

Guía Ambiental Para el Cierre y Abandono de Minas

INTRODUCCION

1. Propósito y Alcance

Esta Guía para Cierre de Minas ha sido elaborada para el Ministerio de Energía y Minas de Perú a fin de proporcionar un esquema para la planificación y ejecución del cierre en minas nuevas o nuevas instalaciones en minas existentes. Deberá ser también empleada como marco de referencia para el cierre de minas actualmente en operación y aún para realizar un cierre de minas correcto de las operaciones abandonadas sin criterio ambiental alguno.

El alcance de este documento es proporcionar una visión general de objetivos, criterios y tecnologías disponibles para el cierre de minas y su propósito, brindar pautas al personal del gobierno y la industria para planificar el establecimiento de criterios para el cierre de minas específicos para cada yacimiento minero en vista de los problemas ambientales variables y complejos relacionados con la minería en las diversas regiones geográficas del Perú.

El cierre de minas es un tema amplio y variado que comprende el ambiente físico y los aspectos operativos de la mina. Esta guía no puede abordar todos los puntos referidos al cierre de minas y debe ser usada como referencia junto con otros lineamientos que figuran en las guías:

Procedimientos para la Elaboración de Estudios de Impacto Ambiental, Guía para Proyectos de Lixiviación en Pilas, Manejo de Relaves de Mina y Concentradora y Guía Práctica sobre el Drenaje Acido de Mina. Esta guía presenta toda la gama de tecnologías de cierre de minas practicadas en los Estados Unidos de Norteamérica. La aplicabilidad de estas tecnologías al cierre de minas en el Perú depende de las condiciones climáticas, geológicas, hidrológicas, ambientales, económicas y sociales particulares de cada mina. Esta guía no pretende proporcionar requerimientos de cierre uniformes que sean implementados en todos los yacimientos mineros. Los requerimientos de cierre deben ser desarrollados específicamente para cada yacimiento y sus objetivos generales deben incluir la protección de los recursos del aire y del agua, así como determinar un uso beneficioso de la tierra una vez concluidas las operaciones mineras.

En la industria minera peruana se necesita implementar prácticas ambientales de manera sistemática y progresiva en los próximos cinco años. El objetivo de la presente guía es definir el enfoque para determinar los objetivos de cierre de minas específicos para cada yacimiento en el Perú.

Un aspecto decisivo del enfoque propuesto es planificar el cierre de minas e incorporar los costos de cierre dentro de la economía global del proyecto cuando se inicia la planificación del mismo. Se espera que en el Perú se aplique un enfoque sistemático y progresivo con el objeto de establecer criterios para el cierre de minas al inicio de este programa y evitar de esta manera el desarrollo de «objetivos regulatorios móviles».

Sin embargo, establecer criterios de cierre de minas para proyectos con vida superior a los 20 años requiere de predicción, planificación y flexibilidad para adaptarse a condiciones no anticipadas.

2. Prácticas de Cierre Actuales en el Perú

En el Perú existen alrededor de 176 minas de extracción de metales en operación. Se desconoce el número de componentes de minas inactivos tales como bocaminas, tajos abiertos, botaderos de desmonte, depósitos de relaves, pilas de lixiviación o áreas de procesamiento asociadas con minas activas o inactivas. En general las minas activas e inactivas existentes son operaciones relativamente pequeñas que emplean predominantemente métodos de minería subterráneos y procesan el mineral mediante la flotación, cianuración o lixiviación en pilas. La mayoría de las operaciones mineras en Perú consisten de todos o la mayor parte de los siguientes componentes:

Minas Subterráneas o de Tajo Abierto;
Pilas de Desmonte y Sobrecapa;
Plantas de Tratamiento;
Instalaciones para la Disposición de Relaves;
Instalaciones para la lixiviación en pilas;
Pozas, plantas de tratamiento y puntos de descarga de aguas residuales.

Las prácticas de cierre de minas existentes en el Perú, por lo general, incluyen el abandono de la mina o el componente de la mina sin un mínimo gasto de recursos para la estabilización, recuperación o manejo del agua superficial. Además, numerosas operaciones mineras pequeñas han sido abandonadas sin ninguna consideración por las consecuencias ambientales a mediano o largo plazo, o incluso en el corto plazo. No se efectúa una planificación de cierre permanente de minas para evitar el drenaje ácido de roca, la lixiviación de sustancias contaminantes hacia el agua superficial o el agua subterránea, o que partículas esparcidas por el viento impacten sobre la calidad del aire. La estabilidad física de depósitos de relaves, botaderos de desechos, pilas de lixiviación, tajos abiertos y minas subterráneas abandonadas no está bien documentada.

Así como tampoco está documentado el impacto ambiental sobre el agua y el aire asociados con operaciones mineras activas o abandonadas.

No se dispone de información actualizada sobre la calidad del aire o del agua alrededor de minas abandonadas a fin de evaluar la magnitud de los impactos y establecer prioridades para las actividades de cierre de minas. Con el objeto de mejorar los enfoques orientados al cierre de minas en Perú se recomienda que se tomen acciones para elaborar una base de datos de las minas activas e inactivas.

Algunas instalaciones de minas operativas en Perú requieren del tratamiento activo del agua u otras actividades de mantenimiento a fin de minimizar los impactos ambientales a la calidad del agua y/o el aire relacionados con componentes de minas no utilizados (por ejemplo, pilas de mineral agotado o botaderos de desmonte que rezuman). En la mayoría de los casos el mantenimiento activo de componentes abandonados o parcialmente cerrados es económico durante la operación de la mina. Sin embargo, los costos a largo plazo asociados con actividades de mantenimiento perpetuo en las minas peruanas no fueron anticipados y es evidente que no están incluidos en el plan o en el aspecto económico de la mina. A medida que el tamaño de proyectos mineros peruanos crezca, los costos del cierre de minas se incrementarán notablemente.

En el Perú son raras las consideraciones de diseño durante las operaciones para abordar hechos extremos de sismos o precipitaciones. Por lo tanto, se desconoce una planificación para el cierre permanente de minas que contemple estas situaciones. El Perú es una de las áreas sísmicas más activas del mundo, habiéndose producido terremotos de una magnitud de hasta 8.8 a través de la historia registrada. Los derrumbes de tierras producidos por terremotos o la licuefacción de relaves saturados y/o suelos es una preocupación crítica para la estabilidad y seguridad de las estructuras permanentes de las minas durante el período posterior al cierre. Las condiciones climáticas en el Perú también crean preocupaciones críticas sobre la estabilidad química y física de las instalaciones de las minas después del cierre; sobre todo, los yacimientos de minerales polimetálicos con alto contenido de pirita aunados a los climas húmedos predominantes en los Andes representan un alto potencial para la inestabilidad química de los mismos después del cierre. Los altos niveles de precipitación pueden causar la inundación y derrumbe de estructuras, o la erosión y lixiviación de sustancias contaminantes hacia el medio ambiente; igualmente la topografía sumamente escarpada en los yacimientos de los altos Andes y de la Selva alta representan un enorme riesgo de derrumbe de tierras y de licuefacción.

El objetivo de las minas en operación, estén ubicadas en el Perú o los Estados Unidos, es maximizar el valor actual neto de la reserva de minerales. Con frecuencia, se mejora el valor actual neto ignorando costos de cierre o difiriendo los costos de cierre para el final del proyecto. El exitoso cierre de minas incluye el desarrollo de estructuras que permanezcan siempre seguras y estables, así como la protección ambiental de los

recursos del agua y del aire, lo que requiere de planificación y gastos durante la operación y durante la operación y aún después de concluida la actividad minera. Debido a que no se han establecido objetivos bien definidos para el cierre, llevar a cabo actividades de rehabilitación durante las operaciones es algo desconocido en el Perú. Hasta que no existan objetivos de cierre bien definidos no habrá incentivo económico para invertir recursos en actividades de cierre durante la vigencia de las operaciones mineras. Tal como se trata más adelante, debe contemplarse la evaluación de los costos del cierre durante la planificación de la mina a fin de asegurar la viabilidad del proyecto. El incremento de los costos operativos para implementar controles ambientales adecuados y de los costos del cierre para prevenir impactos ambientales a largo plazo podría hacer que algunos proyectos existentes no resultaran rentables.

3. Uso de las Guías

Estas guías se aplican a minas nuevas o instalaciones nuevas en minas. Se pretende que durante el diseño y desarrollo de operaciones mineras nuevas se prepare un plan de cierre que identifique los problemas, el enfoque, los objetivos y los costos del cierre. Estos lineamientos proporcionan un esquema de los objetivos, los enfoques y los aspectos técnicos para el cierre de minas nuevas o instalaciones nuevas de minas. Un cierre de mina exitoso y eficiente en términos de costos depende de una caracterización adecuada del lugar, del diseño correcto y de una operación ambientalmente limpia. En Norteamérica debido al monitoreo ambiental amplio y a la caracterización intensiva de los asientos mineros se ha podido identificar varios problemas físicos y químicos asociados con el cierre de minas. La identificación y caracterización de los problemas físicos y químicos asociados con el cierre de minas son actividades relativamente fáciles; las dificultades están relacionadas con el desarrollo de soluciones factibles y efectivas en términos de costos. Estas guías han sido desarrolladas para identificar puntos críticos y alternativas potenciales para el cierre de minas. Sin embargo, cada yacimiento es único e involucra sistemas naturales complejos. Tomando como referencia la experiencia norteamericana, es generalmente más efectivo en términos de costos anticipar y prevenir la ocurrencia de impactos ambientales que pueden producirse durante y después de las operaciones que remediar problemas ambientales al final del proyecto.

El problema ambiental más significativo que enfrenta la industria minera a nivel mundial es el drenaje ácido de mina; en el Perú esto es de particular importancia debido a los factores climáticos y mineralógicos de las operaciones mineras en los Andes y la Selva alta. El drenaje ácido se produce por la oxidación y lixiviación de materiales sulfurosos. No existen planes de mitigación o de cierre uniformes cuyo éxito esté garantizado para todo yacimiento. La prevención y el control del drenaje ácido es objeto de investigación constante en todo el mundo. La caracterización adecuada de roca de mina y materiales de desecho en el yacimiento es esencial para definir problemas potenciales de cierre al inicio del planeamiento de minado. La información sobre caracterización debe ser utilizada para incorporar dentro del diseño de cierre una adecuada prevención de la generación ácida. Una vez iniciado el drenaje ácido, la única tecnología comprobada para su manejo es el tratamiento activo del agua.

La preparación de un plan de cierre y los costos de cierre estimados durante el diseño de una nueva instalación es una meta inicial de esta guía.

El objetivo fundamental es proporcionar lineamientos para que los operadores de minas proyecten el cierre durante la etapa de planificación, y anticipar y adaptarse a los problemas ambientales encontrados durante la vida útil de la mina. Como parte del diseño general del cierre será necesario estimar y actualizar costos de cierre durante la vida de la mina a intervalos regulares a fin de permitir que la compañía minera reserve fondos suficientes para un efectivo cierre de la mina. También será más sencillo obtener financiamiento si el cierre de mina se efectúa a medida que la mina se va desarrollando. Este es un beneficio agregado del diseño de cierre proactivo, además de los beneficios al medio ambiente y la sociedad.

El diseño de cierre de minas es una actividad específica para cada yacimiento y debe tomar en consideración el clima, la hidrogeología, la sensibilidad del medio ambiente y el uso final que se le dará a la tierra una vez concluidas las actividades mineras. Esta guía señala la filosofía

básica, las tecnologías de cierre y las alternativas de cierre para los componentes mineros. Ha sido preparada para ser usada en el desarrollo de un plan con costos de cierre estimados específico para cada lugar. Un plan de cierre podría incluir muchos de los componentes discutidos en esta guía, aun cuando también es posible que se requieran de puntos no descritos aquí para abordar todos los temas ambientales y de estabilidad en el plan de cierre específico para cada yacimiento.

Estos lineamientos no cubren las instalaciones abandonadas o actualmente en operación, fundamentalmente porque la filosofía del procedimiento de Cierre de Minas implica incluir estas medidas durante la planificación y el diseño que precede a toda operación minera; su aplicación a las otras instalaciones es más dificultosa y costosa aún cuando los principios y tecnologías de cierre sean similares. La presente guía ha sido preparada utilizando información proveniente de una variedad de informaciones publicadas y no publicadas. La información contenida en el texto «Manejo de Desechos Mineros» (Hutchison y Ellison, (1992) y «Rehabilitación de Guías Mineras para Proponentes» (Ministerio de Minas y Desarrollo del Norte» de Ontario, (1992) se utilizó como referencia principal para la elaboración del presente documento.

CIERRE DE MINAS

Capítulo I. CIERRE DE MINAS

1. Introducción

El cierre de minas incluye todas las tecnologías que se requieren para alcanzar la seguridad física y la protección ambiental a largo plazo en los alrededores de la instalación minera. La gama de actividades para el cierre de instalaciones de desperdicios de minas podría incluir desde una nivelación mínima para mejorar la derivación y escorrentía de las aguas superficiales hasta una nivelación completa, colocación de una cobertura y la revegetación. Las actividades de cierre de minas dependerán de las condiciones climáticas y ambientales específicas del lugar, sin embargo, pueden incluir:

Derivaciones permanentes del agua superficial alrededor de las áreas de instalaciones con el objeto de mantener bajo control el flujo de agua en casos extremos de tormentas.

Nivelación y revegetación (de ser apropiado) de áreas afectadas.

Construcción de componentes de minas con configuraciones estables o cambiar su configuración al momento del cierre.

Reducción de las filtraciones o descargas contaminantes de minas subterráneas y/o de tajo abierto.

Reducción de las filtraciones contaminantes de las instalaciones de desechos mineros.

2. Objetivos

Los objetivos del cierre de minas son:

La protección de la salud humana y el medio ambiente mediante el mantenimiento de la estabilidad física y química.

Un uso beneficioso de la tierra una vez que concluyan las operaciones mineras (por ejemplo, hábitat para la fauna silvestre, campos de pastoreo, recreación, o futura exploración y explotación minera).

Mantener la estabilidad física y química es fundamental para proteger la salud humana y el medio ambiente. La estabilidad física implica la estabilidad de taludes, con lo que se protege de derrumbes catastróficos tanto a las áreas locales como aquellas ubicadas aguas abajo. Sin embargo, también se refiere a la estabilidad contra la erosión eólica y del agua, y por lo tanto,

el transporte desde la instalación de polvo o sedimentos que pudieran tener un impacto dañino sobre la salud humana y el medio ambiente. Resulta necesario mantener la estabilidad de taludes de los tajos, botaderos de desechos, o depósitos de relaves a menos que el acceso a las áreas se encuentre permanentemente limitado.

Como parte del cierre, si no pueden estabilizarse las áreas, podría ser necesario poner en práctica restricciones permanentes al uso de la tierra, restricciones a su traspaso y control del acceso. En áreas sísmicas, por ejemplo, puede restringirse la construcción de viviendas en áreas situadas aguas abajo de las grandes presas de relaves. Igualmente, las instalaciones de componentes que han sido bloqueadas, encapsuladas, o cubiertas en una mina cerrada deberían ser protegidas de la minería informal e ilegal que puede amenazar su seguridad.

La estabilidad química se refiere a la contención de sustancias químicas contaminantes y a evitar que las mismas sean introducidas al medio ambiente. La estabilidad química puede establecerse mediante el control de la fuente emisora, el control de migración, o el tratamiento.

El control de la fuente ha demostrado ser el medio óptimo para alcanzar la estabilidad química. Este control se logra evitando la descarga de sustancias contaminantes, para lo que se elimina la fuente o uno o más componentes que pueden conducir a la formación de contaminantes. No obstante ello, el control de fuentes no es siempre posible.

El control de la migración también puede usarse para mantener la estabilidad química una vez formadas las sustancias contaminantes. El control de la migración implica controlar la migración de soluciones de lixiviación hacia el medio ambiente. Esto puede lograrse mediante la encapsulación superficial y subterránea construyendo cubiertas de baja permeabilidad, revestimientos y muros de contención de rezumaderos, todos especialmente diseñados. La intercepción y el tratamiento de sustancias lixiviadas contaminantes, una vez generadas y descargadas, es otra alternativa común.

El uso del tratamiento no se recomienda para el cierre de minas porque implica mantenimiento perpetuo así como la generación y disposición de lodo. El tratamiento puede ser activo como los tratamientos químicos, o pasivo como los pantanos especialmente construidos.

El uso futuro de la tierra de un área sometida a la explotación minera es decisivo para definir el diseño del cierre de una mina. La meta obvia del uso de la tierra en el período posterior a los trabajos de minado es apoyar un uso beneficioso del terreno. Los usos beneficiosos del terreno en el período posterior a los trabajos de minado pueden incluir hábitat de la fauna silvestre, campos para pastoreo, recreación en lagos especialmente diseñados, construcción de instalaciones recreativas como campos de golf sobre depósitos de relaves, construcción de parques industriales sobre botaderos de desmonte u otros desperdicios. Dependiendo de la propiedad de la tierra, el uso beneficioso del terreno una vez concluida la extracción minera puede ser definido por la compañía minera con o sin la participación de los organismos reguladores. Esta área está actualmente recibiendo una atención considerable y se espera que en el futuro se genere un gran debate sobre el uso de la tierra después de los trabajos de minería. Se recomienda que los habitantes de las aldeas, pueblos y ciudades de los alrededores tomen parte en establecer cuál debiera ser ese uso. Para ello se recomienda también que el gobierno actúe como un agente regulador entre los habitantes locales y las compañías mineras y que la mayor parte posible de los temas referidos al uso de la tierra en el período posterior a los trabajos de minado se establezca antes o durante la planificación del proyecto. El gobierno también debería proporcionar un registro actualizado de potenciales usos beneficiosos de la tierra en cada región.

3. Filosofía

«Planificar para el Cierre» es un término que se ha empleado con mucha frecuencia durante la última década para indicar la necesidad de que las nuevas instalaciones mineras incorporen el diseño de cierre de minas a fin de que puedan ser desmanteladas cumpliendo con los requerimientos de cierre (Gadsby, 1988). Si al diseñar una instalación se tiene claramente establecido que debe ser cerrada para satisfacer objetivos específicos, con mucha frecuencia

se obtienen instalaciones más económicas y sensibles al medio ambiente. La experiencia en los Estados Unidos ha mostrado que los costos de cierre para instalaciones existentes que no fueron diseñadas u operadas teniendo en mente su cierre pueden ser extremadamente altos y tener un impacto adverso definitivo sobre la economía global del proyecto.

Durante el desarrollo del análisis económico del cierre de una mina deben incluirse los costos como un ítem del modelo económico global. La experiencia ha demostrado que la inclusión de los costos de cierre después de las operaciones a menudo puede resultar en una consecuencia negativa para un proyecto total si la economía del proyecto es reevaluada en esta etapa. (Antony y Gochour, 1994). En capítulos posteriores se trata sobre los gastos de cierre típicos para proyectos mineros.

El desarrollo de la mina para alcanzar un crecimiento sostenible es parte de la filosofía que implica que el cierre de minas sea considerado cuidadosamente durante el diseño inicial de la mina. Planificar para minimizar el impacto ambiental ayudará a lograr un desarrollo futuro sostenible. Estos impactos pueden estar limitados a la perturbación de la superficie pero en otros casos podría incluir la degradación de los recursos del agua y del aire e incrementar el potencial para el establecimiento de restricciones al uso de la tierra una vez concluidas las operaciones mineras. La atención cuidadosa durante el diseño del minado, de los aspectos relacionados con él y la identificación de requerimientos para el uso de la tierra después del minado pueden ser usados para definir impactos ambientales específicos.

La perturbación general de la superficie durante las operaciones se puede reducir efectuando un cierre o una rehabilitación concurrente de ser esto factible. Por ejemplo, es provechoso que a medida que las celdas de desmonte o de depósitos de relaves se vayan llenando, se inicien las actividades de cierre simultáneamente con el resto de las operaciones. Cerrando o recuperando esas áreas no usadas, se reduce el área total de la superficie perturbada. Estas actividades de cierre concurrentes pueden usarse para demostrar y evaluar el éxito de operaciones alternativas de cierre.

4. Criterios

Los criterios para el cierre de minas deberían ser específicos para cada lugar e incluyen:

- Carácter físico y químico de la mina y el material de desecho;
- Condiciones climáticas e hidrogeológicas del yacimiento;
- Condiciones del agua superficial y subterránea locales incluyendo calidad, cantidad, usos futuros y proximidad al yacimiento;
- Potencial para hechos extremos como terremotos, derrumbe de tierras e inundaciones;
- Balance de agua del yacimiento incluyendo precipitación, balance del agua superficial y subterránea a través de la mina y material de desecho;
- Diseño de ingeniería de las instalaciones de la mina;
- Historia operativa de la mina incluyendo los resultados de los controles ambientales;
- Uso requerido de la tierra después de las actividades mineras.

Si bien el potencial para hechos extremos, incluyendo terremotos e inundaciones, debe cumplir un papel importante en el diseño del cierre, no es posible establecer un período de retorno uniforme para el plan de cierre bajo todas las condiciones. El diseño para hechos extremos debe tomar en cuenta las consecuencias potenciales de derrumbe así como la probabilidad de ocurrencia. Por ejemplo, en los Estados Unidos, el diseño de desviaciones permanentes del agua superficial alrededor de áreas con desmonte de bajo riesgo rehabilitadas podrían variar de una tormenta con un período de retorno de 100 a 500 años. En los casos de instalaciones con un alto riesgo potencial asociado con derrumbes como el de un depósito de relaves, el período de retorno para la tormenta podría ser de 10,000 años o más. Otros asuntos que deberán ser abordados específicamente de acuerdo a cada yacimiento son la hidrogeología y los impactos potenciales sobre la calidad del agua subterránea así como la sensibilidad relativa del medio ambiente próximo a la mina.

Para desarrollar el plan de cierre de una mina son comunes tres enfoques generales que a continuación aparecen por orden de preferencia:

- Abandono simple. un cierre en el cual la compañía minera simplemente se retira del lugar. Este enfoque no requerirá de un monitoreo o mantenimiento adicional luego de que las actividades de cierre hayan culminado.
- Cuidado pasivo. Se efectuará cuando exista una mínima necesidad de que las estructuras críticas sean objeto de un monitoreo ocasional y mantenimiento menor poco frecuente después de finalizadas las actividades de cierre.
- Cuidado activo. Requerirá de operaciones, mantenimiento y monitoreo continuos del yacimiento después de las actividades de cierre. Este cuidado activo podría incluir el tratamiento químico de soluciones de lixiviación o el mantenimiento continuo de estructuras de derivación.

En los Estados Unidos, el abandono simple sólo es generalmente posible en climas áridos y no en climas húmedos debido a los impactos sobre la calidad del agua. Si se aplicara un diseño apropiado para el cierre de minas, la mayor parte de las operaciones mineras cupríferas pequeñas y grandes del sur del Perú podrían llegar a este estatus de cierre. La estabilidad química de las pilas de desmonte, pilas de lixiviación, depósitos de relaves y paredes de roca de las minas es difícil de lograr y su mantenimiento es costoso en climas húmedos. En los casos de las minas peruanas ubicadas en los Andes altos y la Selva alta podría ser muy difícil adoptar un Abandono Simple si no se considera realizar operaciones de mantenimiento después del mismo, a menos que se preste una cuidadosa atención a la planificación del cierre. La caracterización y predicción de impactos sobre la calidad del agua asociados con materiales de desecho y descargas de las minas son objeto de continuas investigaciones. Igualmente es continua la investigación sobre la mitigación de impactos ambientales ocasionados por el drenaje ácido de minas. En la actualidad no existen remedios para mitigar el drenaje de las minas que sean aplicables o apropiados para todos los casos. Por lo general, los métodos empleados incluyen el encapsulamiento o el tratamiento perpetuo del agua por medios pasivos o activos.

ASUNTO DE CIERRE

CAPITULO II ASUNTOS REFERIDOS AL CIERRE

1 Introducción

El cierre de minas requiere contener con éxito los desechos mineros y mantener su estabilidad física. El material de desecho como relaves, desmonte, aguas residuales de procesos y mineral lixiviado agotado generalmente tienen baja toxicidad pero se desarrollan en grandes volúmenes. Las condiciones específicas de cada lugar controlan el potencial de estos materiales de desecho para impactar sobre los recursos biológicos, del aire y del agua. Las prácticas actuales e históricas de disposición de desechos en las minas del Perú han dado como resultado problemas de contención así como impactos sobre la calidad del agua. Además del manejo de desechos de minas, dependiendo de las condiciones específicas de cada yacimiento, minas a tajo abierto o subterráneas, éstos podrían tener un impacto sobre los recursos de agua y ocasionar riesgos físicos permanentes. Esta sección describe los puntos referidos al cierre de minas, entre los que se incluyen:

- Características físicas y químicas de los materiales de desecho de las minas.
- Características físicas y químicas de las minas de tajo abierto y subterráneas.
- Condiciones climáticas.
- Usos beneficiosos de la tierra y recursos.

Los asuntos referidos al cierre de minas tienen una estrecha vinculación con las metas de protección de los recursos naturales. El desarrollo del plan de cierre de una mina requiere de un análisis de impacto ambiental para identificar y caracterizar los recursos que van a ser protegidos. Una vez que los recursos que incluyen el agua, el aire, la fauna silvestre y los usos futuros de la tierra han sido determinados, deben desarrollarse niveles de protección para establecer un uso beneficioso. Las minas peruanas están en áreas que van desde el terreno

costero seco, áreas de alta humedad y los fríos Andes, hasta las áreas de Selva alta, muy húmedas, calurosas y biológicamente ricas. Debido a que existe una variabilidad considerable en el potencial de las minas o los desechos mineros específicos para ocasionar impactos sobre el medio ambiente, cada mina debe determinar las características físicas y químicas de los materiales. Las referencias citan procedimientos para la caracterización física y química incluyen a Hutchison y Ellison, 1992; Steffen, Robertson y Kirsten, y otros, 1989. Tomando como base esta caracterización es posible determinar el potencial para impactos físicos y químicos sobre el medio ambiente. Finalmente, deben señalarse las condiciones específicas de cada yacimiento incluyendo el clima, la geología, la sismicidad y los recursos de agua a fin de determinar riesgos al medio ambiente y las vías potenciales por las que llegarán los impactos.

2. Características Físicas

Las características físicas de los desechos mineros, de las estructuras de las minas y las minas de tajo abierto o subterráneas son importantes para determinar la resistencia a la erosión del viento y del agua; las cantidades de rezumaderos o drenajes y el ángulo de inclinación de taludes estables permanentes. Las características físicas incluyen:

- Resistencia a la erosión eólica y del agua:

Tamaño del grano.

Cohesión.

Declive.

Capacidad de crecimiento de vegetación.

- Cantidad de Rezumaderos o Drenajes:

Contenido de Humedad.

Conductividad Hidráulica.

Capacidad de crecimiento de vegetación.

- Taludes Estables:

Resistencia al cizallamiento.

Durabilidad.

Conductividad Hidráulica.

Capacidad de crecimiento de vegetación.

Estas características físicas generalmente se determinan durante la etapa de planificación de una operación minera. Esta información se usa para la evaluación de materiales de construcción y el diseño de instalaciones. Durante esta fase de planificación también es decisivo predecir el comportamiento a largo plazo de estos materiales a fin de «planificar para el cierre».

Las medidas de cierre referidas a la estabilidad física deben tomar en cuenta el deterioro de los componentes que permanecen en una mina después del cese de las operaciones. Estos pueden estar formados por tierra y roca o materiales fabricados por el hombre como concreto o acero. Debería evaluarse el deterioro potencial de estructuras por acción de las fuerzas perpetuas (estabilidad estática) y acontecimientos dinámicos.

Muchas de las consideraciones físicas del cierre son las mismas que durante las operaciones mineras. Sin embargo, las diferencias están relacionadas con el mayor tiempo que las

estructuras deben permanecer estables, fijas e inmóviles. Es probable que la diferencia en la escala de tiempos sea un orden de magnitud -digamos 200 años para el cierre comparados con 20 años para las operaciones.

Por lo tanto, los cambios graduales en las condiciones del suelo y la roca, aunados a condiciones cambiantes del agua subterránea, podrían dictar la necesidad de una selección más conservadora de parámetros de diseño con el objeto de cumplir con los criterios de cierre.

a) Fuerzas Disruptivas Perpetuas

Las fuerzas disruptivas perpetuas incluyen: erosión eólica, erosión del agua debido a inundaciones, escorrentías, torrenteras y acanalamientos, sedimentación y acumulación de huaycos, glaciación, acumulación anual de hielo y penetración estacional de heladas, reestructuración del suelo, y el intemperismo físico y químico.

Las actividades biológicas incluyen: penetración de las raíces, intrusión de madrigueras; y acciones de animales y el hombre.

Los efectos de las fuerzas disruptivas perpetuas sobre la estabilidad de taludes a largo plazo de los componentes de la mina se resumen en el Cuadro 2.1.

b) Medidas para Mejorar la Estabilidad Estática

Las mejoras en la estabilidad de taludes en terraplenes o cortes y en tajos abiertos, pilas de rocas, presa de relaves, taludes exteriores en el lugar donde está la concentradora y cortes efectuados para construir caminos, pueden resumirse de la siguiente manera:

- Aplanamiento de taludes, sacando peso de la parte superior y añadiéndolo a la base.
- Sacando peso de la parte superior de una pendiente.
- Bermas en la Base, añadiendo un contrapeso estabilizador de libre drenaje en la base del talud. Obsérvese que para minimizar la acumulación de presiones en los poros no debe impedirse el drenaje en la base.
- Escalonamiento de Taludes, construyendo terrazas intermedias para lograr un aplanamiento global del talud.
- Drenaje, ya sea bombeando desde pozos de alivio en la base del talud o mediante instalación de drenes horizontales.
- Medios biotécnicos, usando vegetación para aglutinar el suelo con una red de raíces. Esto evitará la erosión de la superficie y daños leves, pero no la inestabilidad arraigada del talud.

c) Concreto y Acero

Se puede especificar las características durante el diseño y las guías para los valores a ser usados pueden encontrarse en manuales estándar de concreto y de acero. La vida normal prevista de una estructura es de 50 años.

El concreto y el acero usados en dispositivos de salida, estructuras de vertederos, conductos de desviación y alcantarillas podrían tener que usarse durante un largo tiempo. En este caso debería tomarse en consideración la influencia de sustancias nocivas sobre estos materiales así como los efectos a largo plazo del intemperismo, como los ciclos de congelamiento y descongelamiento, y mojado y secado. Podría requerirse del mantenimiento y/o reemplazo periódico. Deben preferirse los conductos de derivación y las alcantarillas excavadas en roca dura y permanente a las estructuras de concreto y acero tanto como sea posible.

d) Situaciones Extremas

La probabilidad de ocurrencia de acontecimientos extremos tras el cierre de una mina es proporcionalmente elevada cuando se considera el largo período que sigue al cierre de la mina. La predicción de la probabilidad de ocurrencia para un período mayor que el período que abarca el registro de acontecimientos históricos es de una precisión cuestionable. Los criterios

de diseño y los intervalos de retorno usados en estructuras críticas deben ser presentados en el plan de cierre.

Situaciones derivadas del Diseño

En lugares donde el derrumbe de una estructura pudiera cobrar vidas humanas o causar un daño ambiental catastrófico, la estructura deberá ser diseñada para que resista el «Evento Máximo Probable», o contemplar acontecimientos con un intervalo de retorno de 10,000 años.

En lugares donde una falla representa algún riesgo para la salud y seguridad pública y pudiera ocasionar un impacto económico o ambiental significativo, la estructura deberá ser diseñada para los acontecimientos pronosticados con un período de retorno de 1,000 años o más. Por lo tanto, la elección de una ubicación apropiada para los depósitos de relaves, donde no exista un impacto económico o ambiental significativo ni peligro para la vida, permitirá que se le pueda diseñar contemplando un evento con un período de retorno de 200 años o menos. Su construcción demandará entonces una menor inversión con los costos de mantenimiento también menores.

Cuando la falla no ponga en peligro vidas humanas y no ponga ningún impacto económico o ambiental o cause impactos insignificantes, la estructura podría ser diseñada para contemplar el acontecimiento pronosticado con un período de retorno de 200 años.

c) Concreto y Acero

Se puede especificar las características durante el diseño y las guías para los valores a ser usados pueden encontrarse en manuales estándar de concreto y de acero. La vida normal prevista de una estructura es de 50 años.

El concreto y el acero usados en dispositivos de salida, estructuras de vertederos, conductos de desviación y alcantarillas podrían tener que usarse durante un largo tiempo. En este caso debería tomarse en consideración la influencia de sustancias nocivas sobre estos materiales así como los efectos a largo plazo del intemperismo, como los ciclos de congelamiento y descongelamiento, y mojado y secado. Podría requerirse del mantenimiento y/o reemplazo periódico. Deben preferirse los conductos de derivación y las alcantarillas excavadas en roca dura y permanente a las estructuras de concreto y acero tanto como sea posible.

d) Situaciones Extremas

La probabilidad de ocurrencia de acontecimientos extremos tras el cierre de una mina es proporcionalmente elevada cuando se considera el largo período que sigue al cierre de la mina. La predicción de la probabilidad de ocurrencia para un período mayor que el período que abarca el registro de acontecimientos históricos es de una precisión cuestionable. Los criterios de diseño y los intervalos de retorno usados en estructuras críticas deben ser presentados en el plan de cierre.

Situaciones derivadas del Diseño

En lugares donde el derrumbe de una estructura pudiera cobrar vidas humanas o causar un daño ambiental catastrófico, la estructura deberá ser diseñada para que resista el «Evento Máximo Probable», o contemplar acontecimientos con un intervalo de retorno de 10,000 años.

En lugares donde una falla representa algún riesgo para la salud y seguridad pública y pudiera ocasionar un impacto económico o ambiental significativo, la estructura deberá ser diseñada para los acontecimientos pronosticados con un período de retorno de 1,000 años o más. Por lo tanto, la elección de una ubicación apropiada para los depósitos de relaves, donde no exista un impacto económico o ambiental significativo ni peligro para la vida, permitirá que se le pueda diseñar contemplando un evento con un período de retorno de 200 años o menos. Su construcción demandará entonces una menor inversión con los costos de mantenimiento también menores.

Cuando la falla no ponga en peligro vidas humanas y no ponga ningún impacto económico o ambiental o cause impactos insignificantes, la estructura podría ser diseñada para contemplar el acontecimiento pronosticado con un período de retorno de 200 años.

La base de datos para respaldar el desarrollo de períodos de retorno para eventos climáticos o sísmicos extremos es bastante limitada en el Perú.

Es imperativo que las compañías mineras inicien la recolección de información climática específica para cada yacimiento tan pronto como les sea posible. Probablemente, se necesitarán varias décadas para desarrollar bases de datos confiables que apoyen la determinación final de criterios para el diseño de situaciones extremas. Entretanto, se requerirá de las mejores estimaciones usando datos disponibles junto con el mejor juicio de ingeniería para los siguientes ejemplos:

- Estabilidad sísmica de los depósitos de relaves después del cierre de la mina;
- Capacidad para desviar aguas superficiales en caso de tormentas después del cierre.
- Capacidad de diseño de tratamiento del agua en el período posterior al cierre;

3. Características Químicas

Las características químicas asociadas con desechos de minas, reactivos para el tratamiento del mineral, técnicas de procesamiento y drenaje de minas juegan un papel significativo para determinar la estrategia de cierre. Las operaciones mineras generalmente confrontan alguno de los procesos químicos que se indican a continuación:

- **Minerales solubles:** la sobrecapa, el desmonte, los relaves y el mineral agotado con frecuencia contienen minerales solubles naturales que incluyen borato, cloruro, sulfato, bicarbonato y minerales de nitrato. Estos minerales son fácilmente solubles y pueden incrementar el contenido total de sólidos disueltos (TSD) en las aguas de rezumaderos y escorrentías. Incrementos significativos en el TSD pueden hacer que el agua no sea apta para beber ni para usos agrícolas o industriales.
- **Drenaje Acido:** El desmonte, los relaves, el mineral agotado, las superficies expuestas en paredes de minas o la roca deshidratada in situ con minerales sulfurosos reactivos pueden dar como resultado drenaje ácido al ser expuestos al agua. El drenaje ácido se produce cuando los minerales sulfurosos se oxidizan y hay abundante agua disponible para transportar los productos de la reacción. Los impactos químicos incluyen bajo pH, un TSD incrementado y concentraciones más elevadas de sulfato y metales.
- **Reactivos Químicos:** Los reactivos usados en la recuperación de productos minerales podrían permanecer en concentraciones residuales en los relaves descargados. Estos reactivos químicos, si están presentes en relaves o en el mineral lixiviado agotado, tienen el potencial de impactar sobre los recursos del agua superficial y subterránea si se deja que rezuman de las instalaciones que los contienen.

En general, las medidas para el control de las reacciones químicas y el tratamiento del drenaje deben ser específicas para cada yacimiento y tipo de sustancia contaminante. En el Cuadro 2.2 se ofrece un resumen de las potenciales tecnologías de control de la estabilidad química.

a) Drenaje Acido

El drenaje ácido es un drenaje de bajo pH que se origina de la oxidación y la lixiviación de metales de rocas sulfurosas cuando son expuestas al oxígeno y al agua. La neutralización del ácido y las complejas reacciones de precipitación que se producen a lo largo del curso del flujo del agua en el drenaje pueden alterar aún más la calidad del agua del drenaje aguas arriba del medio ambiente receptor. El Capítulo III, «Manejo de Residuos de Minas» (Hutchison y Ellison, 1992) es una buena referencia sobre procesos, predicción, control, solución y monitoreo de drenaje ácido de roca.

El drenaje ácido puede generarse de las superficies expuestas de rocas en una operación minera: labores mineras a tajo abierto y subterráneas, depósitos de relaves, pilas de desmonte y cualquier instalación construida con materiales que generen ácidos (terraplenes, carreteras).

Los productos de la oxidación son llevados desde estas áreas hasta el medio ambiente receptor por la precipitación natural, el agua superficial y el agua subterránea.

El agua de drenaje contaminada por la oxidación y los procesos de lixiviación es una preocupación principalmente para la calidad del agua receptora y por la toxicidad que representa para la biota acuática. Las cargas de metales pueden ser de preocupación para la calidad del agua potable.

El drenaje ácido de roca procedente de las minas podría no iniciarse o podría no ser detectado durante muchos años después de iniciadas las labores mineras y sin embargo podría continuar durante décadas o siglos. La velocidad y la magnitud de la generación de ácidos dependen de la naturaleza geoquímica y física de la roca y de las condiciones climáticas y físicas del lugar.

La identificación temprana del potencial para la generación de ácidos y la implementación de medidas de mitigación y control son importantes, tanto para la prevención de impactos adversos sobre el medio ambiente como por consideraciones económicas. Es preferible identificar el material que puede generar ácidos y desarrollar medidas de control para prevenir la generación de sustancias contaminantes. Por ejemplo, la remoción de pirita de los relaves, cuando resulta conveniente para mitigar el drenaje ácido, es mucho más sencilla y barata durante las labores mineras activas que el tratamiento durante el cierre de relaves acumulados.

b) Migración de Efluentes

El drenaje proveniente de las labores mineras puede contener niveles de sustancias químicas o metales nocivos producidas como resultado de la oxidación y los procesos de lixiviación. El impacto ambiental más importante de estas sustancias podría no detectarse hasta que el agua degradada migre desde el yacimiento y penetre al medio ambiente receptor. La migración de efluentes puede producirse a través del agua superficial y el agua subterránea. Existen tres factores generales que pueden influenciar la calidad del agua y la velocidad de migración de efluentes: físicos, químicos y biológicos.

Las características físicas, como el tamaño del grano o la temperatura de la fuente del efluente, afectan la velocidad de generación del efluente y en menor grado que las características químicas, la velocidad de lixiviación. A fin de evaluar las rutas de migración potenciales es necesario conocer las características físicas, especialmente la conductividad hidráulica de los materiales de los que se originó el efluente y de los materiales a lo largo de la ruta de la migración.

Las características químicas de la fuente que originó el efluente y de los materiales a lo largo del recorrido de la migración pueden tener un efecto significativo sobre la calidad del agua efluente. Por ejemplo, a medida que el drenaje ácido continúa su migración a través de materiales mineralizados, puede generarse ácido adicional, lo que origina una mayor reducción del pH y una mayor lixiviación de los metales. A la inversa, el drenaje puede atravesar materiales alcalinos y podría ocurrir una neutralización parcial.

La actividad biológica a lo largo de la ruta de migración podría afectar la calidad del agua efluente. Bacterias oxidantes podrían acelerar el drenaje ácido, mientras que un área pantanosa podría eliminar metales del efluente.

En resumen, pueden ocurrir un número de procesos atenuantes a lo largo de las rutas de migración a medida que el agua discurre hasta el ambiente receptor. Estos pueden incluir:

1. dilución
2. difusión
3. dsorción
4. atenuación
5. volatilización
6. interacción química
7. interacción biológica

En consecuencia, el medio ambiente dispone de cierta capacidad para mitigar de manera natural los efectos potenciales de la lixiviación y la oxidación. El impacto ambiental potencial resultante es una función del tiempo y depende de la calidad del agua efluente, la dilución natural y las capacidades neutralizadoras del medio ambiente. Las medidas de control deberán hacer lo posible por reducir las descargas de efluentes para cumplir con los objetivos de cierre.

La información que se requiere para evaluar el comportamiento de los parámetros químicos en el entorno posterior al cierre incluyen:

- Características físicas y químicas de soluciones (es decir relaves, desmonte o rezumadero de mina.
- Concentraciones de sustancias químicas que pudieran lixiviar el material fuente.
- Características geoquímicas y físicas de la zona no saturada debajo del yacimiento.
- pH y potencial oxidación/reducción que existe durante el contacto del rezumadero con los materiales subyacentes.

Los planes de cierre de minas pueden confiar en la capacidad de atenuación natural de la zona no saturada o de los terrenos de cimentación si estos son apropiados para la contención primaria o secundaria. Para predecir de manera precisa el potencial de atenuación durante el período posterior al cierre, es decisivo definir las características físicas y químicas de la zona no saturada. La información que se requiere incluye determinar si los materiales son lateralmente compatibles a lo largo de las áreas que reciben el rezumadero para mejorar el proceso de atenuación. Dependiendo de las condiciones específicas de cada yacimiento podría necesitarse la siguiente información para evaluar si el yacimiento es apropiado para implementar la atenuación:

- Continuidad lateral y estratigráfica:
- Tamaño del grano y propiedades del índice de plasticidad de las unidades de suelo clave.
- Permeabilidad y porosidad de las unidades de suelo clave.
- Mineralogía, pH y potencial oxidación/reducción.
- Capacidades de intercambio catiónico y aniónico.
- Profundidad del agua subterránea.
- Contenido de humedad del suelo, incluyendo variaciones con la profundidad.
- Pruebas de percolación de la zona no saturada.

Una vez que el ambiente físico de las instalaciones de la mina cerrada y de la zona no saturada han sido caracterizados, se debe determinar las sustancias contaminantes potenciales y las condiciones de la fuente. La información requerida podría incluir:

- Características químicas del agua de porosidad y la solución de lixiviación proveniente de desperdicios o descargas de minas;
- Cantidad y calidad estimadas de solución de lixiviación durante las condiciones posteriores al cierre; y,
- Pruebas de atenuación piloto o de referencia de materiales lixiviados y de zonas vadasas.

c) Tecnología de Control

El propósito de la tecnología de control de la estabilidad química es alcanzar objetivos ambientales usando las técnicas más efectivas en términos de costos. En la actualidad existen tres etapas generalmente aceptadas en el control, tal como lo describen Barton-Bridges y Robertson (1989) y en el Proyecto de Guía Técnica de Drenaje Acido de Roca (Steffen, Robertson y Kristen, et al., 1989):

- Control de la generación de sustancias contaminantes;
- Control de la migración de sustancias contaminantes; y,
- Recolección y tratamiento del drenaje contaminado.

Las tres categorías de control mencionadas aparecen por orden de preferencia. Si mediante la tecnología de control se evitan las reacciones que dan origen a las sustancias contaminantes, no hay riesgo de que estas sustancias ingresen al medio ambiente. Si las reacciones no pueden prevenirse, debe implementarse el control de la migración de las sustancias contaminantes. Si ninguna de estas medidas de control está en vigencia, es necesario recolectar y tratar el drenaje. Es obvio que si nunca se generan sustancias contaminantes existe un menor riesgo de impacto sobre el medio ambiente. El mayor riesgo se produce cuando se necesita operar y mantener sistemas de recolección y tratamiento en forma continua y a largo plazo. A menudo, es necesario combinar medidas de control de una o más de estas categorías para proporcionar un control adecuado.

La tecnología de control de la estabilidad química incluye técnicas tanto de prevención como de abatimiento. La prevención se aplica al predesarrollo de un proyecto mientras que el abatimiento se refiere a medidas adoptadas para atacar problemas operativos y postoperativos.

Control de la Generación de Acidos

El objetivo del control de la generación de ácidos es limitar la formación de ácidos en la fuente inhibiendo la oxidación del sulfuro. Las medidas de control disponibles se resumen a continuación:

Objetivo del Control

Medidas de Control

Remoción o aislamiento del sulfuro

Exclusión del agua

Exclusión del oxígeno

Control de la acción bacteriana

Acondicionamiento de desechos

Cobertura y suelos

Deposición subacuática

Coberturas y sellos

Segregación y mezcla de desechos

Aditivos alcalinos

Bactericidas

Control de la Migración del Drenaje Acido

Cuando no se previene la generación de ácidos, el siguiente nivel de control es evitar o reducir la migración de drenaje ácido al medio ambiente.

Debido a que el agua es el medio de transporte, la tecnología de control se basa en evitar el contacto del agua con la fuente de drenaje ácido usando las siguientes técnicas:

- Desviar toda el agua superficial que corre a través de la fuente generadora de ácido. Nota: esta técnica es recomendable durante las operaciones, en el corto plazo; después del cierre se requerirá de inspección y mantenimiento).
- Evitar o interceptar el flujo de agua subterránea hacia la fuente generadora de ácido. (Nota: las zanjas, pozos y bombas son apropiados para el corto plazo; las muros de contención impermeables y los desagües por gravedad podrían ser apropiados en el largo plazo pero requerirán de un monitoreo y mantenimiento continuos.
- Evitar la infiltración de precipitación usando cubiertas y tapas sobre la fuente generadora de ácidos. (Nota: debe considerarse las fuerzas disruptivas a largo plazo y el desarrollo de un programa de mantenimiento).

- Colocación controlada de materiales generadores de ácido a fin de minimizar la infiltración.

Recolección y Tratamiento del Drenaje Acido

La recolección y tratamiento del drenaje ácido es a la fecha la medida de control de drenaje ácido más usada. Ello se debe a que el drenaje ácido no fue inicialmente anticipado o adecuadamente controlado. La mayor parte de las minas activas y abandonadas de los altos Andes y la Selva alta del Perú podrían caer, esa fortunadamente, dentro de esta clasificación.

Podría requerirse que los sistemas de recolección recuperen tanto las aguas superficiales como las aguas subterráneas contaminadas por el drenaje ácido. La recolección de flujos de agua superficial por lo general se consigue fácilmente por medio de zanjas superficiales. Para los flujos subterráneos se requiere de la instalación de zanjas, pozos o muros de contención con el objeto de forzar el flujo del agua subterránea hacia la superficie donde pueda ser recolectada. La mayoría de sistemas de recolección requiere de un mantenimiento a largo plazo.

Se puede clasificar las medidas de tratamiento ya sea como sistemas activos que requieren de un operación continua (una planta de tratamiento químico) o como sistemas pasivos diseñados para funcionar con sólo la intervención ocasional de operadores (un pantano o una cuneta alcalina).

El objetivo del tratamiento del drenaje ácido es eliminar la acidez, precipitar metales pesados y eliminar sustancias nocivas.

Tratamiento Químico

El tratamiento químico emplea tecnología comprobada, bien fundamentada, que está funcionando de manera efectiva en varias minas. El tratamiento químico puede incluir sólidos, líquidos o agua contaminados. Los desechos sólidos pueden ser acondicionados mediante (Hutchison y Ellison, 1992):

- Lavado en contracorriente.
- Lixiviación.
- Fijación.
- Solidificación.

Las opciones potenciales para el tratamiento químico de los desechos líquidos o aguas contaminadas incluyen:

- Neutralización y precipitación.
- Oxidación o reducción.
- Intercambio iónico.
- Osmosis inversa.

Terrenos Pantanosos

Los terrenos pantanosos como ciénagas, fangales y pantanos muestran perspectivas alentadoras de poder brindar el tratamiento final o de pulido del drenaje ácido de roca y otras aguas residuales. En Girtz y Kleinman (1986) se trata el uso de terrenos pantanosos para el tratamiento del drenaje ácido de mina. Su efectividad tiene aún que ser demostrada en la práctica, particularmente a largo plazo.

Cunetas Alcalinas

Los materiales alcalinos colocados en cunetas construidas aguas abajo de fuentes generadoras de ácido son rápidamente recubiertos, tapados y obstruidos por precipitados insolubles como el yeso, y se ha descubierto que estos materiales pierden su efectividad a mediano o largo plazo.

Estas cunetas podrían ser beneficiosas en el tratamiento del drenaje con pH casi neutro cuando se les coloca a la entrada de un pantano.

Proceso de Tratamiento del Agua - Otras Sustancias Químicas

Existen numerosos procesos de tratamiento disponibles para la remoción del cianuro y la precipitación de metales pesados disueltos asociados.

Estos procesos incluyen: degradación natural, peróxido de hidrógeno, INCO SO₂/aire, cloración alcalina, tratamientos biológicos y la recuperación del cianuro y procesos de regeneración. La selección del proceso adecuado depende del tamaño del área de operación minera, la corriente efluente a ser tratada (solución o pulpa), concentración de cianuro y criterios de descarga. Smith y Mudder (1992) discuten el tratamiento de materiales residuales de cianuración.

d) Elaboración de Modelos de los Efectos a Largo Plazo

La mayoría de las operaciones mineras a gran escala encontrarán cambios ambientales u operativos no anticipados durante la vida útil del proyecto. Con frecuencia estos cambios tienen un efecto significativo sobre los planes o los costos de cierre anticipados. Con el objeto de determinar si las medidas de cierre serán efectivas, es necesario efectuar monitoreos por períodos de 3 a 30 años posteriores al cierre. Hasta que no se disponga de los resultados de dicho monitoreo, la persona que lo proponga no puede llegar a la conclusión de que las medidas de cierre son efectivas y que no se requiere de medidas de cierre adicionales. Para ayudar a realizar una evaluación temprana de la probabilidad de éxito, es conveniente hacer un modelo del comportamiento anticipado y comparar dichos resultados con los resultados iniciales del monitoreo. Si los resultados tienen el comportamiento esperado, se puede atribuir cierta credibilidad a las predicciones a largo plazo del modelo. Los modelos de medidas de cierre son particularmente útiles para áreas donde las medidas de cierre concurrentes no son aplicables.

Con el propósito de evaluar la efectividad de una tecnología de cierre alternativa y decidir si es adecuada la tecnología de cierre propuesta, es necesario elaborar un modelo de la evolución de las condiciones químicas y de la calidad del drenaje antes de seleccionar las medidas de rehabilitación más apropiadas. Sin dicho modelo podría ser imposible determinar el período de monitoreo y mantenimiento que se requerirá después del cierre.

En el Cuadro 2.3 se muestra en resumen un selecto número de técnicas para elaborar modelos.

4. Estudio de Impacto Ambiental

La aceptabilidad de un plan de cierre depende de la efectividad de las medidas de cierre y recuperación seleccionadas para mitigar el impacto colectivo del desarrollo global de la mina. Por lo tanto, es necesario evaluar si el plan de cierre propuesto logrará un nivel de impacto ambiental aceptable.

En los casos en que el impacto ambiental potencial es menor, por ejemplo para un proyecto de exploración avanzado en donde exista una preocupación por la inestabilidad química en un área relativamente insensible al medio ambiente, el estudio del impacto ambiental podría consistir en una simple descripción de los impactos y la manera cómo las medidas de rehabilitación ayudarán a remediar dichos impactos. El estudio del impacto ambiental potencial podría incluir un estudio cualitativo de la seguridad para el público que ingresa al área, el tiempo para que vuelva a crecer la vegetación, la naturaleza de la nueva vegetación, el potencial para la erosión a largo plazo y cualquier cambio en el uso potencial de la tierra.

Los proyectos con un alto riesgo asociado de impacto ambiental, como minas con materiales generadores de ácidos, requerirán de un estudio profundo de impacto ambiental cualitativo que contemple las condiciones inmediatas y a largo plazo de las medidas de cierre implementadas.

Estos estudios de impacto ambiental podrían involucrar algunas o todas las evaluaciones siguientes para abordar temas y condiciones específicas de cada yacimiento. Debe hacerse una descripción de cualquier restricción al uso del lugar.

Vegetación

Podría incluir una evaluación del probable éxito de las medidas para hacer crecer la vegetación, incluyendo la productividad, sucesión de especies y vegetación clímax, absorción de metales en las plantas, potencial para forraje (donde sea apropiado) y potencial para el control de la erosión.

Uso Público y Fauna Silvestre

Debe abordarse el impacto que las medidas de cierre tienen sobre el uso que los animales silvestres hacen del lugar y el impacto potencial sobre la salud y seguridad de las personas que ingresan.

Contaminación del Agua Subterránea

En los casos en que la contaminación del agua subterránea es una preocupación, es necesario determinar o predecir la magnitud y concentración de dicha contaminación, y efectuar un estudio cuantitativo del impacto potencial.

Contaminación del Agua Superficial

Cuando exista un potencial para la contaminación del agua superficial es necesario determinar o predecir la concentración y magnitud de dicha contaminación y efectuar un estudio cuantitativo del impacto potencial.

Medio Acuático Aguas Abajo

En el caso de que las aguas superficiales y los sedimentos en la misma estén contaminados será necesario evaluar el impacto sobre el medio ambiente acuático aguas abajo.

a) Metodología empleada para la Selección

La selección de las medidas de cierre potenciales deberá basarse en el estudio del impacto ambiental. Con frecuencia, los impactos se describen basándose en un estudio de riesgos. La Figura 2.1 presenta un esquema del enfoque de evaluación cualitativa de riesgos ambientales.

El riesgo podría definirse como una medida compuesta de la probabilidad (de ocurrencia) y la magnitud de los efectos adversos o:

$$\text{Riesgo} = \text{Incertidumbre} \times \text{Daño}$$

Los fundamentos de la evaluación de riesgos son resumidos por Kaplan y Garrick (1981):

- Al analizar el riesgo estamos intentando imaginar cómo sería el futuro si tomáramos un determinado curso de acción (o inacción).

Fundamentalmente, un análisis de riesgos comprende los siguientes pasos:

- Identificación y estudio de riesgos.
- Estudio de la exposición al riesgo.
- Estudio de las consecuencias.
- Caracterización de los riesgos.

Estudio de Riesgos

En el primer paso se identifican los riesgos asociados con una situación específica; por ejemplo, se efectúa una investigación de los desechos y relaves de mina que van a ser colocados en un depósito, o las aguas a ser descargadas de una planta de tratamiento. Los elementos que motivan la preocupación son identificados y se describen los riesgos que pueden representar para el medio ambiente.

Los resultados finales del estudio de riesgos son la selección y descripción de los riesgos presentes para cada modo de falla potencial.

Estudio de la Exposición al Riesgo

El siguiente paso en la evaluación cualitativa del riesgo es realizar una evaluación de la exposición: para cada modo de falla potencial una sustancia que representa un riesgo (como un sedimento) puede ser transportada desde su punto de descarga hasta un lugar donde impacte sobre el medio ambiente. El transporte puede efectuarse a través de diversos medios como tierra, agua superficial, agua subterránea y aire. La exposición que sufren los sistemas ambientales puede ser a través de medios físicos (por ejemplo, sedimento que cubre a la tierra y la vegetación de manera directa o vertido en arroyos) o medios químicos, como metales pesados arrojados a los arroyos. Los elementos del estudio de la exposición que deben considerarse incluyen mecanismos de fallas, eventos iniciadores, riesgos relativos de descarga, magnitud de la descarga, duración de la descarga, recorridos y ecosistema en riesgo.

En el estudio de riesgos y el estudio de la exposición se tratan las siguientes interrogantes:

- ¿Qué puede suceder?
- ¿Cómo es probable que suceda?

Estudio de las Consecuencias

El tercer paso consiste en evaluar las consecuencias o impactos de un riesgo después de la descarga y la exposición de un ecosistema local, por ejemplo, las consecuencias que acarrearán para los peces el arrojamiento de metales pesados en un arroyo.

El estudio de consecuencias formula la interrogante:

- Si llega a suceder, ¿cuáles son las consecuencias?

Caracterización de Riesgos

El cuarto y último paso es caracterizar el riesgo asociado con cada modo de falla basándose en el estudio de riesgos, el estudio de la exposición y el estudio de las consecuencias.

En Van Zyl y Bamberg (1992) y Steffen, Robertson y Kirsten y otros, (1989) se analiza el riesgo cuantitativo y cualitativo del estudio de fallas.

Esta evaluación es apropiada cuando los resultados seguros a largo plazo de las medidas de cierre son esenciales para proteger la salud pública o la seguridad del medio ambiente.

5. Uso de la Tierra

El objetivo es que para el desarrollo de planes de cierre se consideren los siguientes aspectos:

- El uso previsto de esta tierra después del cierre.
- El nivel de impacto ambiental, la productividad de la tierra colindante con el lugar y los riesgos físicos naturales en el área
- La densidad de la población de los alrededores y la facilidad de acceso al lugar.

Es probable que los distritos mineros peruanos sean productivos durante las próximas décadas. Debería definirse el uso que se pretende dar a la tierra para permitir un desarrollo sostenible de las comunidades durante las operaciones mineras así como después del cierre

de las minas. Es difícil anticipar usos futuros de la tierra en distritos mineros relativamente subdesarrollados. Sin embargo, tomando como base la experiencia norteamericana, las minas proveen la infraestructura para el desarrollo de comunidades permanentes que continuarán allí mucho después del cierre de las minas. Para minimizar el potencial de una rehabilitación costosa es decisivo «planificar el cierre» y predecir razonablemente los futuros de la tierra. Los usos futuros de la tierra para el desarrollo de comunidades requieren de la protección de los recursos de agua y la estabilidad física de áreas sometidas a labores mineras o pilas de desechos.

6. Factores que Influyen en el Diseño del Cierre

Las condiciones específicas de cada lugar y el uso de la tierra después de las labores mineras que deberían ser consideradas durante la planificación del proyecto y el diseño del cierre incluyen:

- Equilibrio climático e hidrológico.
- Geología e hidrogeología.
- Hidrología del agua superficial.

La información climática es decisiva para determinar tipos y patrones de tormentas con el fin de evaluar el potencial para erosión, inundación, evaporación y revegetación durante el período posterior al cierre. El balance del agua del lugar es útil para determinar el potencial para la ocurrencia de rezumaderos de los depósitos de relaves, instalaciones de lixiviación o minas.

La caracterización geológica del área del proyecto es decisiva para determinar recorridos, atenuación, o impactos potenciales para la migración de rezumaderos durante las condiciones posteriores al cierre.

La caracterización de la hidrología del agua superficial del área del proyecto es necesaria para diseñar salvaguardas apropiadas con el objeto de minimizar la erosión, el rezumadero y la inundación de componentes de minas cerradas.

Durante las condiciones posteriores a la explotación minera, un yacimiento pasa por un ciclo climático natural que incluye precipitación, escorrentía y rezumadero. El diseño del cierre de una mina debe considerar el ciclo climático y el balance de agua del lugar. El diseñador ha de evaluar el contenido de la humedad existente en pilas de desechos y en materiales naturales. La Figura 2.2 presenta el ciclo hidrológico natural asociado con un componente de desechos de mina durante las condiciones de cierre.

Los componentes críticos que controlan el potencial para impactos ambientales al agua superficial y subterránea incluyen:

Almacenamiento de Humedad: Las diferentes condiciones de humedad en el suelo o los materiales de desecho de minas incluyen, retención por saturación específica mediante fuerzas capilares, y punto de marchitez.

Infiltración: Las velocidades de infiltración dependen del tamaño, textura, geometría, contenido de humedad y precipitación.

Escorrentía Superficial: La cantidad de escorrentía de un componente de mina o de áreas perturbadas depende de la cantidad de precipitación cerca del contenido de humedad superficial, la permeabilidad del material, el ángulo de la pendiente y la cobertura vegetal. El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (USDA, 1972) ha desarrollado una metodología para evaluar la cantidad de escorrentía superficial.

Evaporación: La velocidad de evaporación está determinada por fuerzas externas como la cantidad de sol y viento, y por control interno como el contenido de humedad y la permeabilidad del material.

Evapotranspiración: La evapotranspiración incluye la evaporación y la transpiración de la cobertura vegetal.

Percolación: La percolación ocurre cuando el contenido de humedad excede la capacidad del material para retener la humedad.

Todos estos factores junto con el clima específico del lugar, controlan la cantidad de «soluciones de lixiviación» desarrolladas durante las condiciones posteriores al cierre. La cantidad de precipitación es lo más importante; sin embargo, son posibles los controles secundarios sobre el proceso de control de soluciones de lixiviación mediante el empleo de parámetros de diseño. Los controles secundarios pueden incluir:

Inclinación y gradiente de la superficie: Cuanto más uniforme es la superficie recuperada y más empinada la pendiente de la superficie, mayor será la escorrentía y menores la infiltración y la percolación.

Tamaño del Grano de la Superficie: Los granos de tamaño grande, como los de las pilas de desmonte o de mineral agotado podrían incrementar la infiltración debido a porosidad y permeabilidad altas. Los materiales de grano fino tienden a incrementar la escorrentía.

Vegetación: Las capas uniformes de vegetación incrementan la evaporación y reducen el potencial de percolación.

Coberturas en Capas: La colocación de material en capas durante la rehabilitación puede reducir la percolación hacia el material de desecho del área alterada. Las capas alternas de baja y alta permeabilidad ayudan a mejorar la escorrentía y el drenaje.

Fuerza Disruptiva
Perpetua
Consecuencia
Tecnología de Control
Erosión Eólica
Principal mecanismos de descarga de depósitos de relaves
Expuestos
Corto plazo, estabilización química.

Largo plazo, establecer y mantener cubierta vegetal de desmonte o morena
Erosión del Agua
La erosión por lo regular ocurre durante situaciones extremas de precipitación e inundación
Sedimento, hielo, crecimiento
vegetal, obstrucción por escombros son difíciles de evitarse, requiere de limpieza y mantenimiento.

Diseñar estructuras de desviación que contemplen situaciones de rocas pesadas.

Uso de agregado de rocas pesadas.

Erosión por impacto de la lluvia y por deslizamiento del agua en superficies de depósito, coberturas y presas

La experiencia indica que por lo general se requiere de taludes más planos que 3H a IV para resistencias a la erosión y asentamiento de la vegetación

Erosión por torrentes, causa principal de inestabilidad de superficie de depósitos, coberturas y presas.

Agregado de rocas
Precipitación de Sales
Malogra el sistema de drenaje.

Acción de la Escarcha

Causa principal de inestabilidad a largo plazo de relaves y las estructuras que los contienen.

No existe tecnología de control específica los diseñadores y proponentes deben estar conscientes de las consecuencias y tomarlas en cuenta al considerar planes de cierre.

Acumulaciones Anuales de Hielo

Bloqueo de estructuras de desviación y dispositivos de salida.

Congelamiento de drenajes en presas origina falla de taludes.

Congelamiento de relaves depositados puede dar lugar a grandes sedimentaciones después del cierre y agrietamiento de coberturas.

Penetración Estacional de la Escarcha

Modifica estructuras de relaves (suelo), incrementa permeabilidad.

Levantamiento producido por la escarcha.

Lixiación Físico/Química

Descomposición o disgregación de partículas de roca intactas.

Efectuar pruebas de laboratorio para evaluar la descomposición de rocas usadas para estabilidad a largo plazo en estructuras permanentes solo usar rocas no susceptibles a intemperismo.

Actividades Biológicas

Penetración de las raíces que generalmente tiene un efecto beneficioso sobre las coberturas.

Las raíces podrían penetrar drenajes y atorarlos.

Penetrar capas de baja permeabilidad, se pudren y proporcionan canales para el aire el rezumadero.

Mantener drenajes inundados.

Uso de drenajes más grandes con espacio vacío extra.

Intrusión de animales al construir sus madrigueras La construcción de madrigueras a lo largo de la línea freática en material fino podría ocasionar fallas en tuberías.

Monitoreo y Mantenimiento.

Uso de materiales que los animales no puedan penetrar.

TECNOLOGIA DE CIERRE

Capítulo III TECNOLOGIAS Y ELEMENTOS DE DISEÑO DE CIERRE

1 Introducción

Esta sección proporciona una visión general de las tecnologías y elementos de diseño que pueden utilizarse para desarrollar un plan de cierre. Aun cuando pudiera no ser exhaustiva, sí

brinda al diseñador una lista de partida de alternativas con las cuales puede iniciar el desarrollo de un plan de cierre. Las secciones siguientes discuten las tecnologías de cierre que incluyen la inacción, los controles institucionales, el acondicionamiento o tratamiento y el encapsulamiento.

2 Inacción

La inacción podría ser apropiada cuando una unidad de manejo de desechos de mina, incluso sin actividades de cierre, no amenazan los usos beneficiosos del agua superficial y subterránea. Esta tecnología se aplica con frecuencia a unidades de manejo de desechos de minas que contienen «desechos secos» y están ubicadas en climas áridos. Por ejemplo, si no existe el peligro de que una pila de desmonte o una pila de residuos lixiviados lavados produzcan una solución de lixiviación contaminante o no requerirán de control de sedimentos o polvo, sería seguro dejarlos donde están sin tratarlos.

3 Controles Institucionales

Los controles institucionales incluyen medidas para restringir el acceso a la unidad de desechos de mina, tajo abierto o mina subterránea o cualquier cuerpo de agua que pudieran haber sido contaminados por desechos.

Estos controles son:

Restricción al acceso, usando cercas y/o postes con letreros de advertencia.

Restricciones al uso de la tierra, mediante notas en los títulos de propiedad que no permitan determinados usos de la tierra.

Regulaciones orientadas a restringir el uso del agua subterránea en áreas donde los usos beneficiosos han sido afectados de manera adversa por estas actividades.

Los controles institucionales podrían ser apropiados como tecnologías de cierre provisionales que dan tiempo para implementar el plan de cierre permanente, o para recuperar descargas de componentes de desecho que pudieran haberse producido. Un ejemplo de dónde podría contemplarse la restricción al acceso es la presencia de una poza con líquidos residuales que se evapora antes de que la instalación de desperdicios de la mina sea cubierta. Otros casos en los que se podría requerir de los controles institucionales como parte de un cierre permanente, son el uso de notas en los títulos de propiedad que documenten la presencia de unidades de desperdicios de minas en la propiedad y restrinjan el uso futuro de la tierra que pudiera afectar la integridad de los sistemas de contención. Esta decisión debería tomarse basándose en un análisis de costo/beneficio a fin de evaluar si los costos asociados con la alternativa de cierre se comparan favorablemente con el valor del uso futuro de la tierra en el período posterior a los trabajos de minado.

4 Acondicionamiento o Tratamiento

A fin de cumplir con los objetivos de cierre, podría ser necesario el acondicionamiento o tratamiento de los desechos, las soluciones de lixiviación que escapan de los mismos o el agua receptora que ha sido afectada por desechos. Se requiere del uso de esta tecnología de cierre cuando las características físicas o químicas de los desechos, las soluciones de lixiviación y el agua receptora deben ser alteradas para lograr un cierre efectivo en términos de costos. El acondicionamiento hace que los desechos sean más apropiados para el cierre, mientras que el tratamiento reduce las concentraciones de constituyentes que afectan los usos beneficiosos del agua. El acondicionamiento es por lo general físico y puede implicar nivelar la superficie del botadero de desechos con el objeto de facilitar el drenaje, secar relaves para eliminar líquidos libres o compactar los desechos para formar un cimientado apropiado que cubra el suelo. En otros casos también puede ser químico como el control del polvo de la superficie del desecho sólido usando aglutinantes químicos. El tratamiento puede ser químico, físico o biológico. Puede

ir desde las tecnologías simples, como la adición de cal a los desechos a fin de controlar el pH, hasta los complejos, como la construcción de una planta de tratamiento físico-químico para

tratar un efluente líquido. La recuperación de recursos residuales en los desechos, como el metal por ejemplo, también puede ser considerada como una tecnología de tratamiento.

Las tecnologías de acondicionamiento o tratamiento pueden aplicarse sólo una vez podrían ser necesarias para un período largo de tiempo o incluso a perpetuidad. Las aplicaciones sencillas son aquellas que cambian permanentemente las características de los desechos e incluyen por ejemplo, la consolidación de relaves y la remoción de exceso de líquidos usando drenajes y cargando la superficie con una capa de desmonte.

El tratamiento prolongado, por ejemplo, es el aplicado a una corriente de solución de lixiviación que se genera continuamente, empleando para ello medios físico-químicos.

Se podría categorizar al tratamiento prolongado como «cuidado activo» o «cuidado pasivo». Los métodos activos incluyen aquellos que involucran un tratamiento físico-químico, y en algunos casos tratamiento mediante terrenos pantanosos, cuando se requiere la remoción regular del sustrato a fin de brindar un tratamiento eficiente. En otros casos, el tratamiento mediante terrenos pantanosos podría ser posible sin necesidad de mantenimiento y podría representar una tecnología de cuidado pasivo.

Podría ser necesario seleccionar la tecnología de acondicionamiento o tratamiento basándose en pruebas, las que podrían incluir pruebas comparativas y de laboratorio, plantas o proyectos piloto. Los resultados de estas pruebas proporcionan información sobre la efectividad y los costos de diversas alternativas para así poder seleccionar el método más apropiado.

Algunas tecnologías de tratamiento que han sido empleadas como parte del cierre de unidades de manejo de desechos de minas incluyen:

Las pilas de lixiviación agotadas en operaciones mineras, a menudo son lavadas con agua y tratadas ocasionalmente con un agente oxidante con el objeto de reducir las concentraciones de reactivos y metales en el agua intersticial.

La instalación de un planta de tratamiento físico-químico en una mina de oro en un clima húmedo con el objeto de tratar el drenaje ácido de roca (DAR) y rezumaderos de relaves durante un período de tiempo prolongado después del cierre;

La aplicación de tierra al rezumadero que contiene concentraciones elevadas de cianuro y nitrato devolviendo a la pila de residuos lixiviados de donde se deriva el rezumadero. El tratamiento se produce por procesos tales como oxidación, volatilización y actividad biológica.

5 Encapsulamiento

a) Introducción

El objetivo del encapsulamiento es reducir o eliminar el transporte de fluidos a través de los desechos, donde estos fluidos producen una solución de lixiviación que representa una amenaza para la calidad del agua. Su objetivo también es evitar que el viento disperse las partículas de desechos que suponen una amenaza a la calidad del agua al hacer contacto directo con el agua superficial, o por la lixiviación de constituyentes de las partículas que vuelven a ser depositadas. El encapsulamiento implica aislar parcial o totalmente al material de desecho del medio ambiente circundante. Los elementos de diseño claves de esta tecnología incluyen:

- coberturas que están colocadas sobre el material de desecho y enlazadas con el sistema de contención natural o artificial subyacente,
- métodos de manejo del agua superficial, como diques y canales a fin de evitar el contacto de la escorrentía con los desechos y, allí donde sea necesario y además
- reforzamiento del sistema de contención existente por medio de muros de contención construidos alrededor de la instalación, o construyendo un drenaje subterráneo a fin de evitar el contacto del agua subterránea con los desechos. Estos elementos se discutirán más adelante.

b) Coberturas

Las coberturas apropiadas pueden incluir la superficie existente del desecho, la vegetación directa del área con desechos, una capa superficial del suelo a fin de facilitar el asentamiento de vegetación o sistemas con capas múltiples más complejos. La figura 3.1 ilustra los tipos de coberturas alternativas aplicables a diferentes unidades de manejo de desechos de minas. Estos van desde utilizar el material de desecho mismo hasta una cobertura compleja que a menudo se recomienda para áreas con desechos peligrosos. La selección de una cobertura debería basarse en las características climáticas, geológicas y la de los desechos.

Los componentes básicos de las coberturas multicapas (EPA o Agencia para la protección del Medio Ambiente de Los Estados Unidos, 1989) son las siguientes:

- Una capa superior que consiste de una capa de suelo con vegetación o reforzamiento a fin de minimizar la erosión y el transporte de los materiales de desecho a través del aire.
- Una capa de drenaje que minimiza la infiltración de agua dentro de los desechos o la barrera contra las infiltraciones debajo de los desechos. Una capa de drenaje también evita la migración capilar ascendente inversa de soluciones contaminadas.
- Una capa formada por uno o dos componentes, que actúa como una barrera contra las infiltraciones, y que limita la infiltración de agua dentro de los desechos subyacentes.
- Capas especiales, como barreras bióticas, con el objeto de evitar el daño que puedan ocasionar a la barrera contra la infiltración de raíces de plantas y de animales al construir sus madrigueras y capas de cimentación necesarias para sostener una cobertura y/o proporcionar la forma de la cobertura necesaria para controlar la escorrentía superficial y el drenaje interno.

El cierre de unidades de manejo de desechos de minas podría no requerir de ningún componente o de sólo algunos o de todos los componentes. La selección y diseño de los componentes antes mencionados deben cumplir con los objetivos de cierre y, al mismo tiempo, incorporar las condiciones específicas para cada yacimiento anteriormente presentadas. Estas son:

- Condiciones climáticas, que determinan la cantidad de infiltración y el potencial de erosión del agua superficial.
- Características de los desechos, como las características físicas y químicas y la forma de la superficie de los desechos, las que determinan la necesidad de una cobertura e influyen la cantidad y calidad de soluciones potenciales de lixiviación o rezumaderos. Las características físicas y la forma de la superficie también determinarán la necesidad de colocar algún relleno y/o capa de cimentación bajo la cobertura.
- El sistema de contención existente y su registro de rendimiento que determina la necesidad, si la hubiese, de una contención adicional y que también puede dictar la cantidad de control de infiltraciones que la cobertura debe brindar.
- Las características de las unidades geológicas subyacentes y las distancias hasta los cuerpos de agua subterráneos y superficiales que afectan los riesgos potenciales a la calidad del agua, por consiguiente, el grado de preocupación ecológica que debe incorporarse en el plan de cierre.

La selección de los diferentes componentes para la cobertura y las especificaciones para los mismos, como tipo y grosor del material, tamaño, inclinación y método de construcción, deberán basarse en la combinación más efectiva en términos de costos de los componentes que cumplan con los objetivos del cierre y las metas de rendimiento. En algunos casos, podría ser necesario efectuar una comparación detallada de diversas combinaciones alternativas o diseños de sistemas de coberturas que cumplan con las metas de rendimiento.

El Cuadro 3.1 describe con mayor detalle las consideraciones de diseño para los diversos componentes de una cobertura.

Capa Superficial

La capa superficial consiste de una capa vegetal o una de refuerzo formada por material del tamaño de la grava (Figuras 3.1A y 3.1B). En algunas áreas, el clima imperante podría inhibir el asentamiento y mantenimiento de vegetación, o un uso alternativo planeado del yacimiento podría impedir que crezca la vegetación. En otros casos, la superficie de los desechos podría estar lo suficientemente reforzada de manera que no se requiera de un tratamiento adicional.

De ser necesario, el componente vegetal de la capa superficial necesitará las siguientes especificaciones generales:

- Plantas perennes adaptadas al medio local.
- Resistencia a la sequía y temperaturas extremas.
- Raíces que no rompan la barrera contra las infiltraciones, si la hubiera.
- Ser capaz de crecer vigorosamente en suelo pobre en nutrientes con una adición mínima de nutrientes.
- Suficiente densidad de plantas con el objeto de minimizar la erosión de la cobertura.
- Ser capaz de sobrevivir y funcionar con poco o ningún mantenimiento; y,
- Son preferibles las plantas de sabor desagradable, que no se usen para alimento del hombre o los animales, pues se ha reportado que algunas plantas absorben metales tóxicos.

La selección de la especie de planta es una consideración importante. El uso de arbustos y árboles a menudo no es apropiado porque los sistemas de raíces se extienden hasta una profundidad que normalmente invadirá la capa de drenaje, la barrera contra las infiltraciones, o los desechos.

Es recomendable consultar a un agrónomo o universidades locales para que recomienden las variedades de plantas adaptadas y brinden orientación sobre el cultivo de plantas locales.

Cuando se usa una capa de refuerzo, se recomienda que el material tenga las siguientes características:

- Capaz de mantenerse en su lugar y minimizar su propia erosión y la del componente del suelo debajo durante condiciones ambientales extremas de lluvia y/o viento.
- Contener materiales duraderos con poca probabilidad de intemperizarse de manera significativa en un período prolongado de tiempo.
- Capaz de servir al afianzamiento del material subyacente sin comprometer su rendimiento.

Un componente de refuerzo de la superficie compuesto por materiales bastante gruesos favorece la infiltración antes que la escorrentía. Una capa como ésta, por lo tanto, será más apropiada para áreas áridas o se le debería usar en combinación con una capa que actúe como una barrera contra la infiltración. En aquellas áreas, la generación de soluciones de lixiviación debido a la infiltración del agua no es por lo general una preocupación.

En los casos de capas superficiales vegetal y reforzada, lo ideal sería que el contorno de la superficie superior sea ligeramente convexo y con una inclinación uniforme. En un terreno sin nivelar deberán instalarse estructuras de derivación para evitar que el agua superficial corra sobre la cobertura. Para evitar el empozamiento del agua de lluvia debido a las irregularidades de la superficie, la cobertura deberá estar inclinada de manera que se consigan las inclinaciones indicadas en el Cuadro 3.1 después de hacer los ajustes por asentamiento y subsidencia.

Inclinaciones mayores que 5 a 50 por ciento requieren por lo regular de controles especiales, como el reforzamiento o la vegetación, a fin de evitar la erosión.

Allí donde se requiera que la nueva vegetación proporcione una protección adecuada contra la erosión y/o por razones estéticas, podría ser posible volver a plantar vegetación en forma directa sobre la superficie de los desechos de la mina. En algunos casos, ello podría requerir de tratamiento químicos y/o biológicos para el suelo. Cuando esto no sea posible, debe

instalarse un sistema de suelo con una o dos capas a fin de cubrir los desechos (Ver Figura 3.1C, D y E).

La cobertura del suelo con una capa simplemente proporciona un medio mejorado para el crecimiento de la vegetación. El sistema de doble capa incorpora un sistema de drenaje y/o brecha capilar que básicamente proporciona protección a la vegetación contra cualquier constituyente químico que pudiera haber en los desperdicios. También proporciona un drenaje mejorado en la cobertura que puede reducir la cantidad de infiltración que penetra en los desechos.

Las pautas recomendadas para la cobertura de suelo que se requiere para ayudar al crecimiento de la vegetación son las siguientes:

- Para soporte de la vegetación, un grosor de 0,15 a 0,6 metros. Este grosor mínimo sólo puede usarse si los desechos de la mina debajo de la capa del suelo no son fito-tóxicos y pueden ayudar en cierto grado al crecimiento vegetal. Este por lo general es el caso de los minerales de oro oxidados. Se podría necesitar un grosor total mayor allí donde la penetración máxima de la escarcha exceda esta profundidad, o se necesite o desee un mayor almacenamiento de agua para las plantas.
- El suelo deberá ser de textura mediana a fin de facilitar la germinación de las semillas y el desarrollo de las raíces de las plantas.
- La capa deberá recibir compactación mínima y permitir una infiltración suficiente para mantener el crecimiento durante períodos más secos.

Los suelos con textura mediana, como gredas, tienen las mejores características globales para la germinación de semillas y el desarrollo de sistemas de raíces de las plantas. Los suelos con textura fina, como la arcilla a menudo son fértiles pero proporcionan un drenaje pobre que puede causar problemas como la formación de charcos de agua sobre la superficie o dificultad para el afianzamiento inicial de la cobertura de plantas durante los períodos húmedos. Los suelos arenosos son a menudo un problema debido a su baja capacidad para retener el agua y pérdida de nutrientes por lixiviación. Podría ser efectivo en términos de costos excavar y almacenar la capa superficial de suelo ubicada en los lugares donde estarán las unidades de manejo de desechos de mina, tajos de mina, áreas de planta, etc., durante la construcción de un proyecto minero allí donde sólo se puede conservar una mínima cantidad de capa superficial de suelo nativo almacenándolo; el resto puede compensarse seleccionando material local que posea las cualidades apropiadas. En Hutchison y Ellison (1992) puede encontrarse una discusión más detallada de otros elementos constitutivos de capas.

c) Manejo del Agua Superficial

El objetivo del manejo de agua superficial es proteger la unidad de manejo de desperdicios de daños producidos por la erosión. El daño por erosión debido a escorrentía proveniente de áreas que desaguan en la unidad de manejo de desperdicios puede ser evitado mediante desviaciones. Los elementos de diseño que pueden utilizarse para desviar la escorrentía incluyen zanjas con revestimiento y sin revestimiento, así como diques y terraplenes.

El revestimiento de zanjas se puede lograr colocando grava o agregado de rocas, o vegetación. En lugares donde el material degradable encuentra velocidades extremadamente altas de escorrentía, podría ser necesario instalar materiales más resistentes a la erosión, como enrocamiento cementado, aglutinador de suelos, o gabiones. El enrocamiento cementado implica inyectar lodo de cemento entre los cantos rodados. El aglutinador de suelos suponía añadir entre 2 y 10 por ciento por peso de cemento al suelo antes de que se compacte para formar un revestidor de zanjas (Asociación de Cemento Portland, 1979). Los gabiones son jaulas prefabricadas de alambre o acero dentro de las cuales se coloca agregado de rocas, formando grandes bloques.

ALTERNATIVAS DE CIERRE

Capítulo IV ALTERNATIVAS DE CIERRE

1 Introducción

Esta sección describe las tecnologías que pueden usarse y los elementos de diseño asociados para el cierre de instalaciones mineras. Las siguientes son definiciones de los términos empleados en esta sección:

Plan de Cierre -Considera los detalles de diseño y construcción seleccionados para cerrar una unidad de manejo de desperdicios, de acuerdo con los objetivos del cierre y los requerimientos de los reglamentos de cierre pertinentes. Este plan incluye una narración, dibujos de diseño, especificaciones sobre construcción, así como certificación de calidad, monitoreo y otros planes de mantenimiento después del cierre.

Tecnologías de Cierre -Los enfoques técnicos que se pueden usar para cerrar la unidad de manejo de desperdicios. Es útil hacer la distinción entre tecnologías de «cuidado pasivo», que una vez instaladas requieren de muy poca operación y mantenimiento, y tecnologías de «cuidado activo», que requieren de una cantidad significativa de operación y mantenimiento constantes. Un buen ejemplo de una tecnología de cuidado pasivo es una cobertura de bajo mantenimiento, mientras que la tecnología de cuidado activo típica es el tratamiento químico de una corriente de solución de lixiviación continua.

Elementos de Diseño -Los componentes detallados que se requieren para implementar las tecnologías seleccionadas para un plan de cierre. Estos incluyen ítems tales como una capa de suelo para ayudar al crecimiento de la vegetación en una cobertura, la instalación de drenajes para mejorar la consolidación de agua barrosa o rociadoras para facilitar la evaporación de desperdicios líquidos.

2 Minado Subterráneo

El minado subterráneo generalmente requiere de un complejo sistema de excavaciones de explotación, de acceso y de servicio para recuperar el mineral. Estas excavaciones tendrán diferentes niveles de estabilidad. Las excavaciones más grandes podrían ser rellenadas o dejar que se derrumben. Dependiendo de la subsidiencia resultante, la superficie del terreno podría ser afectada en grados variables.

La mayoría de métodos de minado se encuentran dentro de las siguientes amplias categorías:

Corte y Relleno Posterior: El mineral es extraído por corte y la roca de encima se derrumba en forma simultánea con la extracción del mineral.

Post-Soterramiento: La extracción del mineral se produce sin rellenar y el derrumbe podría ocurrir cualquier momento después de la extracción del mineral.

Labores Abiertas con Pilares Rígidos: Se dejan pilares para mantener la estabilidad mientras se extrae el mineral; el derrumbe y la disrupción de la superficie podrían ocurrir en el futuro.

Minado con Relleno: las aberturas dejadas por la extracción del mineral son rellenadas con material que podría estar aglutinado.

Esta técnica reduce en mucho la perturbación potencial a la superficie.

Existen numerosas variaciones dentro de cada categoría que dependen de la geometría del mineral, la estabilidad de la roca, y restricciones mineras prácticas, así como factores económicos. La selección de un método de minado que maximice el relleno es importante para reducir los costos de cierre en las minas subterráneas peruanas.

El tamaño y la complejidad de las excavaciones subterráneas, el tipo de operaciones efectuadas y la geometría del yacimiento mineral, todos contribuyen a los impactos potenciales a largo plazo. En el Cuadro 4.1 se resumen los objetivos del cierre y las medidas de cierre potenciales orientadas a la estabilidad física y química y al uso de la tierra.

3 Minado a Tajo Abierto

La geometría de cada tajo abierto es única y depende del grado y geometría del mineral, la resistencia de la roca y la topografía. La mayoría de tajos se excavan debajo de la napa freática, lo que origina cambios en el patrón del flujo del agua subterránea. También son alterados los patrones del drenaje superficial. Podría haber una conexión con las labores subterráneas, si las hubiese. Muchos tajos se cubren parcialmente con agua después del minado. En el Cuadro 4.2 se resumen los objetivos del cierre y las medidas de cierre potenciales orientadas a la estabilidad física y química y al uso de la tierra.

4 Pilas de Desmonte y Sobrecapa

La mayoría de proyectos requieren de la excavación de materiales no económicos con el objeto de ganar acceso al mineral subyacente o dejarlo expuesto. Estos materiales se colocan en pilas, generalmente tan cerca del punto de excavación como sea posible de modo que no obstaculicen las labores mineras futuras. En algunos yacimientos el mineral se coloca en pilas y es lixiviado, dejando las pilas de minerales agotados o de bajo grado para ser rehabilitados.

Las pilas de desmonte incluyen todos los materiales de roca excavados, pilas de mineral cuyo procesamiento no resulta económico y pilas de mineral agotado. Las pilas de sobrecapa incluyen todos los suelos excavados y suelos orgánicos (capa superficial del suelo).

La geometría de una pila de desmonte y sobrecapa depende básicamente del método de construcción y la topografía local. Las pilas de desmonte y sobrecapa pueden ser construidas con elevaciones que dan como resultado una configuración en terrazas, o ser descargadas finalmente en una cresta en avance que resulta en una sola pendiente continua desde la parte superior hasta la base. La roca descargada formará una pendiente al ángulo de reposo del material. Las pilas en terrazas tienen taludes generales que son más planos que las pilasdescargadas.

Los objetivos de cierre y los métodos potenciales orientados a la estabilidad física y química y al uso de la tierra se resumen en el Cuadro 4.3

5 Sistema de Depósito de Relaves

Los relaves son los residuos que quedan de un mineral después de extraerle todos los minerales económicos recuperables. Son materiales con tamaños desde arena a lamas que generalmente se disponen con agua o pulpa. Después del procesamiento son descargados en un área de depósito diseñada y construida con el objetivo de proteger al medio ambiente de los impactos físicos y químicos de los relaves. Generalmente, los relaves se descargan en depósitos que aprovechan la topografía natural y una presa cuyo objeto es controlar el área de disposición de los relaves.

La determinación del lugar y el tipo de depósito para un proyecto dado depende de un número de factores que incluyen: topografía, riesgos naturales, volumen que será contenido, preocupaciones ambientales referidas a los relaves y la planta, balance de agua y economía. Los objetivos y alternativas de cierre se resumen en el Cuadro 4.4.

6 Manejo y Tratamiento del Agua

Manejo del Agua

Manejo del agua es el término aplicado a las técnicas usadas para el control del agua del yacimiento y alrededores para beneficio de las labores mineras y el medio ambiente circundante. Ello incluye el almacenamiento, transporte y tratamiento del agua para el proceso o propósitos domésticos y la derivación, descarga y tratamiento del agua en exceso. Las instalaciones para el manejo del agua en los asientos mineros con frecuencia incluyen

represas, vertederos, estructuras de captación, zanjas de derivación, alcantarillas, tuberías, mangueras de bombeo, plantas de tratamiento, lagunas de sedimentación y sistemas de desaguado.

En términos generales, las instalaciones que requieran de mantenimiento deberían ser desmanteladas durante la fase de cierre de una mina.

El manejo del agua en un yacimiento invariablemente causará algunos cambios en el régimen hidrológico natural del área. En muchos casos, será meritorio trabajar con el propósito de volver el régimen del agua superficial a la condición que tenía antes de las labores mineras. Generalizar sobre este punto es difícil, pues también hay casos en los que el medio ambiente se ha adaptado a un régimen de agua superficial alterado y su restauración a condiciones anteriores podría tener un impacto negativo general.

Los objetivos de cierre y las medidas de cierre potenciales para la estabilidad física y química y el uso de la tierra se resumen en el Cuadro 4.5.

Tratamiento del Agua

El agua debe usarse durante todo el procesamiento; para molienda para la perforación y para el enfriamiento del agua en las labores mineras, así como para moler y procesar el mineral con el objeto de recuperar los valores metálicos o minerales.

Se han desarrollado circuitos de tratamiento del agua para el tratamiento tanto físico como químico antes de su descarga al medio ambiente receptor o para reciclarla a fin de volverla a usar en la planta. Ejemplos de contaminantes que deben considerarse durante el cierre incluyen:

- El cianuro y otros reactivos de planta.
- Sólidos en suspensión (partículas finas).
- Soluciones de lixiviación contaminadas o drenaje ácido originado por la oxidación del sulfuro.
- Amoníaco y metales.

Las concentraciones elevadas de metales disueltos, nutrientes o reactivos tóxicos, como el cianuro, pueden ser tóxicas para la vida acuática y contaminar los recursos del agua potable. Cargas altas de sólidos en suspensión pueden enfangar los lechos de los ríos, afectar los lugares de desove de los peces o interferir con el funcionamiento de las branquias de los mismos.

Los procesos de tratamiento del agua que se implementen durante la operación de la mina deben continuar después del cierre hasta que las condiciones de la calidad del agua satisfagan todos los objetivos. Un proyecto que requiere del tratamiento del agua a largo plazo después del cierre no puede considerarse «cerrado» mientras sea necesario el tratamiento del agua.

7. Sustancias Químicas

Las actividades mineras usan una variedad de sustancias químicas en la excavación, procesamiento del mineral, tratamiento del agua y actividades de apoyo. Todas las sustancias químicas llevadas a una mina deberán ser identificadas y manejadas de acuerdo con la Guía de Manejo Ambiental de Reactivos y Productos Químicos del Perú (Ministerio de Energía y Minas, 1994). Todas las sustancias químicas deberán almacenarse en una instalación segura y en recipientes apropiados para el material, para el período de almacenamiento previsto y para el ambiente del almacenamiento. Al momento del cierre todas las sustancias químicas no utilizadas deberán ser devueltas a los proveedores o colocadas en una instalación de disposición de desechos fuera del lugar que tenga autorización para aceptar dichas sustancias.

8 Edificios y Equipo

Todos los edificios están incluidos: planta/concentradora, estructuras asociadas, y equipo de superficie y subterráneo. Estos podrían incluir:

talleres, oficinas, comedores, lavanderías, laboratorio de ensayos, planta generadora de energía, lugar para la fabricación y almacenamiento de explosivos, castillos de mina, grúas y equipo para pozos, fajas transportadoras y equipo móvil. En el Cuadro 4.6 se resumen los objetivos del cierre y las medidas de cierre potenciales orientadas a la estabilidad física y química y al uso de la tierra.

9 Desechos de Rellenos y Otros Desechos

Los rellenos de tierra y otros desechos incluyen todos los desechos industriales y civiles producidos por las actividades accesorias de una operación minera. Estos incluyen rellenos de tierra, aguas cloacales, fango producido durante el tratamiento del agua y suelos contaminados.

En el Cuadro 4.7 se resumen los objetivos de cierre y las medidas potenciales de cierre para desechos de rellenos y otros desechos.

a) Rellenos de Tierra

Los rellenos de tierra podrían destinarse a la disposición de desechos sólidos o pozas para procesar desechos orgánicos (aguas cloacales).

Estos lugares deberán ser diseñados, operados y cerrados de acuerdo con las disposiciones peruanas sobre el particular.

b) Disposición del Lodo Formado Durante el Tratamiento del Agua

El lodo formado por los procesos de tratamiento del agua es generalmente una pulpa con un contenido de sólidos del 5 al 30%. Estos lodos son el producto final de la concentración y remoción de materiales nocivos de aguas contaminadas por las actividades mineras. Generalmente, la mayoría de los lodos de un yacimiento provienen de la neutralización de drenaje acidificador. Estos, al igual que la mayoría de lodos son producidos con pH neutro o alto y los precipitados no son estables a un pH bajo. Es necesario evaluar la estabilidad y lixiviabilidad del lodo en las condiciones propuestas de almacenamiento a largo plazo.

Los lodos que son mantenidos en una condición alcalina por lo regular permanecerán estables. Sin embargo, la lluvia ácida o el contacto con relaves acidificadores podrían producir inestabilidad en el largo plazo. Con el tiempo, su capacidad neutralizadora se agotará y el pH caerá, lo que permitirá que los constituyentes precipitados sean lixiviados y contaminen el rezumadero.

c) Relleno Contaminado

La contaminación del relleno se puede producir en un yacimiento como resultado de la construcción con material inapropiado (como arenas de relaves o desmonte que generen ácidos) o por derrames de concentrados o sustancias químicas usadas en el yacimiento. El objetivo de la estabilidad química de los suelos contaminados es la protección de la calidad del agua tanto superficial como subterránea. Los materiales que generan ácidos o las soluciones de lixiviacióncontaminantes no deberían usarse como material de relleno para edificios, terraplenes o carreteras.

En una mina podrían producirse derrames de sustancias químicas u otros materiales por lo tanto, el plan de limpieza de derrames deberá formar parte de los procedimientos operativos del lugar. En las «Guías para Poner Fuera de Servicio y Limpiar Yacimientos en Ontario», Agencia de Protección del Medio Ambiente de Ontario, (1990) se puede encontrar pautas para identificar suelos con niveles inaceptables de contaminación.

En el proyecto se deberían establecer criterios específicos para cada lugar.

Los materiales contaminados deberán ser retirados y proceder a su disposición en el yacimiento, si ello fuese factible. Los lugares de disposición potenciales incluyen el relleno o el

depósito de relaves en el mismo yacimiento o un relleno fuera del yacimiento cuando estos carezcan de licencia para guardar los desechos contaminantes.

10 Infraestructura

La infraestructura incluye aquellas instalaciones que proporcionan apoyo a la actividad minera. Esta incluye: carreteras, líneas férreas, pistas de aterrizaje y líneas de fuerza eléctrica. En el Cuadro 4.8 se resumen los objetivos del cierre y las medidas potenciales para la estabilidad física y química y el uso de la tierra.

11 Plan de Cierre

El plan de cierre para instalaciones de desechos de minas se logra seleccionando las tecnologías apropiadas entre las presentadas en esta Sección. Esta selección se consigue mejor si se toman en consideración las condiciones específicas del yacimiento y los desechos, y evaluando la contención de estos últimos. Para cualquier proyecto, el cierre requiere de diversas tecnologías o modificaciones a alguna tecnología. El Cuadro 4.9 resume una gama de planes de cierre típicos para diversos tipos de unidades de manejo de desechos de minas. El Cuadro 4.10 presenta un esbozo de un plan de cierre de mina típico.

Existe una diferencia significativa entre los requerimientos de cierre para las unidades de manejo de desechos en climas áridos y las de climas húmedos. En climas secos existe poco potencial para la formación de soluciones de lixiviación, y en ocasiones para licuefacción sísmica o espontánea (dependiendo del estado del material, por ejemplo, relaves depositados como pulpa). La turbidez en la escorrentía proveniente de unidades de manejo de desperdicios por lo regular no es un problema, ya que no es significativamente diferente a la escorrentía proveniente del terreno estéril natural que rodea a las instalaciones de la mina. Por lo tanto, la revegetación no siempre es necesaria para proteger los usos beneficiosos del agua. Los requerimientos de cierre a menudo pueden cumplirse limitando el acceso y dejando las instalaciones de desechos tal como están. En algunos casos, si los depósitos de relaves son propensos a la erosión causada por polvo irrespirable, requerirán de revestimiento con rocas.

En climas húmedos, donde los desechos pueden generar una solución de lixiviación que represente una amenaza para la calidad del agua, se requieren de medidas de cierre más amplias. Con frecuencia, se necesita una cobertura y/o revegetación como protección contra la corrosión y control de las infiltraciones. En casos extremos, las pilas de desechos y los depósitos de relaves podrían requerir de coberturas con múltiples capas con el objeto de limitar la infiltración.

Otras actividades de cierre que se emplean con frecuencia por razones estéticas o de otra índole incluyen:

- Volver a perfilar el borde de pilas de desmonte o de residuos de lixiviación con el objeto de que se produzca cierto grado de combinación visual con el paisaje.

- Revegetación de unidades de manejo de desperdicios en climas áridos.

- Nivelación de taludes de pilas de lixiviación o relaves secos a fin de evitar el desmoronamiento de taludes.

Cuadro 4.10
Esbozo de un Plan de Cierre Típico

1.0 Introducción

- Ubicación de la Mina
- Objetivos del Plan de Cierre

Requerimientos del Plan de Cierre

2.0 Componentes del Proyecto

2.1 Descripción del Proyecto

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

2.2 Instalaciones de Desechos de la Mina

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

2.3 Sistemas de Manjeo de Agua

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

2.4 Estructuras Accesorias

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

3.0 Criterios para el Cierre

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

4.0 Actividades de Cierre para la Estabilidad Física y Química

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

5.0 Cronograma de Actividades de Cierre

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

6.0 Monitoreo en el período de Postcierre

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

7.0 Costos Estimados del Cierre

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

7.0 MONITOREO DE TANQUES EN SERVICIO

Dos beneficios de la detección de filtraciones son obvios cuando se consideran los altos costos de la limpieza y tratamiento de los productos filtrados, costos que pueden aumentar rápidamente si la filtración no se detecta durante algún tiempo. El costo de reemplazo de un tanque que está filtrando o está corroído ("casi filtrando") es de aproximadamente US\$ 25,000, pero el costo de recuperación del suelo y el agua subterránea de un tanque que está

filtrando puede exceder un millón de dólares que aumenta si la filtración continua. Una propuesta conservadora con respecto al reemplazo de un viejo tanque y el monitoreo de una filtración continua es claramente aconsejable. El material aquí presentado es una adaptación del EPS (por sus siglas en inglés (1989)) - Servicio Canadiense de Protección Ambiental.

Generalmente, se utilizan cuatro propuestas para la detección de las filtraciones ya sea en forma individual o combinadas:

- s Control de inventario
- s Verificación periódica de los tanques
- s El uso de sensores y equipos instalados de detección de filtraciones
- s Pozos de monitoreo

El control de inventario es quizá el método más simple y barato de detección de filtración del tanque y debe utilizarse como un programa mínimo. Se mide el volumen del producto en el tanque, generalmente con una varilla para medir la profundidad, y se compara con el volumen entregado y vendido. Se utiliza con frecuencia una pasta indicadora de agua en la varilla para determinar si el agua está acumulada en el tanque, que por sí mismo, es un signo posible de filtración. Los volúmenes del producto se miden sobre un periodo de alrededor de un mes después del cual se realiza una evaluación de inventarios.

El principal problema ligado con el control de inventario es la exactitud con la que se puede medir un gran volumen de líquido volátil. Esta se ve afectada por cambios en la temperatura en el tanque y en el producto entregado. Una diferencia de un grado produce un error de 22 l en un tanque de gasolina de 20,000 l (0,11% de error). Otro problema es la exactitud de la medición del tanque. La medida de la varilla es la técnica más utilizada para medir tanques. El error humano al leer la varilla, asumiendo la utilización de una metodología estándar y apropiada, es de aproximadamente 1 a 13 mm ó 13 a 218 l en un tanque de 20,000 l (0,06 a 1,1%). La exactitud requerida en los contómetros de entrega es 0,5% ó 100 l en un tanque de 20,000 l. Un error total de 1,7% (340 l para un tanque de 20,000 l) es por consiguiente, posible con sólo un cambio de 1 grado en las lecturas de la temperatura y es mayor si la diferencia en la temperatura aumenta.

Al utilizar la prueba de inventario, las filtraciones del tanque deberán aparecer en un mes si son pequeñas (es decir < 0,5% del volumen del tanque) y más pronto si son grandes. La investigación de las discrepancias mayores de 0,5%, entre las ventas totales medidas y las medidas físicas de inventario del tanque, deben realizarse diariamente y deben incluir la verificación de la calibración de los medidores de bombeo y determinación de la posibilidad de derrame durante la entrega del producto o la posibilidad de robo. Cuando no se está seguro, debe verificarse la

integridad de los tanques y las tuberías.

Una prueba de inventario es la prueba "Warren Rogers". El operador de tanque llena un cuadro en el que se presenta el suministro y uso del producto. La evaluación mensual de los datos indican el estado del tanque.

Estos se realizan "según sea necesario" y generalmente requieren que el tanque deje de funcionar unas horas o unos días. A pesar que la prueba de "hermeticidad" no detectará una filtración en el momento en que ésta ocurra, es parte integral de un programa efectivo de detección de filtraciones. La Asociación Nacional de Protección contra Incendios de Estados Unidos requiere que los controles puedan detectar filtraciones tan pequeñas como de 0,19 Lts./hr. reajustadas según las variables. Estas variables son los cambios de temperatura del producto, la deflexión final del tanque, la estratificación del producto, y los bolsones de vapor.

El coeficiente de expansión térmico promedio para la gasolina es de $0,0011/^{\circ}\text{C}$ comparado con $0,0002$ para el agua a $17,2^{\circ}\text{C}$. Si el coeficiente de expansión térmica no se toma en cuenta durante el control del tanque, un cambio de temperatura en el producto puede producir una falsa indicación de ganancia o pérdida durante el control. Una filtración puede específicamente ocultarse por la expansión volumétrica del producto.

Existen varios métodos de prueba comercial actualmente disponibles, sin embargo, éstos no podrían estar fácilmente disponibles en el Perú (Véase Cuadro 7.1.)

Mientras que un control eficiente de filtración indica la situación de un tanque subterráneo, serán necesarios los sensores y equipo de detección para el monitoreo continuo. Puede utilizarse el monitoreo intersticial en los tanques de doble pared que utilizan sensores de presión o de fluido para la detección de filtraciones. Otros métodos incluyen el uso de rejillas de alambres, pozos de observación, tubos en U y sensores alrededor de la ubicación del tanque. Existen varios criterios que deben considerarse al seleccionar un sistema, incluyendo costos, si éste ofrece una detección intermitente o continua, sensibilidad, efecto de los valores de fondo normales en el dispositivo, resistencia a falsas alarmas, facilidad de mantenimiento, si el puede ser instalado como una mejora y, las otras funciones que podrían ofrecer como por ejemplo: protección contra robo. Varios de los tipos de detectores están enumerados en el Cuadro 7.2 y algunos equipos comercialmente disponibles están enumerados en el Cuadro 7.3.

7.4.1 Tubería Presurizada (Bombas Sumergibles)

Un detector automático de filtración de línea debe indicar al operador la presencia de una filtración restringiendo o cerrando el flujo del producto a través de la tubería o por medio un dispositivo que haga sonar una alarma visible o audible. Estos dispositivos sólo pueden ser utilizados si detectan filtraciones de 0,11 litros por hora a presión de línea de 69 kPa en una hora. El detector de filtración debe ser verificado anualmente de conformidad con los

requisitos de los fabricantes.

Debe realizarse anualmente, una prueba de hermeticidad de la línea para detectar una filtración de 0,38 ltr/hr a 1½ veces la presión de operación, o pueden hacerse monitoreos mensuales utilizando uno de los siguientes métodos si están diseñados para detectar una filtración de cualquier parte de la tubería subterránea que contenga productos.

- s Monitoreo de vapor.
- s Monitoreo de agua subterránea
- s Monitoreo intersticial
- s Otros métodos autorizados

7.4.2 Tubería de Succión

Las tuberías por debajo del suelo deben tener una pendiente al menos de 2% o 2 cm por metro (¼ por pie) de tubería de manera que el contenido de la tubería drene de vuelta al tanque de almacenamiento si la succión se deja de realizar. Una válvula de retención (check) simple ubicada directamente debajo y tan cerca como sea posible a la bomba asegurará que el producto drene nuevamente hacia el tanque desde la línea cuando la bomba de succión no está funcionando.

Para 1993, todos los tanques enterrados en Estados Unidos deben tener sistemas autorizados de detección de filtraciones. Nótese que los requisitos locales pueden ser más estrictos que los requisitos nacionales. Siempre se debe determinar qué requisitos se cumplirán.

7.5 Pozos de Monitoreo

Este método detecta líquidos o vapores en el relleno que bordea el tanque. En instalaciones donde el agua subterránea está casi sobre la parte inferior del tanque, se utiliza un detector de líquido (ver Cuadro 7.3) que flota en la superficie de la napa freática en un pozo de monitoreo (ver Figura 9.4) ubicado hidráulicamente aguas abajo del tanque o en varias ubicaciones alrededor del sistema del tanque. Si ocurriese una filtración, el petróleo flota en la superficie del agua subterránea en el pozo, y puede detectarse por el monitor. En instalaciones donde el agua subterránea está por debajo o no muy cerca al tanque, puede instalarse un detector de vapor en un pozo seco en el relleno. Alternativamente, se pueden dirigir los vapores desde uno o varios de esos pozos secos y monitoreados a una ubicación central. Este sistema es moderadamente costoso, y puede detectar sólo grandes filtraciones (12 litros por hora o más grandes)(Cheremisinoff, y otros, 1990).

Los pozos de monitoreo también pueden utilizarse para vigilar el alcance de la contaminación.

Se podrían necesitar amplios datos geológicos para el monitoreo de agua subterránea, incluyendo la geología de la

superficie (topografía y tipo/profundidad del sobrecargado), litología acuífera y tipo de formación geológica (estratigrafía local y estructura).

ESTIMACIÓN DE COSTOS

Capítulo VI ESTIMACION DE LOS COSTOS DE CIERRE

1. Introducción

La filosofía de «planificar para el cierre» requiere que los elementos del plan de cierre sean incluidos en la planificación inicial del proyecto.

También es decisivo que el análisis económico del proyecto incluya una consideración realista de los costos de cierre potenciales. La estimación de costos asociados con la rehabilitación física (es decir, nivelación y sembrado de áreas perturbadas) y el retiro de plantas procesadoras es una operación relativamente directa. La estimación de los costos de cierre para atacar problemas no anticipados referidos a la calidad del agua a largo plazo o el mantenimiento permanente en el lugar no es posible durante la planificación inicial del proyecto y debe ser contemplada durante la vida útil del proyecto.

Se requiere de una adecuada caracterización y comprensión de las condiciones del yacimiento para efectuar predicciones realistas sobre los costos de cierre. Durante la vida útil del proyecto se deberán efectuar actualizaciones periódicas de las estimaciones de costos de cierre.

Las Figuras 6.1A y B presentan la relación conceptual entre los costos y los gastos de cierre durante la vida de un proyecto minero. La Figura 6.1A presenta el costo de cierre total durante las cuatro etapas de un proyecto minero. Se presentan dos enfoques alternativos:

Cierre al Final del Proyecto: Todas las actividades de cierre son diferidas hasta el final de las labores mineras a fin de maximizar el valor actual de los recursos.

Recuperación Concurrente/Diseñada para el Cierre: El cierre y la rehabilitación ocurren durante la vida operativa de la instalación. Las actividades de cierre concurrentes son incorporadas en las prácticas operativas, con lo que se reduce el costo total del cierre y el potencial de implementación de medidas de remedio.

La Figura 6.1B presenta los gastos de cierre durante la vida útil del proyecto. Las actividades de cierre concurrentes tienden a aumentar los gastos durante la vida del proyecto mientras se disponga de ingresos. El cierre de fin del proyecto requiere de fuertes gastos en un momento en el que el proyecto ya no está generando ingresos.

2 Desarrollo de un Diseño Conceptual

Durante la planificación del proyecto debe desarrollarse un plan de cierre con el propósito de garantizar que los diseños operativos sean compatibles con los conceptos de cierre a largo plazo. Si bien los objetivos de cierre (es decir, protección de la salud humana y el medio ambiente) son considerados como fijos, el plan de cierre conceptual debe ser actualizado con revisiones al proyecto y nueva información sobre caracterización a medida que el proyecto se va desarrollando.

3 Estimación de Costos Específicos de cada Yacimiento

Los costos estimados de recuperación concurrentes y de cierre específicos para cada yacimiento deben estar incluidos en el plan de cierre. Los costos estimados deberán ser actualizados anualmente y reflejar el valor neto actual al momento de su preparación. El Cuadro 6.1 presenta un ejemplo de hoja de trabajo para preparar costos de cierre.

Debe calcularse el costo de los planes de cierre de proyecto que requieren de mantenimiento permanente después de la implementación de medidas de cierre a fin de que incluyan los costos de mantenimiento y reemplazo. Los ítems de mantenimiento perpetuo podrían incluir tratamiento activo o pasivo del agua, mantenimiento físico de vertederos o estructuras de derivación de aguas. Con frecuencia, el tratamiento permanente del agua u otras actividades de mantenimiento no se anticipan durante la planificación inicial de la mina y por ello no se incluyen en el plan económico de la misma. En caso de que identifiquen los requerimientos de mantenimiento perpetuo, estos deberán incorporarse en el plan económico global del proyecto tan pronto como sea factible a fin de asegurar que se reserven fondos suficientes para cubrir los gastos de mantenimiento postminado. Además, los costos del monitoreo ambiental después del cierre deben ser incluidos dentro de los costos de cierre estimados.