentía y requerimientos de altura libre.

4. Pozas de Almacenamiento

Se puede construir pozas de almacenamiento para contener aguas superficiales que son conducidas a la poza ya sea para usarlas en el proceso minero o para que sean tratadas antes de su descarga. El volumen de la poza de almacenamiento es una consideración del diseño dependiendo de las operaciones de la poza, capacidad de los trabajos de tratamiento, etc.

FORMACION

Capítulo III. FORMACION Y MANEJO DEL DRENAJE ACIDO DE MINA

El Drenaje Acido de Mina (DAM) resulta de la oxidación de minerales sulfurosos, particularmente la pirita, en roca cuando son expuestos al agua y al aire. A menudo, la generación de DAM puede ser acelerada por la actividad biológica, particularmente, el *Thiobacillus ferrooxidans* que se desarrolla vigorosamente en medios de pH bajo.

Teniendo en cuenta las complejidades del DAM, la discusión en este documento guía necesariamente es un breve resumen de los aspectos claves del DAM que son: 1) fuentes de DAM, 2) generación de DAM, 3) predicción de DAM, y 4) métodos para controlar el DAM. Sin embargo, existen numerosos informes y estudios (referencias 2, 3 y 4), además de la "Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Mina", publicada por la Dirección General de Asuntos Ambientales, donde se recomienda al usuario de este documento guía dirigirse, para discusiones mas detalladas del proceso de DAM.

1. Fuentes de DAM

Las fuentes potenciales de DAM para las operaciones mineras y de beneficio incluyen:

t drenaje de labores mineras subterráneas

t escorrentías de labores mineras a tajo abierto

t pilas de desmonte, y

t canchas de relaves

Tal como se discutió anteriormente, el DAM resulta de la oxidación de minerales sulfurosos en la roca cuando son expuestos al agua y al aire.

Por lo tanto, la generación de DAM de las fuentes potenciales previamente descritas requiere de suficiente minerales sulfurados y agua y oxígeno en cantidades adecuadas para soportar las reacciones químicas y biológicas que prolonguen la existencia del DAM. Para las pilas de desmonte y canchas de relaves, la presencia tanto de agua como de oxígeno en estos materiales estará en función de la permeabilidad del material. En cuanto a la presencia del agua, estará en función del clima del área (por ejemplo, precipitación y evaporación total que influirán en la filtración de aguas pluviales), y/o ubicación (por ejemplo, deslizamiento de aguas superficiales).

El periodo de formación y descarga inicial del DAM puede variar. Por ejemplo, la formación de DAM en minas subterráneas y a tajo abierto no se presentará hasta que la roca sulfurosa sea expuesta al aire, situación que no ocurrirá hasta que el nivel del agua subterránea haya sido disminuido durante las operaciones mineras. Por muchos años, tal vez no ocurra la formación de DAM en las canchas de relaves, ya que el ingreso de oxígeno en los relaves es inicialmente bajo debido a que éstos son colocados en una condición saturada o bajo agua y el tamaño físico de los relaves ocasiona menor permeabilidad de los depósitos de relaves.

2. Formación de DAM

El proceso de generación de ácido puede tratarse en términos de:

t oxidación de sulfuro de hierro,

t oxidación de otros sulfuros de metales bases,

t ácido aeróbico que genera reacciones químicas, y

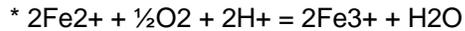
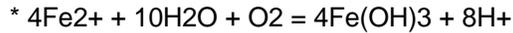
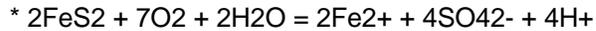
t oxidación de otras formas sulfurosas.

a) Oxidación de Sulfuro de Hierro

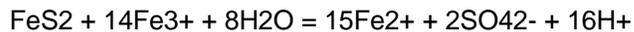
El principal contribuyente de la generación ácida de las actividades mineras es la oxidación del sulfuro de hierro (pirita y marcasita). Para

propósitos de esta guía, la discusión de la oxidación del sulfuro de hierro será presentada en términos de la pirita.

La oxidación de la pirita puede presentarse tanto directamente de la reacción con el aire y el agua, o indirectamente de la reacción con el hierro férrico. Las tres reacciones(2) presentadas a continuación pueden describir el proceso de oxidación directa de la pirita:



La siguiente ecuación puede describir la oxidación indirecta:



Los factores bioquímicos o geoquímicos pueden influir en las reacciones de oxidación de la pirita. La bacteria *Thiobacillus ferro-oxidans* (T.ferro-oxidans) se encuentra bastante extendida en ambientes naturales y se ha demostrado que acelera el proceso de oxidación de la pirita, principalmente a valores bajos de pH de aproximadamente 3 a 3,5.

Las consideraciones geoquímicas en la oxidación de la pirita incluyen el pH, el oxígeno, la alcalinidad, la abundancia de pirita y los granos de pirita en áreas superficiales, la temperatura, los micro-ambientes, los defectos estructurales de la pirita y trazas de elementos.

b) Oxidación de otros Sulfuros de Metales Bases y otras Formas Sulfurosas

Se ha indicado la oxidación de otros sulfuros de metales bases(2) directamente por bacterias en presencia de aire o agua, o indirectamente, por el hierro férrico. Estos sulfuros incluyen la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS). Más aún, existe cada vez mayor convicción de que otras formas de azufre (por ejemplo, sulfitos y tiosulfatos) pueden influir apreciablemente en la generación de ácido. Debido a que la oxidación del sulfuro de hierro es el proceso primario de la formación de ácido en los desechos de mina, el proceso de oxidación de otros sulfuros de metales-bases y formas de sulfuros no son discutidas en detalle en esta guía; sin embargo, el usuario puede remitirse a la referencia presentada anteriormente para una discusión detallada de estos procesos.

3. Procesos de Consumo de Acido

La formación de Drenaje Acido de Mina puede ser inhibido o retardado por las reacciones con otros componentes presentes en los desechos de mina o en el agua que se infiltra en los desechos de mina. La generación de ácido puede ser afectada por reacciones con:

t Carbonatos,

t aluminosilicatos, y

t otros compuestos

Los carbonatos, como la dolomita y la calcita, son materiales que se encuentran presentes en la mayoría de tipos de roca y pueden estar disponibles, ya sea en solución o como sólido, para consumir ácido. Los minerales de silicatos y silicatos portadores de aluminio (aluminosilicatos) aunque consumidores de ácido menos efectivos que los carbonatos, pueden tener efectos significativos en el proceso de generación de ácido. En contacto con el agua, los silicatos y aluminosilicatos tienden a producir un pH alcalino. También, cuando están en

contacto con los ácidos, tienden a degradarse, consumen iones de hidrógeno y producen minerales de arcilla. En resumen, para sistemas productores de ácido más lentos, la descomposición del silicato y el consumo del ácido pueden representar un control efectivo de generación de ácido.

4. Predicción del Drenaje Acido

En el Manejo de Desechos de Mina (2) se describe una alternativa para la predicción del drenaje ácido de roca ejecutable en fases. Esta opción en fases incluye:

t Definir las unidades geológicas (y su mineralización) que probablemente serán encontradas durante las operaciones de minería.

t Definir e implementar un programa de muestreo de materiales.

t Llevar a cabo pruebas de campo y laboratorio, de ser necesario.

t Evaluar la formación potencial de DAM.

t Llevar a cabo mayor muestreo y pruebas, y

t Caracterizar los materiales de desecho en términos de potencial de generación de ácido.

a) Geología y Mineralización

Esta etapa comprende la identificación de unidades litológicas que probablemente serán encontradas al momento de las operaciones mineras y la descripción de las propiedades geoquímicas y la clasificación y tipo de mineralización presente en cada una de las unidades. Cada unidad puede presentar características en términos de generación de ácido y potencial de neutralización. Además es necesario identificar los tipos de minerales de sulfuro presentes y la forma en que ocurre la mineralización.

b) Muestreo del Material

Las fuentes de muestras para las pruebas de predicción de generación de ácido incluyen las pilas de desmonte o almacenamiento, relaves, paredes y roca del tajo que rodean las labores subterráneas. Se propone que las muestras de los emplazamientos mineros se obtengan del centro de la mina durante la perforación exploratoria y el mineral gastado, de las pruebas metalúrgicas.

c) Prueba de Campo y Laboratorio

Los métodos de prueba comunes para la predicción del DAM son las pruebas estáticas geoquímicas y las pruebas cinéticas de humedad de celda de balance ácido-base. Las pruebas estáticas son rápidas y económicas y, principalmente, se utilizan para proporcionar una indicación preliminar del potencial generador de ácido neto de un material permitiendo que el material sea categorizado ya sea, como generación no ácida, posible generación ácida o generación ácida. El Manejo de Desechos de Mina (2) describe y presenta los resultados de la comparación de cinco técnicas de pruebas estáticas, que a continuación presentamos:

t Prueba Inicial de Investigación de B.C.,

t prueba Sobek,

t método de producción alcalina,

t prueba de peróxido de hidrógeno y

t prueba de producción de ácido-neto

Las pruebas cinéticas de humedad de celdas son mucho más completas y comprenden la maduración o «intemperismo» de muestras bajo condiciones de laboratorio o de campo que simulan los cambios químicos variados en el tiempo que se presentan en el material. Las pruebas

cinéticas se usan para confirmar el potencial para generar acidez neta que posee el material, determinar los porcentajes de oxidación y neutralización del sulfuro, determinar las concentraciones del constituyente que se presentan en el drenaje ácido y evaluar la efectividad de los métodos propuestos para el control y tratamiento del DAM.

Generalmente, las pruebas cinéticas de laboratorio tienen una duración de 20 semanas y proporcionan información cualitativa sobre la calidad del agua de drenaje. Las pruebas cinéticas geoquímicas, llevadas a cabo en el emplazamiento minero en pilas o depósitos de desechos a escala piloto, pueden ser conducidas por un periodo de meses e incluso años.

El Manejo de Desechos de Mina (2) describe y compara siete métodos de pruebas cinéticas geoquímicas. Estos métodos son:

t Confirmación de la investigación de B.C.,

t confirmación modificada,

t prueba de frasco agitado,

t prueba de extracción soxhelt (uso de frasco-condensador),

t prueba de columna, y

t prueba a escala piloto.

5. Control de la Generación de Acido y Migración de Solución de Lixiviación

Con el fin de prevenir el DAM en instalaciones nuevas y mitigarlo cuando se presente en instalaciones existentes, se toman medidas de control del DAM. Las alternativas para llevar a cabo dicho control pueden ser caracterizadas como: 1) control del proceso de generación ácida, 2) control de la migración de la solución de lixiviación, y 3) tratamiento del DAM. El cuadro 4-1 resume estas medidas de control.

APLICACION

Capítulo IV. APLICACION DE LOS METODOS PARA EL MANEJO DE LOS RECURSOS DE AGUA EN LOS DEPOSITOS

1. Localización de los Depósitos

Una consideración fundamental de las operaciones mineras es la ubicación de los depósitos. Estos deben localizarse a una distancia económicamente corta de la mina activa e, incluso, deben tomarse en cuenta los posibles impactos a los recursos de agua como resultado de los puntos de ubicación. Los depósitos son instalaciones de almacenamiento permanentes para los desechos mineros y su ubicación debe reflejar esa filosofía.

Evite localizar los depósitos en los drenajes. Los depósitos que se localizan en drenajes deben tener canales construidos para derivar el flujo del drenaje original alrededor del depósito. Si el flujo no se deriva, puede percolar a través del depósito contribuyendo a la formación de DAM y/o erosionar y transportar sedimentos en la dirección del drenaje.

Otra consideración para la ubicación de los depósitos de desechos es localizarlos en lo alto de formaciones geológicas naturales impermeables que puedan impedir el flujo de soluciones de lixiviación desde el depósito hasta las aguas subterráneas. Como otra alternativa, se debe considerar que el tipo de formación pueda ser un amortiguador natural (es decir, que contenga minerales carbonatados) impidiendo la formación de DAM. Dependiendo de la calidad de la formación, los depósitos geológicos naturales pueden proporcionar superior protección ambiental que la proporcionada por los depósitos construidos por el hombre con técnicas de ingeniería.

2. Canchas de Relaves

Existen numerosos métodos que pueden ser utilizados para minimizar los impactos relacionados con el agua asociados a las canchas de relaves. Estos métodos incluyen la utilización de un sistema de contención de ingeniería, técnicas de disposición de relaves, prevención de la escorrentía de aguas superficiales y el reciclaje y reutilización del agua de la cancha.

a) Sistemas de Contención de Ingeniería

Una opción para el diseño de una cancha de relaves que podría minimizar los impactos ambientales incluye la construcción de una represa con un sistema de revestimiento y otro de recolección de solución de lixiviación. El sistema de revestimiento podría incluir revestimientos de arcilla (naturales o fabricados), revestimientos sintéticos o una combinación de ambos. El sistema de revestimiento protegería contra la infiltración de agua de relaves en aguas subterráneas. La recolección de solución de lixiviación minimiza la presión hidrostática en la cancha y fomenta el secado de los relaves. El sistema de recolección de la solución de lixiviación puede consistir de una capa de grava libre, de drenaje o un sistema de tuberías perforadas, una poza o tanque para la recolección de líquidos y una forma de tratamiento para los líquidos.

b) Técnicas de Disposición

Existen diferentes técnicas de disposición de relaves. Un método que, con seguridad, disminuye el potencial para la generación de solución de lixiviación es la disposición seca de relaves, que incluye el secado y filtración de relaves en la planta de recuperación.

Los relaves en forma de lodo pueden ser descargados en diferentes puntos en todo el perímetro de la cancha de relaves, lo que contribuirá a la evaporación del agua y facilitará el secado. De igual manera, se puede aumentar la evaporación descargando los relaves en capas delgadas, dejando que sequen y solidifiquen antes de la adición de la próxima capa. Además, también se puede contribuir a la evaporación esparciendo agua sobre los relaves mediante la construcción de pequeñas bermas en la parte superior de los relaves durante su disposición, tal como se muestra en la Figura 5-1.

Otra técnica que puede facilitar el secado es la co-disposición de relaves con desmonte no generador de ácido. Esta técnica además puede ayudar a neutralizar los relaves ácidos combinándolos con desmonte alcalino. Un beneficio adicional de la co-disposición puede representar una mejora de la protección de las pozas de relaves.

c) Otros Métodos de Manejo

Otros métodos que pueden reducir impactos provocados por los relaves son: la construcción de canales de derivación de drenaje sobre los relaves y la decantación y reciclaje del agua de la cancha de relaves. Tal como se discutió previamente en el Capítulo IV, los canales de derivación de drenaje construidos en la parte superior de los relaves podrían interceptar deslizamientos y alejarlos de las instalaciones de relaves, limitando la infiltración potencial del agua. Decantar el agua de las canchas de relaves y reciclarlas como agua de proceso contribuirá al secado de los relaves y reducirá el volumen total de los efluentes generados por el proceso de beneficio.

3. Pilas de Desmonte y Material de Desbroce

La preocupación principal en cuanto a las pilas de desmonte y al material de desbroce es la formación de DAM con el tiempo y la erosión y transporte de sedimentos en escorrentía de agua superficial. Al respecto, se aplica aquí la discusión de la derivación de deslizamientos de aguas superficiales hacia las pilas de las pozas de relaves.

Un método para minimizar la formación de DAM es nivelar apropiadamente las pilas para incrementar las escorrentías y reducir así la infiltración de la precipitación directa sobre éstas. Si las propiedades de la roca permiten utilizarla como relleno para la construcción de diques, otro método puede ser encapsularla como relleno en los diques de las canchas de relaves.

4. Instalaciones de Lixiviación en Pilas

Los principales temas de preocupación en lo referente al material gastado de lixiviación en pilas son la erosión y el transporte de sedimentos en escorrentía de aguas superficiales y la lixiviación de reactivos (por ejemplo, cianuro), residuo que puede permanecer en el material de lixiviación después de finalizadas las operaciones de lixiviación. La prevención de deslizamientos mediante el uso de los canales de drenaje para la derivación y el nivelado del material de lixiviación para minimizar escorrentías y reducir la infiltración son métodos mediante los cuales se pueden reducir los impactos provocados por el material gastado de lixiviación.

Luego de finalizadas las operaciones, algunas medidas adicionales en el diseño de superficies impermeabilizadas de lixiviación pueden proporcionar una protección adicional al cesar las operaciones. Se puede proteger las aguas superficiales de la contaminación usando cubiertas bajo las superficies impermeabilizadas de lixiviación y sus pozas de los sistemas de colección de líquidos (ver Fig. 5-2). La colocación de revestimientos bajo las superficies impermeabilizadas y los sistemas de colección asociados no sólo reducen la migración de la solución de lixiviación proveniente de la pila de lixiviación hacia las aguas subterráneas sino que también previene la pérdida de soluciones cargadas que contienen metales valiosos. La protección de las aguas subterráneas conseguida por el uso de revestimientos durante las operaciones continuará luego del cese de las operaciones.

MANEJO D AGUAS

Capítulo V. MANEJO DE LAS AGUAS PROVENIENTES DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO

Mediante el manejo del agua de los procesos de beneficio se pueden minimizar los impactos a los recursos de agua, a través de la reducción de la cantidad de agua dulce usada en los procesos, la reducción en la cantidad de efluente que debe ser eliminado y el tratamiento y disposición adecuados de éste. Se puede lograr la reducción de la cantidad de agua dulce usada en los procesos a través de las consideraciones del diseño, que no se tratan en esta guía, y a través de la reutilización y reciclaje de efluentes de procesos, que sí son tratados en este documento.

Debido a que la cantidad de efluentes generados en un proceso es proporcional a la cantidad de agua utilizada en éste, la reducción del efluente también se puede lograr mediante su reutilización y reciclaje. Finalmente, los métodos escogidos para el tratamiento y disposición de efluentes tendrán un efecto directo en el grado de impacto a los recursos de agua asociados con el efluente del proceso.

1. Separación de las Corrientes de Desechos

Un punto importante en el reciclaje, tratamiento y disposición de efluentes de proceso es la separación de corrientes de desechos efluentes. Por ejemplo, los subprocesos del proceso de beneficio producirán efluentes de diferente calidad. Mientras que el efluente de un subproceso puede ser directamente reutilizado en el proceso de beneficio o eliminado sin tratamiento alguno, si ese efluente de alta calidad debiera ser mezclado con otro de menor calidad, la mezcla resultante puede no ser de suficiente calidad para ser directamente reutilizada o eliminada sin tratamiento. De igual manera, mientras un efluente tal vez requiera un tratamiento simple (por ejemplo, neutralización ácida) para mejorar su calidad para la reutilización o eliminación, si se mezclara con otro efluente, el efluente resultante tal vez requiera un método de tratamiento incluso más caro y complejo, a fin de mejorar su calidad para la reutilización o disposición.

La determinación sobre qué efluentes separar y cuáles pueden ser combinados depende de la calidad del efluente, volumen del efluente, requerimientos del tratamiento y la disposición intencional del efluente (por ejemplo, reciclar y reutilizar o eliminar). Esta es una consideración del diseño y su discusión va más allá del objetivo de esta guía. Sin embargo, se pone especial consideración a que la separación del efluente de proceso debe ser usada como una herramienta de manejo del agua y que su importancia se incrementará a medida de que los estándares de calidad de agua para las descargas se vuelvan más rigurosos y los costos del tratamiento y disposición del agua se eleven.

2. Reciclaje y Reutilización del Agua

El reciclaje y reutilización del agua de proceso es una de las consideraciones primarias para el manejo efectivo del agua. El reciclaje puede reducir la cantidad de agua dulce requerida en los procesos minero-metalúrgicos, minimizar los requerimientos del tratamiento y la cantidad de agua de proceso descargada en el ambiente y conservar los reactivos usados en los distintos procesos.

Tal como se describe líneas abajo, se pueden tomar numerosas medidas para el reciclaje. La elección de la medida es una consideración de diseño y dependerá de la calidad y volumen del efluente y los requerimientos del tratamiento.

a) Reciclaje Directo

El reciclaje directo causa el rebombeo del agua de una poza de agua residual o de una represa de relaves para su utilización en el proceso de molienda. El reciclaje directo no incluye el tratamiento del agua previo a su reutilización.

b) Reciclaje y Represamiento

Esta medida es similar al reciclaje directo excepto que, antes de la reutilización, el agua reciclada primero es conducida de la represa de relaves a una poza donde, con el tiempo, la sedimentación de los constituyentes, los procesos biológicos y la oxidación que ocurren naturalmente pueden mejorar su calidad. La poza puede ser localizada para interceptar la filtración de una poza de relaves, a manera de fuente adicional de agua para el reciclaje. Además, el agua dulce puede ser agregada a la represa como medio para mejorar la calidad del agua.

c) Reciclaje y Tratamiento

Incluyen tanto las medidas anteriormente descritas como el tratamiento del efluente del proceso previo a su reutilización. Los procesos de tratamiento se discuten más detalladamente en el Capítulo X.

MANEJO DE DESECHOS

Capítulo VI. MANEJO DE DESECHOS PROVENIENTES DE LA ACTIVIDAD HUMANA

Los desechos relacionados con la actividad humana incluyen las aguas servidas y los residuos sólidos. Estos desechos pueden impactar fuentes de agua a través de la introducción de microorganismos patógenos encontrados en aguas servidas y soluciones de lixiviación de los botaderos de basura. Por lo tanto, los desechos generados por la actividad humana en el emplazamiento minero y los campos de labores adyacentes deben ser tratados como parte de un programa de manejo ambiental de los recursos de agua.

1. Aguas Servidas

Existen diversas formas de tratar las aguas servidas domésticas antes de descargarlas a la corriente receptora. Entre otras podemos citar los sistemas sépticos y las plantas pre-ensambladas de tratamiento. Construir una planta de tratamiento de agua de capacidad grande resultaría costoso, considerando especialmente la duración relativamente corta de la actividad minera. Sin embargo, el tipo de plantas pre-ensambladas, que pueden tratar aguas servidas generadas en todo el sitio por 25 a 5000 personas demuestra ser una alternativa viable.

2. Desechos Sólidos

Los desechos sólidos eliminados inapropiadamente también pueden resultar una fuente de contaminación del agua superficial y subterránea. Por ejemplo, los depósitos de reactivos dispuestos inadecuadamente o irresponsablemente pueden contener reactivos residuales que podrían ser transportados en escorrentías de aguas superficiales o eventualmente lixiviar al agua subterránea. Medidas simples, como concentrar todos los desechos sólidos lejos de cualquier vía de drenaje y cubrirlos diariamente, reducirán significativamente el potencial de los residuos sólidos para producir impactos adversos a las fuentes de agua; dichas medidas deben ser tomadas para el emplazamiento y los campos de labor minera.

BALANCE DE AGUA

Capítulo VII. BALANCE DE AGUA

Debe llevarse a cabo un balance completo de agua para las operaciones del proyecto a fin de asegurar el reciclaje y los requerimientos de tratamiento y disposición del agua. La información requerida para llevar a cabo un balance de agua incluye para cada subproceso de molienda, lo siguiente:

- t la cantidad mínima, máxima y promedio necesaria de agua
- t la frecuencia de uso de agua,
- t la calidad de agua requerida,
- t el tipo y concentración de constituyentes recogidos por el agua en el ciclo del proceso,
- t la capacidad para reciclar el agua a través del proceso sin tratamiento alguno y el número de veces que el agua puede ser reciclada a través del proceso sin ser tratada,
- t la capacidad para reciclar el agua a través del proceso después del tratamiento,
- t la capacidad para reutilizar el agua en otros procesos, directamente o después del tratamiento.

Adicionalmente, se deben conocer las condiciones climáticas en el sitio, particularmente para el caso del manejo de las operaciones de lixiviación en pilas.

En cuanto a este tipo de operaciones, esta información es vital para determinar los requerimientos del volumen de las pozas de soluciones estériles y cargadas. Por ejemplo, asumiendo que ninguna escorrentía proveniente de las áreas adyacentes se introdujera en las pozas, éstas deben ser calculadas para que pudieran recibir un incremento en el volumen de agua atribuible a la precipitación directa sobre las pilas de lixiviación y pozas que suceden durante precipitaciones prolongadas. Un diseño para casos de tormenta (por ejemplo, una tormenta las 24 horas del día en 100 años) debe ser el elegido para propósitos de diseño. No considerar la precipitación directa en éste puede ocasionar el desbordamiento de la poza y la descarga de agua no tratada a las áreas adyacentes y a las aguas subterráneas.

De manera general, se deben conocer las condiciones climáticas en el sitio para determinar si las técnicas escogidas para la disposición de efluentes, como la evaporación intensificada, son viables para cuantificar la cantidad de infiltración de la precipitación en los botaderos de desmonte a fin de estimar el potencial para la formación de un DAM, para determinar los requerimientos de irrigación para propósitos de recuperación, y para otros propósitos relacionados. La información climática que pudiera ser obtenida o recolectada incluye:

- t la precipitación,
- t la evaporación,

t la presencia de condiciones climáticas extremas, y

t otra información considerada apropiada para describir el clima en el sitio, requerido para el diseño del proyecto y la aplicación del balance de agua.

La información climatológica y meteorológica se puede obtener de la estación meteorológica más cercana o puede ser recopilada del sitio del proyecto. Se debe tener cuidado de no utilizar información de estaciones meteorológicas alejadas del área del proyecto, ya que la información climatológica y meteorológica puede no ser representativa del área del proyecto debido a las condiciones orográficas y otros efectos.

TRATAMIENTO DE AGUA

Capítulo VIII. TRATAMIENTO DEL AGUA

Cada proceso que utiliza agua en una operación de minería y beneficio individual requiere agua de mínima calidad particular. Por esta razón, tal vez se requiera que el tratamiento de agua sea previo a la reutilización durante el reciclaje. El tratamiento para el agua reciclada puede ser necesaria si:

- 1) los constituyentes en el agua después de su uso en un proceso prevendrían la reutilización directa del agua en el mismo proceso u otros, y/o
- 2) si la calidad del agua luego de su uso en un proceso podría ocasionar efectos adversos para los componentes del sistema (por ejemplo, agua ácida que corroe tuberías, descascaramiento de tuberías).

También puede ser necesario el tratamiento del agua para corrientes de desechos que emanan de las operaciones de minería y beneficio antes de su eliminación. Estas pueden incluir el agua de mina, el efluente de los procesos de beneficio, y la filtración y escorrentía de agua superficial provenientes de las represas de relaves, material gastado de lixiviación en pilas y los depósitos de desechos (por ejemplo, DAM).

Dependiendo de los requerimientos de la calidad de agua, el tratamiento puede incluir:

t la neutralización,

t la remoción de los particulados,

t la remoción de los sólidos disueltos, y/o

t la remoción de constituyentes orgánicos

Ambos sistemas de tratamiento activo y pasivo pueden ser utilizados para el tratamiento de agua.

Las descripciones detalladas de las técnicas de tratamiento y sus procesos químicos asociados van más allá de los objetivos de esta guía. Sin embargo, a continuación se presenta un resumen de las técnicas que pueden ser consideradas para el tratamiento del efluente de las operaciones mineras y de beneficio. Adicionalmente, se hace referencia a manuales y estudios del diseño que tratan extensamente los tratamientos discutidos en esta guía.

1. Tratamiento Pasivo

Los sistemas pasivos son los que intentan tratar las aguas sin la intervención humana. Estos pueden incluir, por ejemplo, la descarga de las aguas de la mina a través de sistemas biológicos como tierras pantanosas, musgo y turba para el control de ácido y metales, la reducción de sólidos suspendidos, nutrientes y metales. Las descripciones de los sistemas de tratamiento ecológico y biológico pueden encontrarse en muchos libros incluyendo el de Ritcey (4) y cualquier autor citado en la referencia en esta guía.

2. Tratamiento Activo

Los sistemas de tratamiento activo son aquellos procesos que requerirían una operación continua por el hombre, tales como las plantas de tratamiento de aguas residuales. Algunos procesos en los sistemas de tratamiento activo incluyen:

- a) neutralización y precipitación,
- b) aereación,
- c) filtración y osmosis inversa,
- d) intercambio iónico, y
- e) ablandamiento químico.

A continuación presentamos un resumen de estos procesos. Las descripciones completas de éstos y otros procesos pueden ser consultadas en la EPA (3), Ritcey (4), American Water Works Association (5) y en las referencias citadas en éstos.

a) Neutralización-Precipitación

Este proceso comprende la neutralización del efluente ácido proveniente de las operaciones de minería y beneficio a través de la adición de álcalis tales como cal, piedra caliza, soda caústica y carbonato de sodio. En un sistema neutral, los iones de los metales pesados se hidrolizan y precipitan como hidróxidos. Los aniones formarán compuestos insolubles con muchos metales pesados a pH neutro y también pueden ser removidos simultáneamente. En la Figura 9-1 se presenta un proceso esquemático de neutralización con cal convencional.

Una consideración importante en el proceso de neutralización-precipitación es el manejo y disposición de lodos precipitados, particularmente, en lo que respecta al tratamiento del DAM. El manejo y disposición de lodos se presenta como uno de los problemas más significativos en la práctica de las operaciones de tratamiento del DAM. Se espera un volumen de lodos que oscila del 5% al 10% del flujo diario a través de una planta de tratamiento. Se han registrado volúmenes de lodos hasta de 33%. EPA (3).

Los métodos de desaguado y disposición de lodos incluyen:

t formación de lagunas

t disposición en mina profunda

t filtración al vacío

t filtración a presión

t secado de cama porosa, y

t centrifugación

Todos estos procesos se describen en detalle en el manual de la EPA(3) en donde se discuten profundamente los aspectos del desaguado y disposición de lodos.

b) Aereación

Los procesos de aereación son utilizados para mejorar el proceso de oxidación durante el tratamiento. Un ejemplo claro podría ser el uso de la aereación para incrementar la oxidación del hierro ferroso en forma férrica de manera que pueda ser efectivamente eliminado del DAM en un sistema de pH más bajo. Tal como lo muestra la Figura 9-2, la mínima solubilidad férrica ocurre a un pH de 8,0, mientras que la mínima solubilidad ferrosa sucede a un pH de alrededor de 11,0.

Los procesos de aereación utilizados comúnmente incluyen la aereación mecánica superficial, la aereación en cascada y la aereación de turbina sumergida. La aereación mecánica superficial introduce oxígeno en la poza de aereación por medio de cuchillas rotadoras localizadas debajo de la superficie del agua. Los aereadores mecánicos pueden ser flotantes o ser colocados estructuralmente debajo de la poza de aereación. Pueden ser utilizados ya sea en pozas de aereación cuadradas como en las circulares. La transferencia de oxígeno ocurre cuando el agua debajo de las cuchillas es empujada y salpica en toda la superficie de la poza de aereación. (Ver Figura 9-1).

La aereación de turbina sumergida introduce el oxígeno en una poza de aereación mediante el uso de un tubo rociador ubicado casi en el fondo de la poza de aereación. La acción cortadora de las cuchillas rotadoras localizadas sobre el tubo rociador produce pequeñas burbujas de aire que contribuyen a la transferencia de oxígeno. Los aereadores de turbina sumergida son menos eficientes que los aereadores mecánicos superficiales y requieren mayor demanda de energía.

La aereación en cascada introduce oxígeno mediante la turbulencia creada al conducir el agua por gravedad a través de un canal revestido de bloques esparcidores, debajo de una cascada formada por una serie de gradas o a través de una serie de caídas. Otra forma de introducir oxígeno en el sistema es conducir el agua a través de una cascada abierta, ancha y de poca profundidad.

c) Filtración y Osmosis Inversa

La filtración del efluente del proceso para eliminar los sólidos suspendidos y disueltos en una escala de 0,001 a 0,1 micrones, junto con una ósmosis inversa que elimine los sólidos disueltos menores a 0,001 micrones es un método excelente, pero caro, para mejorar la calidad del agua del efluente de descarga de las operaciones de beneficio y minería. También es altamente efectivo para remover casi en su totalidad los sólidos

disueltos en el DAM.

La ósmosis inversa (OI) se logra forzando el efluente filtrado a través de una membrana semipermeable a presión alta (por ejemplo, 281 kg/cm²) lo que permite que la calidad alta (el kg/cm² filtrado) pase a través de la membrana y sea recolectada, mientras que el agua altamente concentrada (el soluto o salmuera) sea retenida. Lo filtrado es de excelente calidad y puede ser reutilizado para la mayoría de procesos. Se ha registrado rechazo de sólidos disueltos en más de 90% y en algunos casos un 99%.

Una consideración importante en el uso de ósmosis inversa es el tratamiento y disposición de la salmuera ya que el proceso crea una corriente de desechos altamente concentrada. Por ejemplo, un sistema de OI con un porcentaje de recuperación de 90% creará una corriente de desechos con una concentración de constituyentes diez veces a la del agua que ingresa al sistema; sin embargo, el volumen de la corriente de desechos será solamente 10% del volumen que ingresa al sistema. Los posibles métodos de tratamiento y disposición son la neutralización con reactivos y la evaporación.

d) Intercambio Iónico

El intercambio iónico en el tratamiento del agua es el intercambio reversible de iones entre un medio sólido y una solución acuosa. El uso más común de intercambio iónico ha sido su aplicación en el ablandamiento de agua cargada de mineral para propósitos comerciales o domésticos. De la misma manera que en la ósmosis inversa, el intercambio iónico puede ser utilizado para eliminar los iones disueltos no deseados a fin de producir agua de alta calidad para numerosos usos incluyendo el agua de grado potable, si es seguido de la filtración y desinfección requerida. Igualmente, una consideración importante en el uso del intercambio iónico es el tratamiento y disposición de efluentes de desechos.

Los procesos de intercambio iónico desarrollados para el tratamiento del DAM incluyen el proceso

«Sul-bisul», el proceso «Desal» y el «Desal» modificado y, por último, el Proceso de Dos Resinas. Las descripciones detalladas de estos procesos y los de intercambio iónico pueden encontrarse en EPA (3) y Ritcey (4).

e) Ablandamiento Químico

El ablandamiento químico puede ser empleado para eliminar los iones disueltos del efluente de beneficio/minería cuando se considera que el efluente sea reutilizado o convertido en agua potable. La ventaja de utilizar el ablandamiento químico en la ósmosis inversa y el intercambio iónico es que sólo se producen corrientes de lodo y ninguna otra corriente de desechos, y únicamente se requiere el equipo de tratamiento convencional.

Dos procesos de ablandamiento químico que pueden ser empleados son el ablandamiento por soda-cal y por alúmina-soda-cal. La descripción detallada de estos procesos se pueden encontrar en las referencias citadas anteriormente.

MONITOREO

Capítulo IX. PROGRAMAS DE MONITOREO

El monitoreo de las aguas superficiales y subterráneas alertan a los operadores sobre la existencia de liberación de contaminantes. A pesar que no se pueden advertir visualmente todas las fugas, un programa de monitoreo bien diseñado puede detectarlas y prevenir o reducir los efectos asociados a las operaciones de beneficio/minería sobre las aguas superficiales y subterráneas. A continuación se proporciona una breve discusión de los aspectos de los programas de monitoreo. Adicionalmente, se sugiere al usuario de esta guía referirse a las guías publicadas por el Ministerio de Energía y Minas en cuanto a los procedimientos de monitoreo de agua.

Algunos factores que deberían tomarse en cuenta al momento de diseñar programas de monitoreo son:

- t Estudios de referencia y definición de los antecedentes del medio,
- t características de los desechos,
- t grado y naturaleza del depósito de desechos,
- t medio ambiente,
- t posibles vías de migración de los constituyentes.

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de estos factores.

1. Estudios de Referencia y Definición de los Antecedentes del Medio

Los resultados de los estudios de referencia y la definición de las condiciones del medio ambiente pueden proporcionar información de la calidad de agua, contra la cual se puede comparar la información del monitoreo de calidad de agua para determinar si se ha producido la contaminación de las aguas. Los estudios de referencia pueden ser realizados previamente a las operaciones de beneficio y de minería y podrían proporcionar datos de la superficie pre-operativa y de la calidad del agua subterránea. Los datos de la calidad de agua del medio refleja la concentración de constituyentes en las aguas de gradiente superior al sitio del proyecto. Estos datos son usados para definir los porcentajes naturales y las variaciones temporales en la concentración de constituyentes, para la comparación y análisis de la información sobre la calidad de agua recopilada durante el programa de monitoreo.

2. Características de los Desechos

Se debe determinar las características de los desechos de mina que pueden ser fuentes potenciales de contaminantes del agua (por ejemplo, las concentraciones y la movilidad de los constituyentes potencialmente dañinos en los desechos) a fin de identificar el tipo de constituyente por el cual las aguas superficiales y subterráneas deben ser analizadas durante el programa de monitoreo. Estos constituyentes a ser analizados no siempre son obvios. Por ejemplo, cuando se lleva a cabo un programa de monitoreo puede ser necesario considerar el análisis de los productos de reacción de los reactivos usados en el procesamiento de minerales o el DAM.

3. El Grado y Naturaleza del Depósito de Desechos

El tipo de depósito utilizado para los desechos puede influir en la magnitud de la migración de contaminación potencial y, por lo tanto, el

número y tipo de lugares de monitoreo que pudieran ser necesarios. Por ejemplo, las pozas o canchas de relaves no revestidas pueden liberar contaminantes sobre áreas bastante grandes. Los sistemas protegidos en forma natural también pueden filtrar en áreas grandes, así como en pequeñas fracturas, zonas de fallas pequeñas y otras zonas apartadas débiles. Por otro lado, los revestimientos sintéticos generalmente se debilitan en cualquier momento por la presencia de pequeños orificios o roturas.

4. Medio Ambiente

También debe tomarse en consideración el medio ambiente al momento de diseñar un programa de monitoreo ya que las condiciones ambientales del lugar juegan un rol importante en la migración, transporte y destino de los contaminantes. Los aspectos del medio ambiente que pueden ser preocupantes incluyen:

t el clima

t la proximidad de los cuerpos de agua

t las propiedades físicas de las formaciones geológicas

t las características hidrogeoquímicas del sitio minero

t la hidrología y el flujo y calidad de las aguas subterráneas naturales

Estos aspectos ambientales se discuten en mayor detalle en la Guía para la Preparación de Estudios de Impacto Ambiental (1).

5. Posibles Vías de Migración

Las posibles vías de migración deben ser evaluadas para determinar los lugares donde se debe realizar el monitoreo. Las vías de migración pueden incluir el viaje a través del sistema del depósito, mediante la zona vadosa de los suelos, y el flujo superficial hacia corrientes de agua que se desplazan por gravedad y lagos. Tal como se mencionó anteriormente, estas vías de migración son una función de las condiciones ambientales del lugar.

PLANES DE CIERRE

Capítulo X. PLANES DE CIERRE

Para el cierre permanente de una mina y sus depósitos es necesario proporcionar una protección a largo plazo contra el transporte y migración de los contaminantes de las áreas de labores mineras y los depósitos hacia las aguas superficiales y subterráneas. También se debe incluir el cierre permanente de las instalaciones de beneficio. Las fuentes principales de contaminantes, luego del cese de las operaciones serán los depósitos (canchas de relaves, stockpiles, etc.). Las condiciones del sitio, las características de los desechos, y las condiciones climáticas locales dictarán los métodos de cierre para los diferentes depósitos.

Las alternativas para el cierre fluctúan de la no acción o abandono hasta las actividades de cierre a escala total. La alternativa de no acción puede ser utilizada cuando el depósito no representa una amenaza para el medio ambiente. Se debe recurrir a controles institucionales. Estos

pueden incluir el acceso restringido al sitio usando cercas y/o postes, restricciones en el uso de la tierra no permitiendo que sea utilizada para determinados usos o el uso restringido de las aguas subterráneas en áreas donde la calidad de las aguas subterráneas ha sido deteriorada.

Otras actividades de cierre para los depósitos incluyen el acondicionamiento o tratamiento y las cubiertas. El acondicionamiento de las pilas de desmonte, el material gastado de lixiviación y los relaves pueden incluir el renivelado para reducir la filtración y mejorar la escorrentía, la adición de cal para el ajuste de pH y el lavado ligero con agua del material de lixiviación para retirar los reactivos residuales. El encubrimiento de los desechos proporcionará protección contra la erosión de los materiales de la superficie por la acción del viento y de las aguas superficiales y subterráneas y reducirá la infiltración causada por la filtración de las precipitaciones en el material depositado.

El transporte de los sedimentos a través de la erosión eólica e hídrica puede ocasionar la acumulación de sedimentos en las aguas superficiales e incrementar los niveles de los constituyentes disueltos en el agua. La infiltración de los depósitos no sólo tienen el potencial para impactar las aguas subterráneas en las inmediaciones de los depósitos sino también pueden impactar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas de gradiente inferior hacia la unidad. Las cubiertas pueden ser compuestas de material sintético, natural o ambos.

Para mayor detalle en lo referente al plan de cierre, el usuario de esta guía puede consultar documentos con información apropiada o las guías sobre planes de cierre del Ministerio de Energía y Minas, Perú.

OTROS TEMAS

Capítulo XI. OTROS TEMAS RELACIONADOS A LOS DESECHOS MINEROS

1. Manejo y Almacenamiento de Reactivos

A fin de prevenir la contaminación de las aguas causada por derrames accidentales de reactivos, debe realizarse un manejo y almacenamiento apropiados. Los reactivos deben ser almacenados en áreas revestidas con una superficie compatible, como el concreto y rodeados con una berma para prevenir la dispersión de los reactivos en caso de un derrame accidental. Los reactivos deben ser almacenados separadamente. Cuando los reactivos incompatibles son almacenados juntos pueden ocasionarse reacciones volátiles.

El área bordeada por bermas debe tener la capacidad para contener un valor de líquido igual al 10 por ciento del volumen total de los reactivos almacenados allí, además de la precipitación directa de una tormenta, durante las 24 horas del día en un periodo de 2 años como mínimo. Deben estar a disposición bombas portátiles para bombear inmediatamente la precipitación directa y los reactivos derramados para su eliminación apropiada. La precipitación directa que no ha entrado en contacto con los reactivos puede ser descargada sin tratamiento.

Para mayor información sobre el manejo y almacenamiento de reactivos, el usuario puede consultar documentos con información apropiada o

las guías de manejo del cianuro y el uso y almacenamiento de reactivos del Ministerio de Energía y Minas, Perú.

REFERENCIAS

1. Ministerio de Energía y Minas, Perú.

Guía para Elaborar Estudios de Impacto Ambiental. Preparado por Shepherd Miller, Inc. Junio, 1994.

2. California Mining Association.

Mine Waste Management (Manejo de Desechos de Mina). 1992.

3. United States Environmental Protection Agency.

Design Manual: Neutralization of Acid Mine Drainage (Manual: Neutralización del Drenaje Acido de Mina). EPA-600/2-83-001. Enero 1983.

4. Ritcey, G.M. Tailings Management (Manejo de Relaves).

Nueva York. Elsevier Scientific publishing Company, 1989.

5. The American Water Works Association, Inc.

Water Quality and Treatment (Calidad y Tratamiento del Agua), 3era. edición. Nueva York: McGraw-Hill Book Company. 1971.