



PREDICTION
•
PREVENTION
•
MANAGEMENT

The International Network for Acid Prevention

Global Acid Rock Drainage Guide



Development of the Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide was sponsored by INAP with the support of the Global Alliance

Guía General de Drenaje Ácido de Rocas

Resumen

Introducción

Formación del Drenaje Ácido de Roca

Esquema de Manejo del Drenaje Ácido de Roca

Caracterización

Predicción

Prevención y Mitigación

Tratamiento del Drenaje Ácido de Roca

Monitoreo del Drenaje Ácido de Roca

Manejo del Drenaje Ácido de Roca y Evaluación del Desempeño

Comunicación y Retroalimentación del Drenaje Ácido de Roca

Resumen

Referencias

Resumen Ejecutivo

Introducción

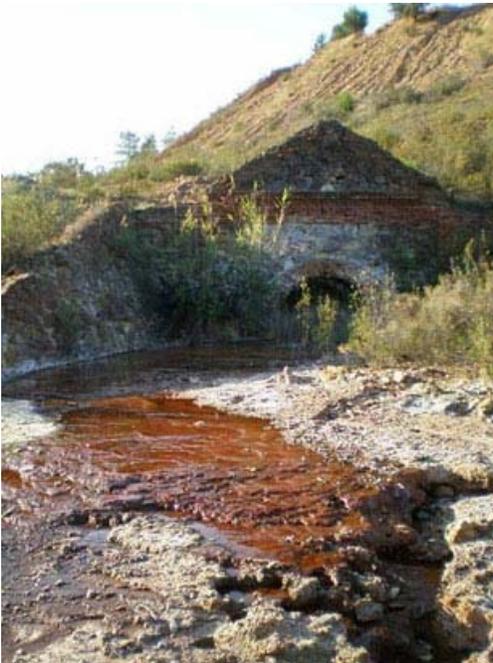


Figura 1: Tipos de Drenaje Producidos por Oxidación de Sulfuros

La Guía Global de Drenaje Ácido de Roca trata sobre la predicción, prevención y manejo del drenaje producido por la oxidación del mineral sulfurado, llamado comúnmente “drenaje ácido de roca” (ARD), “drenaje ácido de mina” o “drenaje metalífero y ácido” (AMD), “agua influenciada por minería” (MIW), “drenaje salino” (SD) y “drenaje neutro de mina” (NMD).

Este resumen ejecutivo sigue la estructura general de la Guía GARD completa, que es un resumen actualizado de las mejores prácticas y tecnologías, guía desarrollada bajo el auspicio de la Red Internacional para la Prevención (de la generación) de Ácido (International Network for Acid Prevention – INAP), como apoyo a operadores de mina, supervisores, comunidades y consultores que trabajan con ARD y que enfrentan desafíos relacionados con la oxidación de minerales sulfurados. Los lectores podrán utilizar la Guía GARD y sus referencias para detalles adicionales sobre los temas cubiertos en este Resumen Ejecutivo. La Guía GARD recibió aportes y ayuda de muchos individuos y organizaciones, cuyas contribuciones se agradecen ampliamente.

El drenaje ácido de roca se forma por la oxidación natural de sulfuros metálicos, expuestos al aire y al agua. Las actividades extractivas que involucran rocas con minerales sulfurados, tales como la minería de metales y la del carbón, aceleran el proceso. El drenaje resultante del proceso de oxidación acuosa, puede ser de pH neutro a ácido, con o sin metales pesados disueltos, pero siempre contiene sulfatos. El ARD resulta de una serie de reacciones y etapas que típicamente proceden de condiciones de pH casi neutras a más ácidas. Cuando existen suficientes minerales alcalinos como para neutralizar el ARD, del proceso de oxidación puede producir drenaje neutro o salino. El NMD presenta altas concentración de metales en solución, con pH en torno de la neutralidad, mientras que el SD tiene altos niveles de sulfatos, en pH neutro, sin concentraciones notables de metales disueltos. La Figura 1 presenta los diversos tipos de drenaje de manera esquemática.

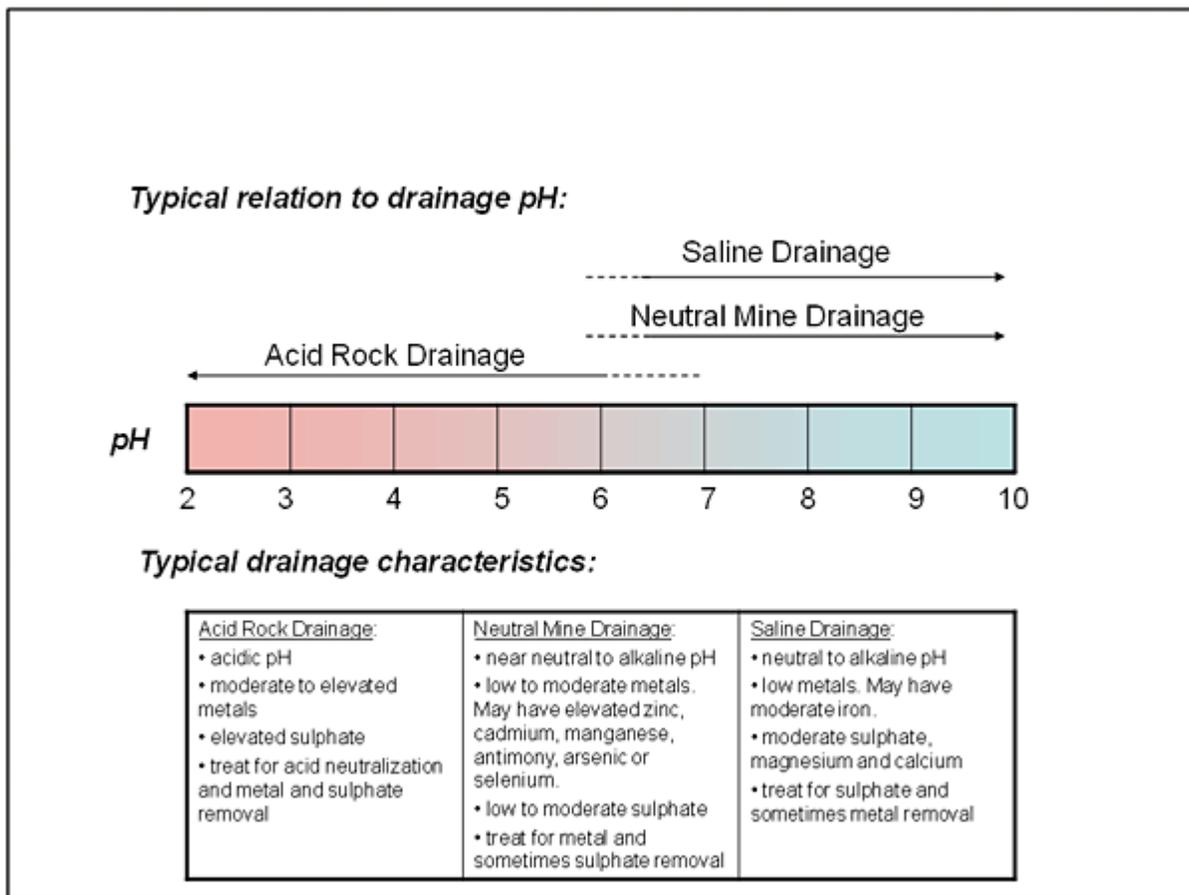


Figura 2: Portal Romano con Drenaje Ácido de Roca – España

Una vez iniciada la formación de ARD, detenerla será un desafío complejo y costoso, ya que este proceso continuará (y se puede acelerar) hasta que uno o dos de los reactivos (minerales sulfurados, oxígeno o agua) se agoten o se excluyan de la reacción. El proceso de formación de ARD puede continuar produciendo drenaje por décadas o siglos después que la minería haya cesado, tal como ocurre en el portal de España de la figura 2, que data de la época Romana.

El costo de remediación de ARD en minas abandonadas, sólo en Norte América, ha sido estimado en decenas de miles de millones de dólares americanos. Diversas minas podrían enfrentar responsabilidades, después del cierre de faenas, de decenas de cientos de millones de dólares por la remediación y tratamiento del ARD, si el proceso de oxidación de sulfuros no se manejó apropiadamente durante la vida de la mina.

La caracterización apropiada del yacimiento y explotación de la mina, la predicción de la calidad del drenaje y el manejo de los residuos de la mina pueden evitar la formación de ARD en la mayoría de los casos y minimizar la formación de ARD en todos los casos. La prevención del ARD debe comenzar en la exploración y continuar a lo largo del ciclo de vida de la mina. La planificación y gestión permanente del ARD es crítica para su exitosa prevención.

Muchas minas no producirán ARD, en virtud de las características geoquímicas inherentes de sus desechos o, a condiciones climáticas muy áridas. Además, las minas que han implementado el pronóstico bien fundamentado y/o, si procede, las medidas de prevención y programas de monitoreo, también deberán ser capaces de evitar problemas graves de ARD.

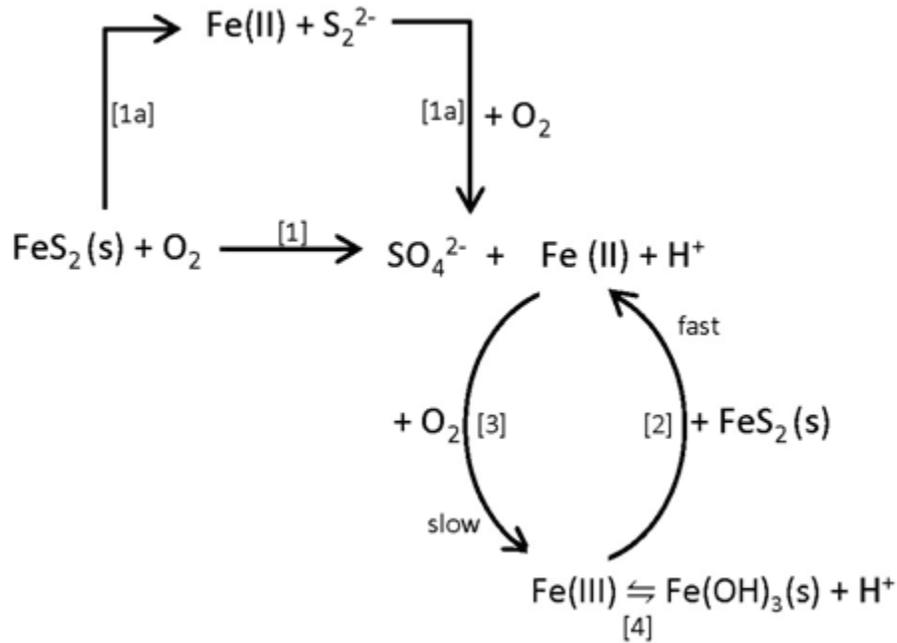
Una aproximación global a la gestión del ARD, reduce riesgos ambientales y costos posteriores para la industria minera y los gobiernos, reduce impactos ambientales adversos y promueve el apoyo público para la minería. El alcance y los elementos particulares de la propuesta de manejo de ARD que se deben implementar en una operación particular, variará en base a múltiples factores específicos del sitio, que no se limitan solamente al potencial de generación de ácido del proyecto.

Formación de Drenaje Ácido de Roca (ARD)

El proceso de oxidación de sulfuros y formación de ARD, NMD o SD es muy complejo e involucra una multitud de procesos químicos y biológicos que pueden variar significativamente con las condiciones ambientales, geológicas y climáticas (Nordstrom y Alpers, 1999). Los minerales sulfurados en los yacimientos se forman bajo condiciones reductoras, en ausencia de oxígeno. Expuestos al oxígeno atmosférico y agua (oxígeno disuelto), sea debido a la minería, al procesamiento del mineral, a la excavación u otros procesos de movimiento de tierras, los minerales sulfurados pueden volverse químicamente inestables y oxidarse. La Figura 3 presenta un modelo simplificado que describe la oxidación de la pirita, que es el mineral sulfurado responsable de la gran mayoría del ARD (Stumm y Morgan, 1981). Las reacciones mostradas son esquemáticas y pueden no presentar los mecanismos exactos, pero la ilustración es una ayuda visual, útil para entender la oxidación de sulfuros.

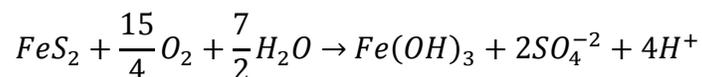
La reacción química que representa la oxidación de la pirita (reacción [1]) requiere tres ingredientes básicos: pirita, oxígeno y agua. Esta reacción puede ocurrir tanto abiótica como bióticamente (mediante microorganismos). En este último caso, bacterias como el *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que deriva su energía metabólica de la oxidación de hierro ferroso a hierro férrico, puede acelerar la velocidad de reacción en varios órdenes de magnitud, respecto a los índices abióticos (Nordstrom, 2003). Además de la oxidación directa, la pirita puede ser primero disuelta y luego oxidada (reacción [1a]).

Figura 3: Modelo para la Oxidación de Pirita (Stumm y Morgan, 1981).



En la mayoría de las circunstancias, el oxígeno atmosférico actúa como el oxidante de la pirita. Sin embargo, el hierro férrico acuoso puede oxidar pirita de acuerdo a la reacción [2]. Esta reacción es considerablemente más rápida (en 2 a 3 órdenes de magnitud) que la reacción con oxígeno y genera substancialmente más acidez por mol de pirita oxidada. Sin embargo, esta reacción depende de que existan las condiciones suficientes para que abunde el hierro férrico acuoso (i.e. condiciones ácidas, de pH bajo 4,5 unidades). La oxidación del hierro ferroso por oxígeno (reacción [3]) es necesaria para generar y reponer hierro férrico y se requieren condiciones ácidas para que éste último permanezca en la solución y participe en el proceso de producción del ARD. Como se muestra en esta reacción, se necesita oxígeno para generar hierro férrico desde hierro ferroso. También, las bacterias que pueden catalizar esta reacción (fundamentalmente miembros de la *Acidithiobacillus genus*) demandan oxígeno para la respiración aeróbica celular. Así, se necesita de alguna cantidad nominal de oxígeno para que este proceso sea efectivo, incluso cuando se catalice por bacterias, aunque los requerimientos de oxígeno son considerablemente menores que para la oxidación abiótica.

Un proceso de importancia ambiental relacionado con la generación del ARD, está relacionado con el destino último del hierro ferroso resultante de la reacción [1]. El hierro ferroso puede ser removido de la solución en condiciones desde ligeramente ácidas hasta alcalinas mediante oxidación y subsecuente hidrólisis y formación del relativamente insoluble hidróxido de hierro férrico (reacción [4]). Cuando las reacciones [1] y [4] se combinan, como generalmente es el caso cuando las condiciones no son ácidas (i.e. pH > 4.5), la oxidación de la pirita produce el doble de acidez que la reacción [1] de la siguiente manera:



que es la reacción global más comúnmente utilizada para describir la oxidación de pirita.

Aunque la pirita es por mucho, el sulfuro dominante responsable de la generación de acidez, diferentes depósitos de mineral contienen diferentes tipos de sulfuros. No todos los sulfuros generan acidez cuando se oxidan. Como regla general, los sulfuros de hierro (pirita, marcasita, pirrotina), sulfuros con proporción molar metal/sulfuro < 1 , y sulfosales (p.e. enargita) generan ácido cuando reaccionan con oxígeno y agua. Los sulfuros con proporción metal/sulfuro $= 1$ (p.e. esfalerita, galena, calcopirita) tienden a no producir acidez cuando el oxígeno es el oxidante. Sin embargo, si el oxidante es el hierro férrico, todos los sulfuros generan acidez. Por ello, el potencial de generación de ácido de un depósito de mineral o de un desecho de mina, generalmente depende de la cantidad de sulfuro de hierro presente.

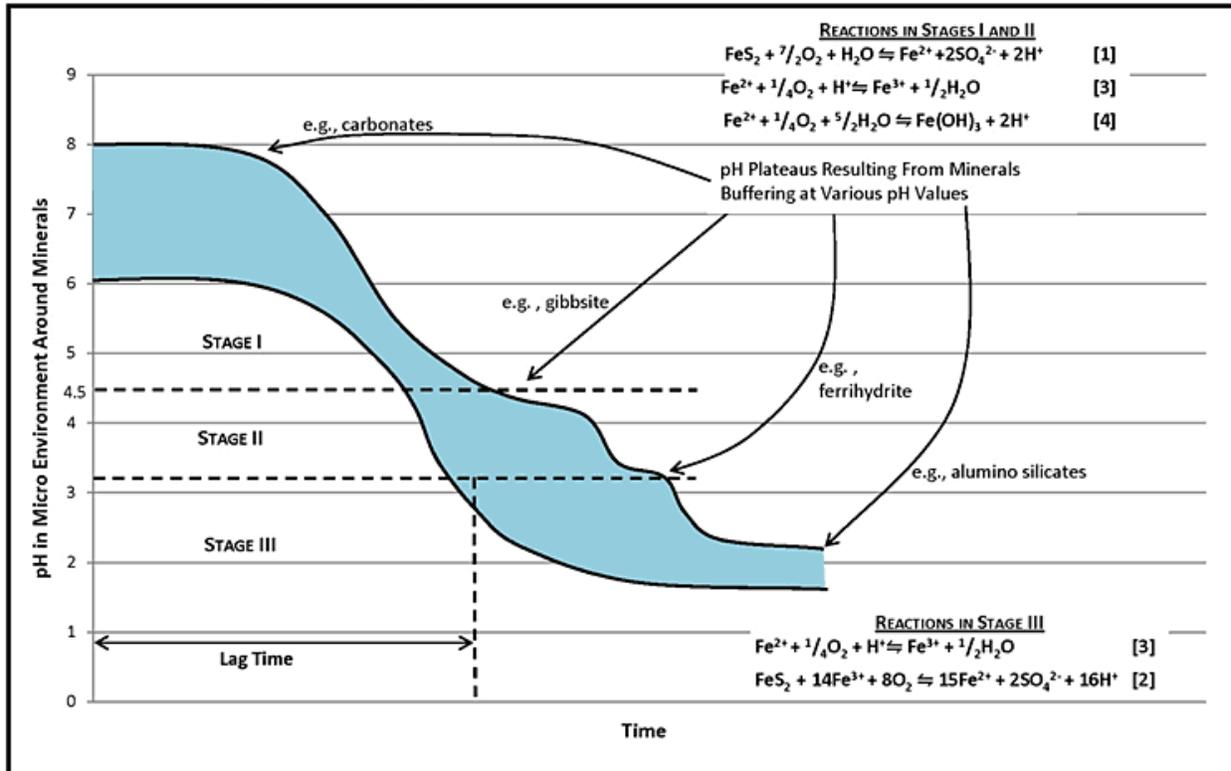
Las reacciones de neutralización también tienen un rol clave en la determinación de las características de composición del drenaje originado por la oxidación de sulfuros. En cuanto a los sulfuros, la reactividad, y en consecuencia la eficacia con que los minerales neutralizantes puedan neutralizar (efecto buffer o tampón) el ácido que esté siendo generado, puede variar mucho. La mayoría de los minerales de carbonato pueden disolverse rápidamente, haciéndolos efectivos consumidores de ácido. Sin embargo, la hidrólisis del Fe o Mn, disueltos tras la disolución de sus respectivos carbonatos, y su posterior precipitación como mineral secundario, puede generar acidez. Aunque los minerales de aluminosilicato suelen ser más comunes que las fases de carbonato, los primeros tienden a ser menos reactivos y su neutralización sólo puede tener éxito en estabilizar el pH cuando se logran condiciones más bien ácidas. Se ha sabido que los silicatos de calcio-magnesio estabilizan los efluentes de la mina a un pH neutro cuando la velocidad de oxidación de sulfuros era muy baja (Jambor, 2003).

La combinación de las reacciones de generación y neutralización de ácido típicamente conduce a un desarrollo en etapas del ARD (Figura 4). Con el paso del tiempo, el pH disminuye a lo largo de una serie de mesetas de pH, regidas por los efectos tampón de una serie de ensamblajes minerales. El tiempo de retardo de la generación de ácido es una consideración muy importante para la prevención del ARD. Es más efectivo (y generalmente tremendamente menos costoso a largo plazo) controlar la generación del ARD durante sus etapas tempranas. El retardo también permite ramificaciones importantes de la interpretación de los resultados de las pruebas. Como el retardo de la primera etapa de generación de ARD puede durar un largo tiempo, aún para materiales que eventualmente serán altamente generadores de ácido, es importante reconocer la etapa de oxidación para predecir el potencial de generación de ARD. Los primeros resultados de las pruebas geoquímicas, por lo tanto, podrían no ser representativos de la estabilidad ambiental a largo plazo ni de la correspondiente calidad de la descarga. Sin embargo, los primeros resultados de las pruebas proveen datos valiosos para evaluar condiciones futuras, como las tasas de consumo de los minerales neutralizantes disponibles.

Una consecuencia común de la oxidación de sulfuros es la lixiviación de metales (ML), de donde aparecen los acrónimos “ARD/ML” o “ML/ARD” para describir con más precisión la naturaleza de las descargas ácidas de mina. Los elementos mayores y los elementos traza en el ARD, NMD y SD se originan por la oxidación de sulfuros y la posterior disolución de los minerales consumidores de ácido. En el caso del ARD, el Fe y el Al son normalmente los principales metales mayores disueltos, aunque los metales traza como Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Co y Ni también pueden

lograr altas concentraciones. En las descargas de mina con un pH casi neutro, las concentraciones de metales traza tienden a ser menores, debido a la formación de fases minerales secundarias y una mayor absorción. Sin embargo, ciertos parámetros permanecen en la solución a medida que el pH aumenta, en particular los metaloides As, Se y Sb, así como otros metales traza (i.e.: Cd, Cr, Mn, Mo y Zn).

Figura 4: Etapas en la Formación del ARD (INAP, 2009)



Marco de referencia para la gestión del Drenaje Ácido de Roca

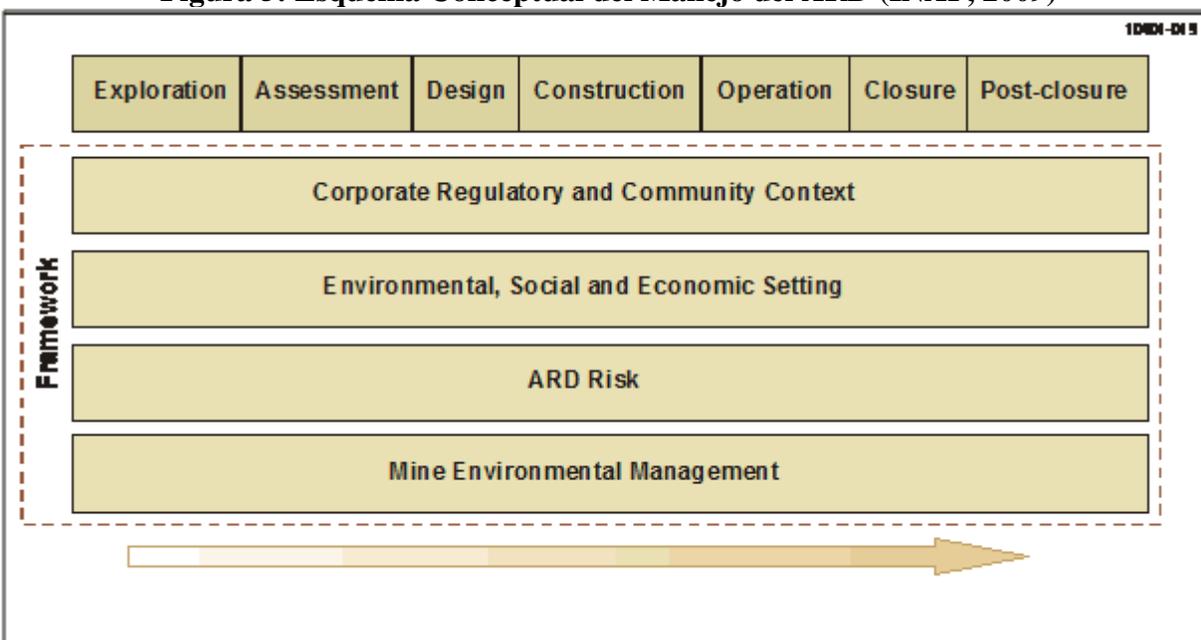
Los temas y conceptos sobre la prevención y gestión del ARD son los mismos en todo el mundo. Sin embargo, las técnicas específicas utilizadas para la predicción, interpretación de resultados de pruebas y la gestión del ARD pueden diferir dependiendo del contexto local, regional o nacional y se adaptan al clima, topografía y otras condiciones del sitio.

Por lo tanto, a pesar de la similitud del ARD, no existe un enfoque “a la medida de todos” para tratar la gestión del ARD. Cada mina es única y requiere una cuidadosa evaluación para encontrar una estrategia de manejo dentro del esquema corporativo, regulatorio y comunitario que aplique al proyecto en cuestión. El sitio de instalación incluye la situación social, económica y ambiental dentro de las cuales la mina está ubicada, mientras que el marco de referenciaincorpora las normas y estándares corporativos aplicables, así como las expectativas y requerimientos específicos de la comunidad. Este esquema aplica en todo el ciclo de vida de la mina y se ilustra conceptualmente en la Figura 5.

Todas las compañías mineras, sin importar el tamaño, necesitan cumplir con la legislación nacional y las regulaciones relativas al ARD de los países en los que operan. Se considera buena práctica empresarial, incorporar las orientaciones globales sobre ARD y en muchos casos, tal adopción es una condición para el financiamiento.

Muchas compañías mineras han establecido lineamientos empresariales claros, que representan el punto de vista de la compañía acerca de las prioridades e interpretaciones de qué se considera la mejor práctica relacionada al ARD. Es necesario tener cuidado y asegurarse de que se cumplan todas las especificaciones normativas del país, ya que los lineamientos corporativos del ARD no pueden sustituir las regulaciones del país.

Figura 5: Esquema Conceptual del Manejo del ARD (INAP, 2009)



Las compañías mineras operan limitadas y sujetas a una “licencia social” que, idealmente, se basa en un amplio consenso entre todas las partes interesadas. Este consenso tiende a cubrir una amplia gama de elementos sociales, económicos, ambientales y gubernamentales (desarrollo sostenible). El ARD juega un importante papel en esta “licencia social” de la mina, porque el ARD tiende a ser una de las consecuencias ambientales más visibles de la minería. La componente de costos de cierre y post-cierre de faenas, correspondiente al ARD es cada vez más reconocida como fundamental entre todos los costos de las operaciones mineras tanto propuestas como en operación. En muchos casos, se requiere alguna forma de garantía financiera para cubrir los costos de cierre y post cierre de faenas mineras.

Caracterización

La generación, liberación, transporte y atenuación del ARD son procesos complejos regidos por una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Que el ARD se convierta en una

preocupación ambiental, depende en gran medida de las características de las fuentes, rutas y receptores involucrados. La caracterización de estos aspectos es por lo tanto crucial para la predicción, prevención y gestión operativa del ARD. Los programas de caracterización ambiental están diseñados para recolectar suficiente información para responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Es probable que ocurra el ARD? ¿Qué tipo de drenaje se espera (ARD/NMD/SD)?
2. ¿Cuáles son las fuentes del ARD? ¿Cuánto ARD será generado y cuándo?
3. ¿Cuáles son las trayectorias más importantes que transportan los contaminantes al medio ambiente receptor?
4. ¿Cuáles son los impactos ambientales esperados de la liberación del ARD al medio ambiente?
5. ¿Qué se puede hacer para prevenir o mitigar/manejar el ARD?

Las características geológicas y minerales tanto del yacimiento como de la roca huésped son los principales elementos controlantes del tipo de drenaje que será generado como resultado de la minería. Posteriormente, el clima del lugar y las características hidrológicas/hidrogeológicas definen cómo el drenaje de mina y sus constituyentes son transportados a través del medio ambiente receptor hacia los receptores finales. Para evaluar estas cuestiones, se requiere del conocimiento de múltiples disciplinas, incluyendo: geología, mineralogía, hidrología, hidrogeología, geoquímica, (micro)biología, meteorología e ingeniería.

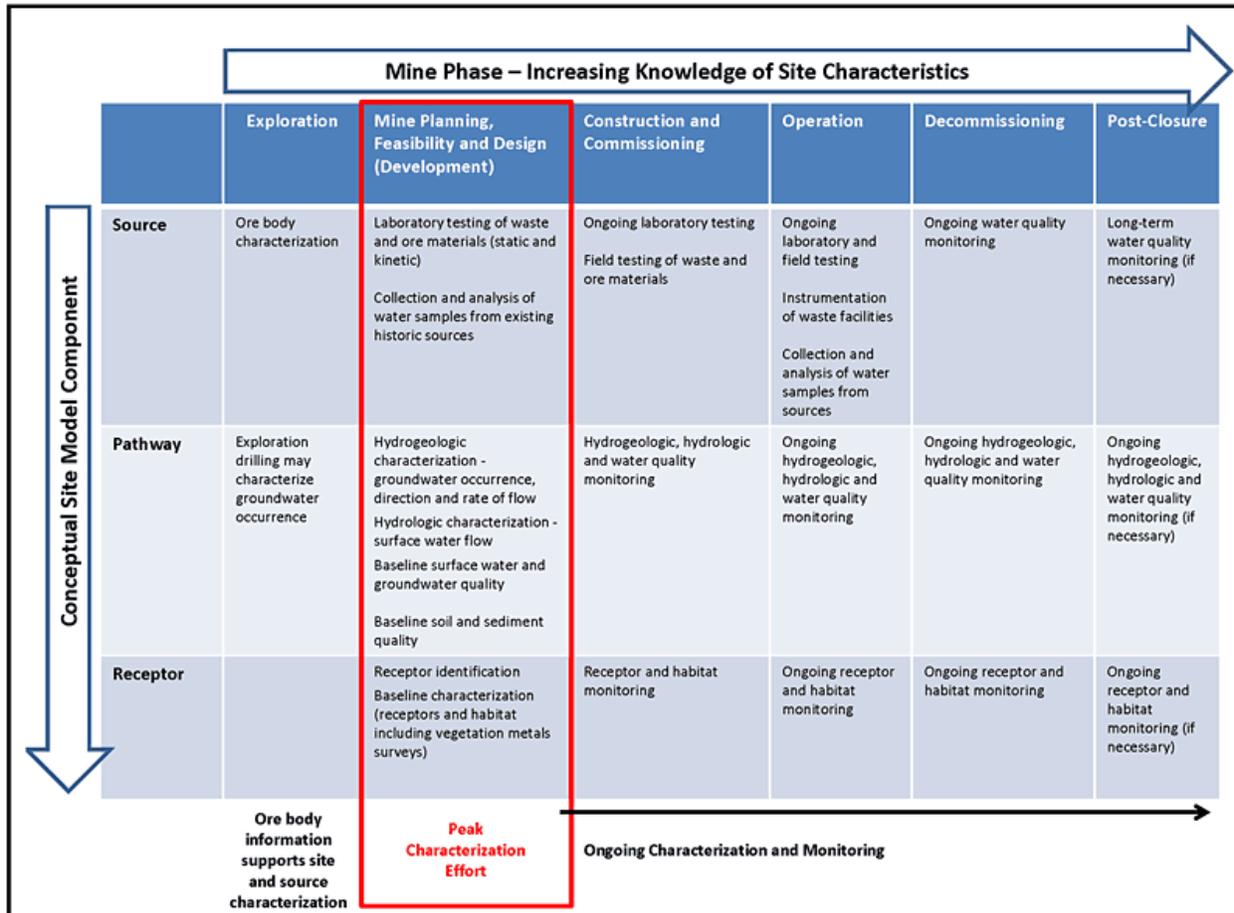
Las características geológicas de los depósitos minerales ejercen importantes y predecibles controles sobre la huella ambiental de las áreas mineralizadas (Plumlee, 1999). Por lo tanto, se deberá realizar una evaluación preliminar del potencial de generación de ARD, basada en la revisión de los datos geológicos recolectados durante la exploración. La caracterización base de las concentraciones de metales en varios medios ambientes (i.e.: agua, tierra, vegetación y biota) también pueden proveer una indicación del potencial de generación de ARD y sirve para documentar la eventualmente alta concentración de especies metálicas naturales. Durante el desarrollo y la operación de la mina, se refina la evaluación inicial del potencial a través de los datos de caracterización de la estabilidad ambiental de los materiales minerales y de desecho más detallados. La magnitud y la ubicación de las descargas de la mina al medio ambiente también se identifican durante el desarrollo de la mina. Se llevan a cabo investigaciones meteorológicas, hidrológicas e hidrogeológicas para caracterizar la cantidad y dirección del movimiento del agua dentro de la(s) vertiente(s) de la mina, para evaluar las trayectorias de transporte de los compuestos de connotación ambiental (CCA). Se identifican también los receptores biológicos potenciales dentro de los límites de las vertientes. Como consecuencia, durante la vida de la mina, el punto central del programa de caracterización del ARD evoluciona desde establecer las condiciones base, hasta predecir la liberación y transporte del drenaje, y luego monitorear las condiciones e impactos ambientales.

Pese a las diferencias inherentes entre minas en distintos sitios de instalación (p.e.: en base al metal producido, al clima, a la fase de desarrollo de la mina, al esquema regulador, etc.), el enfoque general para la caracterización del punto es similar:

- Definir la cantidad y calidad del drenaje potencialmente generado por diferentes fuentes

- Identificar trayectorias superficiales y subterráneas que transporten el drenaje, desde su origen al receptor
- Identificar receptores que puedan ser afectados por la exposición al drenaje
- Definir el riesgo de esta exposición

Figura 6: Vista General del Programa de Caracterización del ARD por Fases de la Minería (INAP, 2009)



Las Figuras 6 y 7 presentan la cronología de un programa de caracterización de un ARD e identifican las actividades de recolección de datos típicamente ejecutadas durante cada fase de la minería. El grueso de los trabajos de caracterización ocurre antes del trabajo de explotación minera, durante la planeación, evaluación y diseño (algunas veces llamada fase de desarrollo). Además, se identifican potenciales impactos ambientales y se incorporan medidas de prevención y mitigación apropiadas, con el propósito de minimizar los impactos ambientales. Durante las fases de puesta en marcha/construcción y operación, ocurre una transición desde la caracterización del sitio al monitoreo, el cual continúa a lo largo de las fases de clausura/cierre y post-cierre. El continuo monitoreo ayuda a refinar el entendimiento del sitio, lo cual permite ajustar las medidas de recuperación, dando como resultado costos de cierre reducidos y mejor manejo del riesgo.

Figura 7: Programa de Caracterización del ARD para Materiales de Fuente Individual por Fases de la Mina (INAP, 2009)

Mine Phase – Increasing Knowledge of Source Material Characterization							
	Exploration	Mine Planning, (Pre-) Feasibility and Design	Construction and Commissioning	Operation	Decommissioning	Post-Closure (Care and Maintenance)	
Waste or Facility Type – Potential ARD / NMD / SD Sources	Waste Rock	Drill core descriptions and assay data (petrology and mineralogy) Block model (quantity of ore and waste)	Laboratory testing of drill core samples – sample selection targets waste ⁽⁴⁾	Ongoing laboratory testing of drill core or development rock samples ⁽⁴⁾ Field leach testing (barrels, test pads)	Ongoing laboratory testing ⁽⁴⁾ Ongoing field leach testing Collection and analysis of runoff and seepage samples from waste rock facility	Collection and analysis of runoff and seepage samples from waste rock facility	Collection and analysis of runoff and seepage samples from waste rock facility (if necessary)
	Tailings	Review of any historical data	Laboratory testing of pilot plant tailings ⁽⁴⁾ Analysis of pilot testing supernatant.	Ongoing laboratory testing of pilot plant tailings ⁽⁴⁾	Ongoing laboratory testing of tailings discharge ⁽⁴⁾ Collection and analysis of supernatant and seepage samples from TSF	Collection and analysis of supernatant and seepage samples from TSF	Collection and analysis of supernatant and seepage samples from TSF (if necessary)
	Ore		Laboratory testing of drill core samples ⁽⁴⁾		Ongoing laboratory testing ⁽⁴⁾	If ore stockpiles exist, collection and analysis of runoff and seepage samples	
	Pit		Laboratory testing of drill core samples – sample selection targets pit walls ⁽⁴⁾		Field scale leach testing (e.g., wall washing) Collection and analysis of water samples (i.e., runoff, sumps)	Collection and analysis of pit water and pit inflow(s) water samples	Collection and analysis of pit water samples (if necessary)
	Underground Workings		Laboratory testing of drill core samples – sample selection targets mine walls ⁽⁴⁾		Collection and analysis of water samples (i.e., sumps, dewatering wells)	Collection and analysis of mine pool water samples	Collection and analysis of mine pool water samples (if necessary)

⁴ Typical laboratory testing components: particle size, whole rock analysis, mineralogy, ABA, static and kinetic leach testing.

Predicción

Uno de los objetivos principales de la caracterización del sitio, es la predicción del potencial de generación de ARD y de la química del drenaje. Ya que la predicción se encuentra directamente ligada a la planeación de la mina, en particular con respecto al manejo del agua y los desechos de mina, los trabajos de caracterización necesitan estar organizados en etapas congruentes con la planeación general del proyecto minero. La caracterización temprana tiende a ser genérica y generalmente evita establecer hipótesis de la futura mina, de su ingeniería ni del diseño, mientras que la caracterización y modelación posteriores deben ser consideradas e integradas con los detalles específicos del diseño y la ingeniería de la mina. La iteración puede ser requerida como evaluación del potencial de generación de ARD y puede resultar en la necesidad de una re-evaluación del plan general de la mina. La integración de los trabajos de caracterización y predicción dentro de la operación de la mina son elementos clave para el manejo exitoso del ARD.

La predicción rigurosa de las futuras descargas de la mina requiere comprender los procedimientos de muestreo, pruebas y análisis utilizados, la consideración de las futuras condiciones físicas y geoquímicas y la identidad, ubicación y reactividad de los minerales contribuyentes. Todas las minas son únicas, debido a la geología, geoquímica, clima, materia prima, método de procesamiento, regulaciones y actores involucrados. Los programas de predicción por lo tanto,

deben ser elaborados a la medida de cada mina. También, los objetivos de un programa de predicción pueden ser variables. Por ejemplo, pueden incluir la definición de los requerimientos de tratamiento de aguas, la selección de los métodos de mitigación, la evaluación de impacto de la calidad del agua, o la determinación de los costos estimados para la etapa de cierre de faenas.

Las predicciones de la calidad del drenaje son tanto cualitativas como cuantitativas. Las cualitativas se enfocan en identificar dónde se pudieran desarrollar condiciones ácidas en los descartes de la mina, con la correspondiente liberación de metales y acidez al drenaje. Cuando se detecta, cualitativamente, una probabilidad de generación de ARD, se revisan las alternativas para evitar el ARD y el programa de predicción se incorpora al diseño y evaluación de estas alternativas.

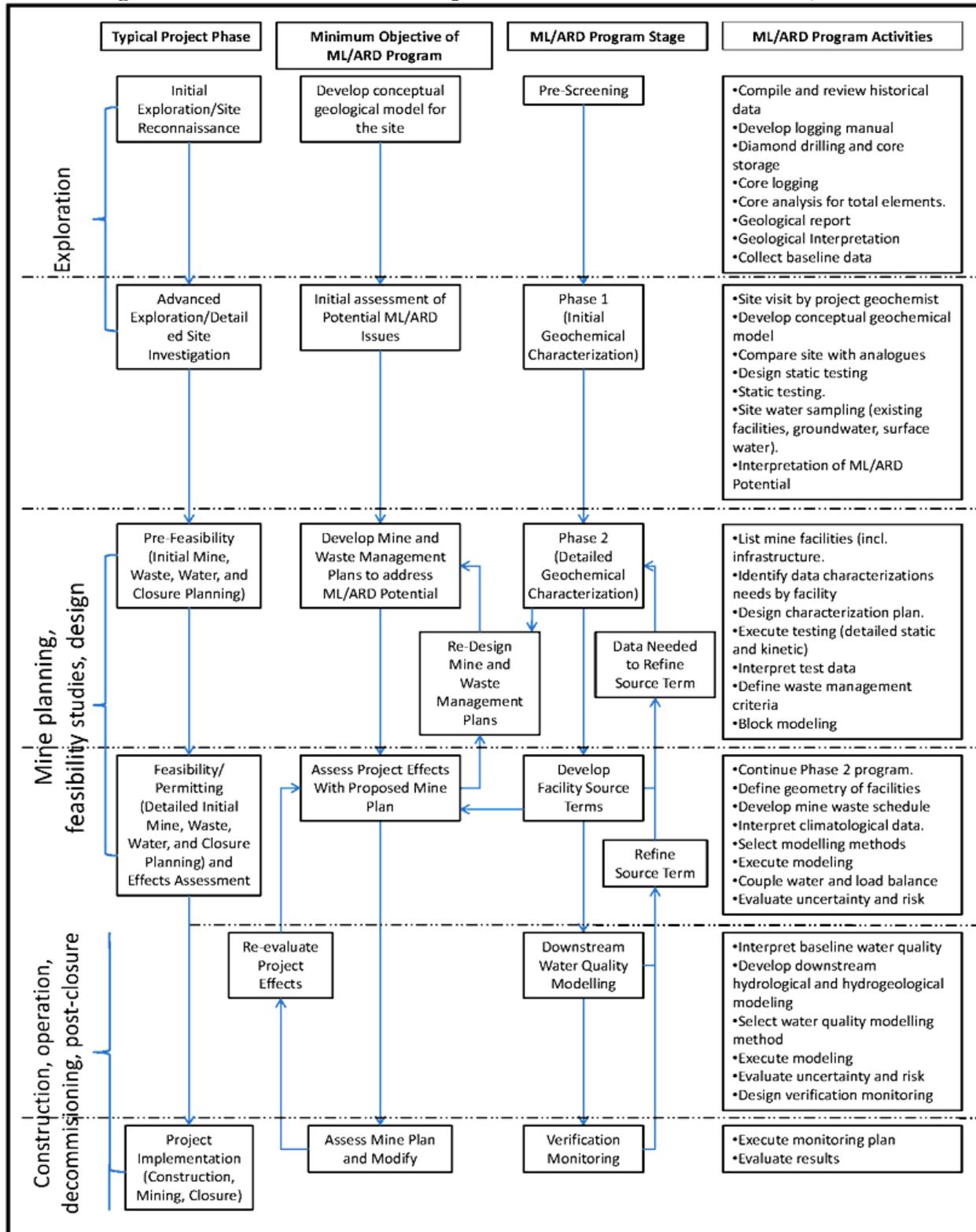
Durante las últimas décadas, se han realizado avances significativos en la comprensión del proceso de generación de ARD, con avances paralelos en la predicción de la calidad de agua de mina y el uso de técnicas de prevención. Sin embargo, la predicción cuantitativa de la calidad de agua de mina puede ser un difícil desafío, debido a la multitud de reacciones involucradas y los periodos -potencialmente largos- en los que se desarrollan dichas reacciones. A pesar de estas incertidumbres, la predicción cuantitativa desarrollada usando suposiciones realistas (en tanto se reconozcan las limitaciones relacionadas), han probado ser de gran valor para la identificación de las opciones de manejo del ARD y la evaluación de los potenciales impactos ambientales.

La predicción de la calidad del agua efluente de la mina generalmente está basada en una o más de los siguientes:

- Probar la condición de lixiviación de los desechos en el laboratorio
- Probar la condición de lixiviación de los desechos bajo condiciones de campo
- Caracterización geológica, hidrológica, química y mineral de los desechos
- Modelación geoquímica
- otras

El análisis de sitios similares (por analogía) sean estos históricos o en operación, es también valioso en la predicción del ARD, especialmente aquellos que han sido minuciosamente caracterizados y monitoreados. El desarrollo de modelos geo-ambientales es uno de los ejemplos más prominentes de la metodología “análoga”. Los modelos geo-ambientales son modelos que interpretan las características ambientales de un yacimiento en un contexto geológico y proporcionan una manera muy útil de interpretar y resumir la huella ambiental de la explotación minera y de los yacimientos en un contexto geológico sistemático, que puede ser aplicado para anticipar los problemas ecológicos potenciales tanto en minas futuras, como operantes y en sitios fuera de operación (Plumlee et al., 1999). Un enfoque general para la predicción de ARD se ilustra en la Figura 8.

Figura 8: Vista General del Enfoque de Predicción del ARD (INAP, 2009)



Prevención y Mitigación

El principio fundamental de la prevención del ARD es la planeación y diseño para prevenir, inhibir, retardar o detener los procesos hidrológicos, químicos, físicos o microbiológicos que impactan los recursos de agua. La prevención deberá ocurrir en, o tan cercano como posible, al punto donde el deterioro de la calidad del agua se origine (p.e.: reducción en la fuente), o a través de la implementación de medidas para prevenir o retardar el transporte del ARD al agua del ecosistema receptor (p.e.: reciclar, tratamiento y/o disposición segura). Este principio es universalmente aplicable, pero los métodos de implementación son específicos a cada sitio.

La prevención es una estrategia proactiva que evita el enfoque reactivo para la mitigación. Para el caso de un ARD existente, que impacta de manera adversa al medio ambiente, la mitigación será regularmente el curso inicial de acción. Además de esta acción inicial, se establecen medidas preventivas para reducir futuras cargas contaminantes y así evitar la necesidad de medidas de mitigación de emergencia. La integración de los trabajos de prevención y mitigación en la operación de la mina es un elemento clave para el manejo exitoso del ARD.

Antes de poder identificar o evaluar las medidas de prevención y/o mitigación, se deben identificar los objetivos estratégicos. El proceso debe considerar la evaluación de:

- Los riesgos cuantificables para los sistemas ecológicos, la salud humana y para otros receptores
- Criterios específicos de la calidad del efluente del sitio
- Los costos de inversión, de operación y de mantenimiento de las medidas preventivas y de mitigación
- La logística de las operaciones y de mantenimiento a largo plazo
- Longevidad requerida de las obras y predicción de fallas esperadas del sistema.

El objetivo típico del control del ARD es satisfacer los criterios ambientales usando la técnica más rentable. La selección de tecnología deberá considerar las predicciones para la química del agua de descarga, ventajas y desventajas de las opciones de tratamiento, riesgo para los cauces receptores y el contexto normativo de las descargas de las minas.

El criterio base del diseño de la prevención y la mitigación es el análisis de riesgo. Este enfoque se aplica a lo largo del ciclo de vida de la mina, pero fundamentalmente en la evaluación y en las fases del diseño. El proceso basado en riesgos debe cuantificar los impactos de largo plazo de las alternativas y usar este conocimiento para seleccionar la opción que tenga la combinación más deseable de atributos (p.e.: protección, aceptación regulatoria, aprobación de la comunidad, costo). Las medidas de mitigación implementadas como parte de una estrategia de control efectiva, serán aquellas que requieren la menor intervención, tanto operativa como administrativa.

La Prevención es la clave para evitar una costosa Mitigación. El objetivo principal es aplicar métodos que minimicen la velocidad de reacción de los sulfuros, la lixiviación de metales y la subsecuente migración de los productos que resulten de la oxidación de sulfuros. Tales métodos involucran:

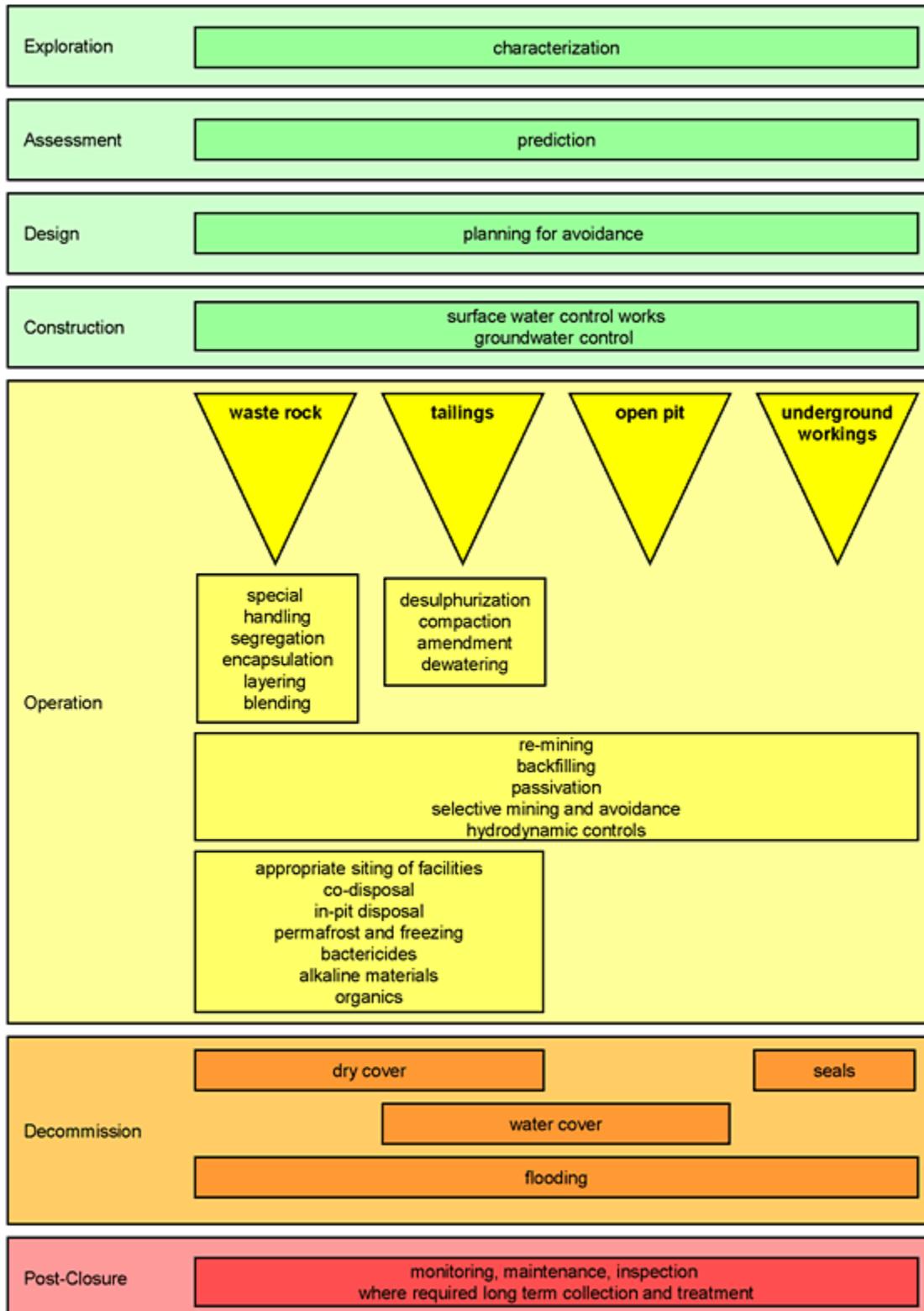
- Minimizar el aporte de oxígeno disuelto
- Minimizar la infiltración de agua y la lixiviación
- Minimizar, remover o aislar los minerales sulfurados
- Controlar el pH de la solución de agua de los poros
- Evitar la actividad bacteriana y los procesos bio-geoquímicos

Factores que influyen en la selección de los métodos anteriores incluyen:

- La geoquímica de la materia prima (el yacimiento) y el potencial de ese material para producir ARD
- Tipo y características del sistema reaccionante, incluyendo el flujo de agua y la transferencia gas/líquido del oxígeno
- Etapa de desarrollo de la mina (se presentan más opciones en etapas tempranas)
- Fase de oxidación (se presentan más opciones en etapas tempranas cuando pH está todavía cercano a neutro y los productos oxidados no se han acumulado significativamente)
- Duración de la medida de control para que sea efectiva
- Condiciones del lugar (p.e.: ubicación, topografía y huecos de mina disponibles, clima, geología, hidrología e hidrogeología, disponibilidad de materiales y vegetación)
- Criterios de calidad del agua para descarga de efluentes
- Aceptación de los riesgos por parte de la compañía y otras partes interesadas

Se puede requerir una combinación de medidas para lograr el objetivo deseado y las medidas pueden ser distintas a lo largo del tiempo. La Figura 9 provee una vista general de las medidas de prevención y mitigación de ARD más comunes disponibles durante las diferentes etapas del ciclo de vida de la mina.

Figura 9: Vista General de las Medidas de Prevención y Mitigación del ARD (INAP, 2009)



Tratamiento del Drenaje Ácido de Roca

La minería sustentable requiere, entre otros, la mitigación, el manejo y el control de los impactos de la minería en el medio ambiente. Los impactos de la minería sobre los recursos de agua pueden ser a corto y a largo plazo y persistir en la situación post-cierre. El tratamiento del drenaje de mina puede ser un componente más del manejo general de las aguas de mina, para apoyar a la operación de la mina en su vida entera. Los objetivos del tratamiento del drenaje de mina son variados. La recuperación y el re-uso del agua de mina dentro de las mismas operaciones mineras suele ser conveniente (especialmente en zonas desérticas) o requerido para el procesamiento de minerales, transporte de materiales, uso operativo (suspensión de polvo, sistemas de enfriamiento, irrigación de terrenos rehabilitados), etc. El tratamiento del drenaje de mina, en tal caso, está dirigido a modificar la calidad del agua para que sea adecuada para el uso pretendido dentro o fuera del sitio de la mina.

Otro objetivo del tratamiento de agua de mina es la protección de la salud humana y del sistema ecológico en casos en donde la gente o los receptores ecológicos puedan estar en contacto con el agua de la mina impactada a través del uso directo o indirecto. El drenaje de mina puede actuar como medio de transporte para una gama de contaminantes, los cuales pueden impactar los recursos de agua dentro y fuera del sitio. El tratamiento de agua removería los contaminantes contenidos en el drenaje de mina para prevenir o mitigar los impactos ambientales.

En la gran mayoría de las jurisdicciones, cualquier descarga de drenaje de mina a una corriente pública o acuífero, debe ser aprobada por las autoridades reguladoras correspondientes, en tanto los requerimientos reguladores estipulen una cierta calidad de descarga de agua de mina o cargas contaminadas de descargas relacionadas. Aunque los estándares de calidad para la descarga probablemente no estén disponibles para algunos países con minería en desarrollo, generalmente se aplican los estándares ambientales internacionalmente aceptados también conforme a lo estipulado por los financistas del proyecto y en las políticas de la compañía. El enfoque para seleccionar un método para el tratamiento del drenaje de mina se basa en una comprensión a fondo tanto del sistema como de los circuitos de agua de la mina y en los objetivos específicos que se deban lograr. El enfoque adoptado para el tratamiento de drenaje de mina será influenciado por un número de consideraciones.

Previo a la selección del proceso de tratamiento, se deberá preparar un claro y entendible comunicado con los objetivos del tratamiento. El tratamiento de drenaje de mina deberá ser siempre evaluado e implementado dentro del contexto del sistema integrado de agua de mina. El tratamiento tendrá un impacto en el flujo y el perfil de calidad en el sistema de agua; por ello, un sistema de tratamiento se selecciona en base al flujo de agua de la mina, calidad del agua, costo y uso(s) final(es) del agua.

La caracterización del drenaje de mina, en términos de flujo y características químicas, deberá incluir las debidas consideraciones de los cambios de temporada y climáticos. Los datos de flujo son especialmente importantes ya que esta información se requiere para evaluar apropiadamente cualquier sistema de tratamiento. De particular importancia son los eventos de precipitación extrema y los deshielos de nevadas que requieren adecuar el tamaño de las pilas de recolección y la tubería y diques asociados. Las principales propiedades químicas del drenaje de mina se refieren

a la acidez/alcalinidad, contenido de sulfuros totales, salinidad, contenido de metal y la presencia de compuestos específicos asociados con operaciones mineras específicas tales como cianuro, amoníaco, nitrato, arsénico, selenio, molibdeno y radionucleidos. También hay un número de constituyentes de drenaje de mina (por ejemplo, dureza, sulfato, sílice) que no son motivo de preocupación ambiental o regulatoria en todas las jurisdicciones, pero eso pudiera afectar la selección de la tecnología del tratamiento de agua preferido. El manejo y la eliminación de los desechos de la planta de tratamiento y los residuos como lodos y salmueras y sus características químicas, también deben ser factores importantes en la toma de decisión de cualquier tratamiento.

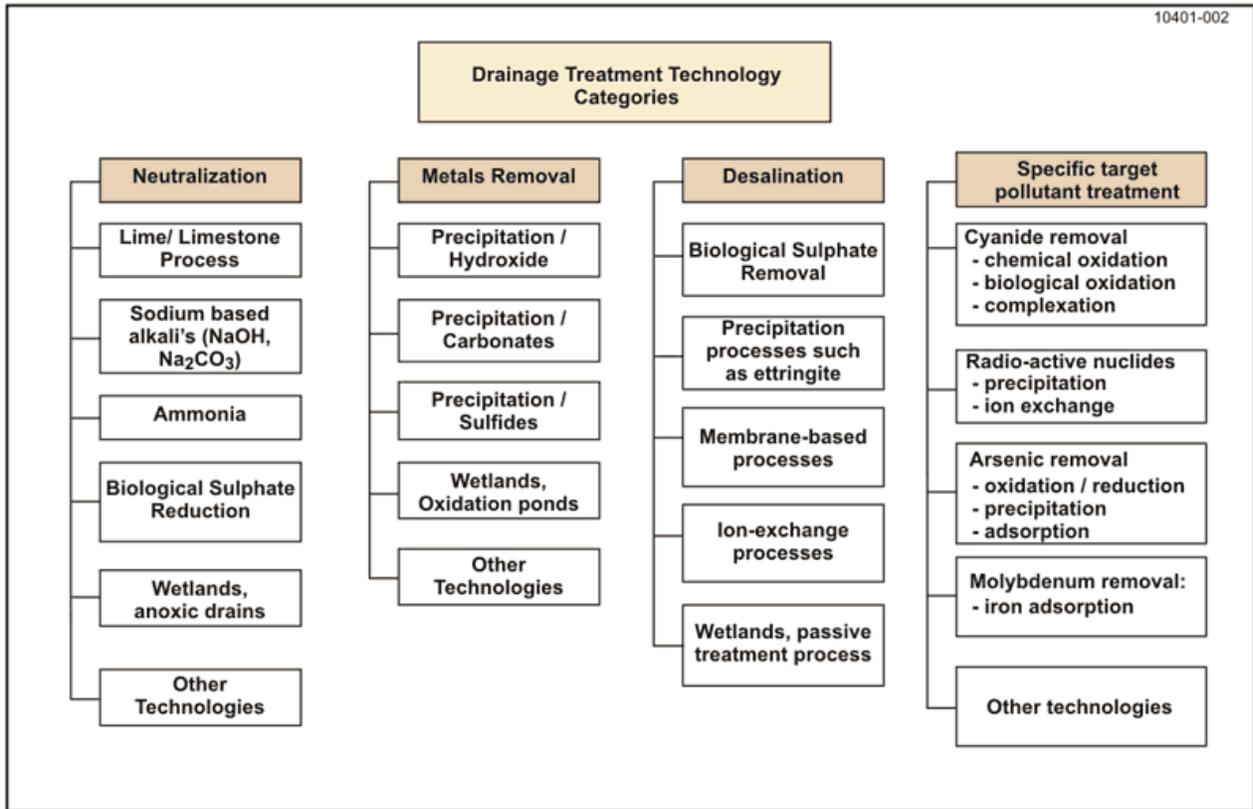
Una planta de tratamiento para drenaje de mina debe tener la flexibilidad para enfrentar el aumento o disminución de flujos de agua, calidad de agua cambiante y los requerimientos regulatorios durante la vida de la mina. Esto puede significar la implementación por fases y un diseño y construcción modular. Además, la fase de post-cierre puede implicar restricciones específicas en el mantenimiento y operación continua de una planta de tratamiento.

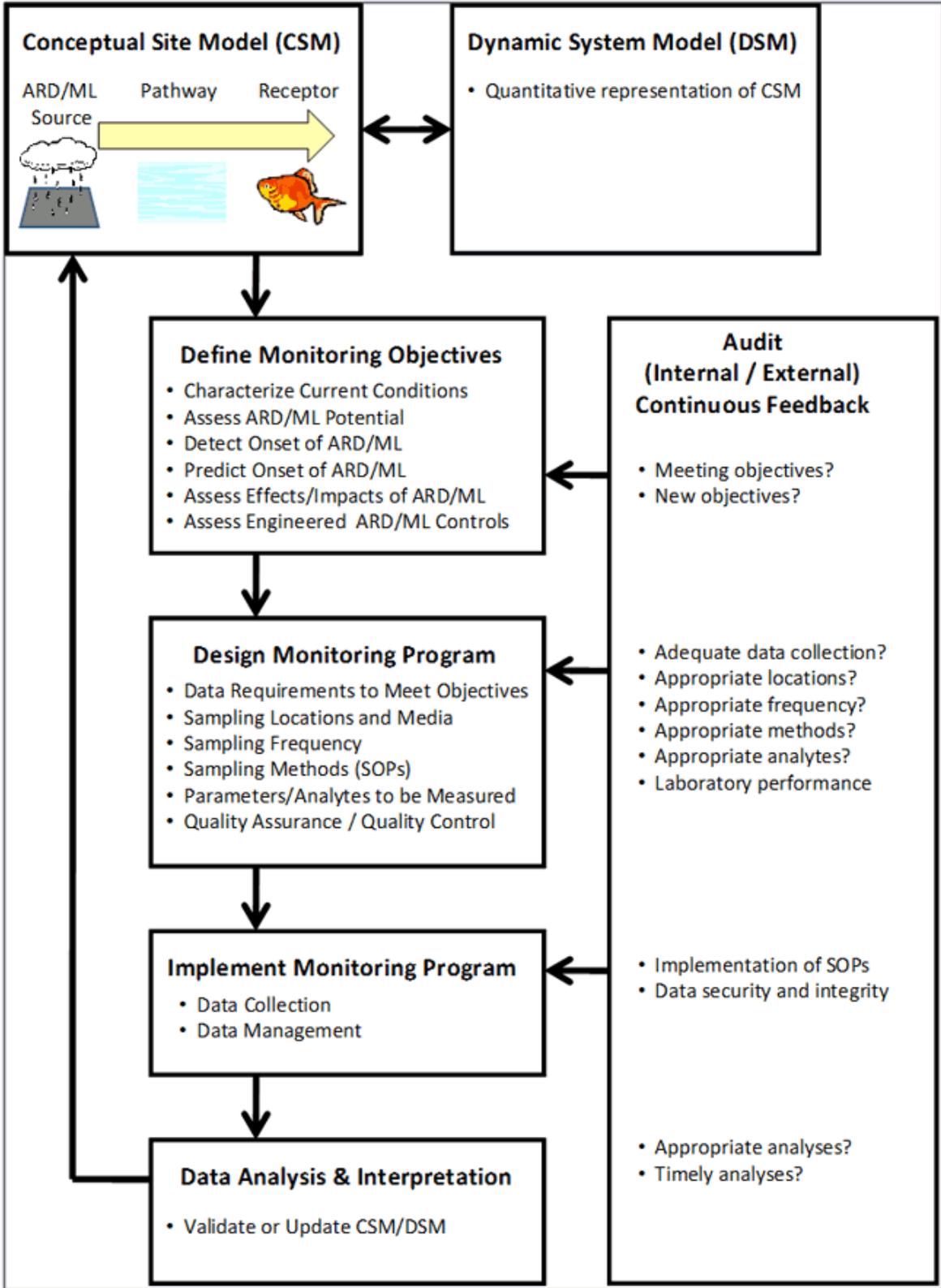
Entre las consideraciones prácticas relacionadas con las características del sitio de la mina que influenciarán la construcción, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de drenaje de roca son las siguientes:

- Diseño de la mina y topografía
- Espacio
- Clima
- Fuentes de drenaje de mina que alimentan la planta de tratamiento
- Ubicación y usos del agua tratada

Una gama genérica de las alternativas de tratamiento del ARD se presenta en la Figura 10.

Figura 10: Vista General de las Alternativas de Tratamiento del ARD (INAP, 2009)





Monitoreo del Drenaje Ácido de Roca

El monitoreo es el proceso rutinario, sistemático y riguroso que deliberadamente recaba información para usar en la gestión y toma de decisiones. El monitoreo en el sitio de la mina tiene como objetivo identificar y caracterizar cualquier cambio ambiental proveniente de las actividades de mina para evaluar las condiciones en el sitio y los posibles impactos para los receptores. El monitoreo consiste de observación (p.e.: registrar información acerca del medio ambiente) e investigación (p.e.: pruebas de toxicidad en donde las condiciones ambientales estén controladas). El monitoreo es de suma importancia en la toma de decisiones relacionadas con el manejo del ARD, por ejemplo a través de la evaluación de la efectividad de las medidas de mitigación y la subsecuente implementación de ajustes a las medidas de mitigación, según se requiera.

El desarrollo de un programa de monitoreo del ARD se inicia con la revisión del plano de la mina, la ubicación geográfica y la fisiografía. El plano de la mina proporciona información de la ubicación y la magnitud de alteraciones de la superficie y el subsuelo, el procesamiento del mineral y los procedimientos de molienda, las áreas de disposición de desechos, los lugares de descarga de efluentes, las extracciones de agua subterránea y las desviaciones del agua superficial. Esta información es utilizada para identificar las fuentes potenciales del ARD, los posibles trayectos y rutas para descargar el ARD al ambiente receptor y los receptores que pudieran ser impactados por estas descargas, así como la localización de instalaciones de mitigación que se pudieran requerir. Ya que la extensión especial de un programa de monitoreo debe incluir todos estos componentes, frecuentemente se requiere de una evaluación de la cuenca para el monitoreo del ARD (incluyendo el agua subterránea). El monitoreo se lleva a cabo en todas las etapas del desarrollo del proyecto, desde la prospección hasta el post-cierre. Sin embargo, en la vida de la mina, los objetivos, componentes e intensidad de las actividades de monitoreo cambiarán. El desarrollo y los componentes de un programa de monitoreo genérico del ARD se presentan en la Figura 11.

Manejo del Drenaje Ácido de Roca y Evaluación de Desempeño

El manejo del ARD y la evaluación del desempeño de tal manejo se describen usualmente dentro del plan de manejo ambiental del sitio o en un plan de manejo del ARD específico del sitio. El plan de manejo del ARD representa la integración de los conceptos y las tecnologías descritas con anterioridad en este capítulo. También hace referencia a los procesos de diseño de ingeniería y a los sistemas de manejo operativos empleados por las compañías mineras.

La necesidad de un plan formal de manejo de ARD usualmente se base en los resultados de un programa de predicción y caracterización del ARD y/o en los resultados de monitoreo del sitio. El desarrollo, evaluación y mejora continua de un plan de manejo de ARD es una acción continua a lo largo de la vida de una mina. El desarrollo, implementación y evaluación del plan de manejo del ARD usualmente seguirá la secuencia de pasos ilustrados en la Figura 12.

La figura 12 propone que el desarrollo de un plan de manejo de un ARD se inicia con el establecimiento de metas y objetivos claros. Éstos pudieran incluir la prevención del ARD o lograr el cumplimiento de criterios específicos de la calidad del agua. Esto incluye la consideración de un planteamiento bio-físico, registro regulador y legal, requerimientos corporativos y de la comunidad, así como consideraciones financieras. Los programas de caracterización y predicción

identifican la magnitud potencial del ARD y proveen las bases para la selección y diseño de las tecnologías apropiadas de prevención y mitigación del ARD. El proceso de diseño incluye una serie iterativa de pasos en los que la tecnología de control del ARD es evaluada y luego combinada en un sistema robusto de gestión y control (i.e.: el plan de manejo del ARD) para el sitio específico. El diseño inicial de la mina se puede utilizar para desarrollar el plan de manejo del ARD necesario para la evaluación ambiental. (EA). El diseño final se desarrolla usualmente en paralelo con los permisos del proyecto.

El plan de gestión del ARD identifica los materiales y los desechos que requieren un manejo especial. El plan incluye la evaluación y manejo de riesgos para refinar la estrategia y los pasos de implementación del plan. Para ser efectivo, el plan de gestión de ARD debe estar completamente integrado con el plan de la mina. Los controles operacionales tales como los procedimientos operativos estándar (SOPs), los indicadores de desempeño principales (KPIs) y los programas de aseguramiento y control de calidad (QA/QC) se establecen para guiar su implementación. El plan de manejo del ARD identifica los roles y responsabilidades para el personal operacional de la mina. Se incluyen el manejo de datos, análisis y esquemas de reportes para dar un seguimiento al progreso del plan.

En el siguiente paso, se lleva a cabo el monitoreo para comparar el desempeño real contra las metas y objetivos de diseño del plan de gestión. Las hipótesis (suposiciones) adoptadas en los programas de predicción y caracterización y en el diseño de las medidas de prevención/mitigación son probadas y modificadas o validadas. Los “aprendizajes” del monitoreo y la evaluación son revisados e incorporados en el plan como parte de una mejora continua. Se revisa la rendición de cuentas (informe de actividades) para asegurar que los responsables cumplan con los requerimientos estipulados en el plan. Se deberán implementar revisiones internas y externas o auditorías para medir el desempeño del personal, los sistemas de manejo y los componentes técnicos para proporcionar perspectivas adicionales en la implementación del plan de gestión del ARD. Es necesaria una revisión del sitio y de la administración corporativa de la planta entera para asegurar que el plan continúe apegado a las normas corporativas y del sitio. En esta etapa, se pueden realizar evaluaciones adicionales de riesgo y manejo para evaluar los efectos de condiciones cambiantes o desviaciones en el plan. Finalmente, se evalúan los resultados contra las metas. Si se cumplen los objetivos, la evaluación del desempeño y el monitoreo continúa a lo largo de la vida de la mina con revisiones periódicas contra las metas. Si los objetivos no se cumplen, entonces se requiere del re-diseño y la re-evaluación del plan de manejo y de los sistemas de evaluación del desempeño y monitoreo para la prevención/mitigación del ARD. Este trabajo adicional también podría requerir de caracterización y predicción de ARD adicionales.

El proceso descrito en la Figura 12 resulta en una mejora continua del plan de gestión del ARD y su implementación, e incorpora posibles modificaciones en el plan de la mina. Si el plan inicial de manejo del ARD es sólido, puede ser más adaptable a los cambios en el plan de la mina.

Implementar el plan de manejo del ARD depende de una jerarquía de herramientas de manejo. Las políticas corporativas ayudan a definir los estándares corporativos o del sitio, los cuales conducen a SOPs y KPIs que son específicos para el sitio y son guía para los operadores al implementar el plan de manejo del ARD. Cuando no existan políticas ni estándares corporativos, los proyectos y operaciones deberán basarse en las mejores prácticas del sector.

Comunicación y Retroalimentación del Drenaje Ácido de Roca

El nivel de conocimiento de generación y mitigación del ARD se ha incrementado dramáticamente en las últimas décadas dentro de la industria minera, la academia y las agencias reguladoras. Sin embargo, con el propósito de que este conocimiento sea significativo para un amplio rango de interesados generalmente involucrados en un proyecto minero, se debe traducir a un formato que sea fácilmente entendible. Esta retroalimentación deberá comunicar las predicciones de la futura calidad de drenaje y la efectividad de los planes de mitigación, su grado de seguridad y las medidas de contingencia para tratar la incertidumbre de los actores involucrados en los proyectos mineros. Un diálogo abierto sobre lo que se conoce y lo que se puede predecir con los distintos niveles de confianza, ayuda a construir la comprensión y la confianza y esto resulta a la larga, en un mejor plan de manejo del ARD.

La comunicación y la retroalimentación con las partes interesadas respecto al ARD son esenciales para la “licencia social” de la compañía para operar. Debido a la generalmente alta visibilidad del ARD, se necesitan medidas especiales y personal especializado para comunicarse con efectividad y se requiere, además, del involucramiento de representantes de todas las disciplinas técnicas relevantes en una compañía minera.

Resumen

El drenaje ácido de roca es uno de los más serios problemas ambientales que enfrenta la industria minera. Una evaluación exhaustiva del potencial de generación de ARD se debe conducir desde el inicio del trabajo en el proyecto minero y continuarla a lo largo de la vida de la mina. Para la consistencia con los principios de sustentabilidad, las estrategias para tratar con el ARD deben privilegiar la prevención o minimización, por sobre el control o tratamiento. Estas estrategias deben formularse dentro del plan de gestión del ARD, para ser desarrolladas en las fases tempranas del proyecto, junto con los requerimientos de monitoreo para evaluar el desempeño. La integración del plan de gestión operacional del ARD con el plan de operación de la mina es de suma importancia para el éxito de la prevención del ARD. Las principales prácticas para el manejo del ARD siguen evolucionando, pero tienden a ser específicas a la localización y requieren expertos en el tema.

Referencias

- International Network for Acid Prevention (INAP), 2009. The Global Acid Rock Drainage Guide. <http://www.gardguide.com/>
- Jambor, J.L. 2003. Mine-Waste Mineralogy and Mineralogical Perspectives of Acid-Base Accounting. In: Environmental Aspects of Mine Wastes (Eds.: Jambor, J.L., D.W. Blowes, and A.I.M. Ritchie). Short Course Series Volume 31. Mineralogical Association of Canada.
- Nordstrom, D.K. 2003. Effects of Microbiological and Geochemical Interactions in Mine Drainage. In: Environmental Aspects of Mine Wastes (Eds. Jambor, J.L., D.W. Blowes, and A.I.M. Ritchie). Short Course Series Volume 31. Mineralogical Association of Canada.
- Nordstrom, D.K., and Alpers, C.N. 1999. Geochemistry of Acid Mine Waters. In: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues (Eds.: Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon). Reviews in Economic Geology Vol 6A. Society of Economic Geologists, Inc.
- Plumlee, G.S. 1999. The Environmental Geology of Mineral Deposits. In: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques and Health Issues (Eds.: Plumlee, G.S., and M.J. Logsdon). Reviews in Economic Geology Vol 6A. Society of Economic Geologists, Inc.
- Plumlee, G.S., K.S., Smith, M.R., Montour, W.H. Ficklin, and Mosier. E.L. 1999. Geologic Controls on the Composition of Natural Waters and Mine Waters Draining Diverse Mineral-Deposit Types. In: The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics (Eds.: Filipek, L.H. and G.S. Plumlee). Reviews in Economic Geology Vol 6B. Society of Economic Geologists, Inc.

Stumm, W. and Morgan, J.J. 1981. Aquatic Chemistry. Second Edition. New York: John Wiley & Sons.

Figura 12: Diagrama de Flujo para la Evaluación de Desempeño del ARD y la Revisión del Plan de Gestión Operativa (INAP, 2009)

