

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA – ATG LTDA.
CONTRATO DE CONSULTORÍA GGC-468-2020
PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA
PARA LOS PROCESOS DE LA ACTIVIDAD MINERA
RELACIONADOS CON PRESAS DE RELAVES Y DRENAJES ÁCIDOS



PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS PROCESOS DE DRENAJES ÁCIDOS MINEROS

CONTRATO DE CONSULTORÍA GGC-468-2020 DE 2020

28 DE DICIEMBRE DE 2020

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1. DEFINICIONES	9
2. MARCO REGULATORIO	14
2.1. Marco legal minero.....	14
2.2. Marco legal ambiental	16
2.2.1. Guías Minero Ambientales- Resolución 18-0861 de 2002	17
2.2.2. Resolución 631 de 2015	17
2.2.3. Resolución 2206 de 2016	19
2.2.4. Resolución 0447 de 2020	19
3. ANALISIS COMPARATIVO DE INFORMACIÓN	21
3.1. Concepción y definición del tipo de drenaje de mina	21
3.2. Metodologías para la clasificación de los DAM.....	25
3.2.1. Clasificación de los materiales para estimar la generación ácida.....	26
3.2.2. Estimación de la capacidad máxima de generación ácida	27
3.2.3. Estimación de la capacidad máxima en laboratorio y ensayos insitu	27
3.2.4. Metodología para predecir la generación ácida.	28
3.3. Definición y modelamiento de la generación del potencial ácido a partir de información de las etapas de exploración, explotación, cierre y post cierre	31
3.3.1. Generación del potencial ácido a partir de la etapa de exploración.	31
3.3.2. Generación del potencial ácido a partir de la etapa de explotación.....	34
3.3.3. Generación del potencial ácido a partir de las etapas de cierre y post cierre	37
3.4. Alternativas para la prevención, control y tratamiento del drenaje ácido minero - DAM	43
3.5. Seguimiento y monitoreo.....	52
3.6. Gestión del riesgo	67
3.7. Economía circular.....	73
3.8. Contexto colombiano- reuniones con empresas.....	74
4. METODOLOGÍA.....	77
5. LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL DRENAJE ÁCIDO MINERO - DAM.....	78
5.1. Concepción y definición del tipo de drenaje.....	89
5.2. Definición y modelamiento de la generación del potencial ácido a partir de las etapas de exploración, construcción y montaje, explotación, cierre y post cierre de las operaciones de mina.....	90

5.3.	Alternativas para la prevención, control y tratamiento del DAM.....	111
5.4.	Monitoreo y vigilancia.....	124
5.5.	Gestión del Riesgo.....	134
5.6.	Buenas prácticas.....	136
5.7.	Economía circular.....	141
6.	CONCLUSIONES.....	144
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	148

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Análisis comparativo línea estratégica vs. Alcance términos de referencia.	14
Tabla 2. Parámetros de calidad de agua y límites normativos para vertimientos del sector minero.	18
Tabla 3. Línea estratégica vs. Alcance Marco Legal Ambiental	20
Tabla 4. Tipos de drenaje producidos por oxidación de sulfuros.....	21
Tabla 5. Clasificación de aguas residuales.	23
Tabla 6. Clasificación de drenajes en función del pH y el potencial de acidez/alcalinidad de los minerales (Morin and Hutt, 2001).	23
Tabla 7. Tipos de drenajes de mina.....	23
Tabla 8. Factores que influyen en la Dinámica del DAM.	26
Tabla 9. Tipo de pruebas para la predicción.	30
Tabla 10. Caracterización de Relaves Mineros y Determinación de posible DAM.....	30
Tabla 11. Fuentes potencialmente generadoras de DAM.	36
Tabla 12. Estrategias y/o medidas de prevención y/o control del DAM.	45
Tabla 13. (Continuación) Estrategias y/o medidas de prevención y/o control del DAM. ...	46
Tabla 14. Diseños del programa de monitoreo.	55
Tabla 15. Aspectos a considerar para la selección del Monitoreo en la etapa del Post cierre.	56
Tabla 16. Parámetros a definir y métodos de análisis en las fases de muestreo.....	58
Tabla 17. Número mínimo de muestras en base a la masa de cada unidad geológica, según Price and Errington, 1994.....	60
Tabla 18. Resumen de los principales aspectos a considerar en el muestreo de botaderos y depósitos de relaves.	60
Tabla 19. Resumen de los principales aspectos a considerar en el muestreo en depósitos de lixiviación y Minas Rajo Abierto y Subterránea.....	62
Tabla 20. Lineamientos de la Línea Estratégica Concepción y Definición del Tipo de Drenaje.....	80
Tabla 21. Lineamientos de la Línea Estratégica Definición y Modelamiento de la Generación del Potencial Ácido.....	80
Tabla 22. Lineamientos de la Línea Estratégica Alternativas para la Prevención, Control y Tratamiento.	83
Tabla 23. Lineamientos de la Línea Estratégica Monitoreo y Vigilancia	84
Tabla 24. Lineamientos de la Línea Estratégica Gestión del Riesgo.....	85
Tabla 25. Lineamientos de la Línea Estratégica Buenas Prácticas.	86
Tabla 26. Lineamientos de la Línea Estratégica Economía Circular.....	87
Tabla 27. Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento.	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. De la Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras (Chile). Mina: a rajo abierto y subterráneo.	38
Figura 2. Ley 20.551, regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, ministerio de minas gobierno Chile.	38
Figura 3. Fondo Post Cierre.....	39
Figura 4. Aporte Fondo Post Cierre	39
Figura 5. Ciclo de Vida de la Mina, con los Requisitos de Presentación de Estudios y Permisos de Cierre.	40
Figura 6. Clasificación de las etapas para asegurar la estabilidad química.....	44
Figura 7. Generalidades del programa de muestreo en fuentes existentes y nuevas.....	57
Figura 8. Número mínimo de muestras en base a la masa de cada unidad geológica, según Steffen, Robertson and Kiersten, 1989.....	59
Figura 9. Árbol de decisiones para el muestreo en botaderos en operación.	64
Figura 10. Árbol de decisiones para el muestreo en depósitos de relaves.....	64
Figura 11. Árbol de decisiones para el muestreo en instalaciones con material lixiviado.	65
Figura 12. Procedimiento general de evaluación de riesgos.	68
Figura 13. Modelo conceptual simplificado.	69
Figura 14. Líneas Estratégicas para drenajes ácidos mineros.	77
Figura 15. Estructura de Líneas Estratégicas y Lineamientos para drenajes ácidos mineros.....	78

INTRODUCCIÓN

El presente documento se elabora bajo el marco del Contrato de Consultoría GGC-468-2020 celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía (Dirección de Minería Empresarial) y ATG Ltda., y recopila, analiza e interpreta información sobre criterios, experiencias, lecciones aprendidas, directrices, principios, estándares, técnicas, métodos, metodologías y tecnologías respecto a la gestión y manejo de los drenajes ácidos mineros que pudiesen contribuir en la conceptualización y elaboración de la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados.

Los drenajes ácidos mineros son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el mundo, este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizado el ciclo productivo. Estos drenajes, pueden ser generados durante en desarrollo de la actividad minera o de manera natural, dependiendo de las características del mineral, los aspectos ambientales a los cuales está expuesto y las prácticas desarrolladas durante el proyecto minero. Además, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión con un alto contenido en sulfato y metales, los cuales en altas concentraciones y sin un manejo adecuado pueden ocasionar efectos nocivos para el medio ambiente y para la salud humana.

La gestión del riesgo para este caso está siendo enfocada desde la prevención y la predicción de la generación de los mismos, estableciendo diferentes pruebas y modelos o diversos tratamientos en caso de generarse. Por lo anterior, las exigencias técnicas han aumentado, estableciendo mayor responsabilidad a todos los actores que intervienen, por lo cual es indispensable, incorporar un análisis sobre las buenas prácticas para el manejo de los drenajes ácidos mineros.

A nivel internacional países como Canadá, Australia, EEUU, Perú, Chile, entre otros, han desarrollado hace años o incluso décadas, orientaciones y un marco legal relacionado a los drenajes ácidos mineros, incorporando tecnologías, innovación y gestión del riesgo.

Colombia cuenta con poca experiencia, conocimiento y seguimiento en la gestión y manejo de drenajes ácidos mineros, y carece de una regulación clara respecto al tema; de manera que proyectos de gran minería que han desarrollado o están en procesos de planeación de este tipo de estructuras, se basan principalmente en estándares internacionales o según las regulaciones respecto al origen de su casa matriz.

Del mismo modo, en la pequeña minería se tienen deficiencias significativas en la tecnificación para los procesos de beneficio y transformación del mineral, por lo que

se realizan procesos poco técnicos usando sustancias altamente contaminantes, lo que genera afectación a los ecosistemas y a la salud pública.

Este documento expone una propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de drenajes ácidos mineros, dada la necesidad de establecer bases para dicha gestión, a través de lineamientos que comprenden las siguientes etapas principales: determinación de la generación de potencial ácido en proyectos mineros, monitoreo y vigilancia, gestión del riesgo, buenas prácticas y economía circular, los cuales fomentan el fortalecimiento del sector.

Se establecieron unas Líneas Estratégicas Básicas: *Concepción y definición del tipo de drenaje de minas; Definición y Modelamiento de la Generación del Potencial Ácido en las etapas de exploración, explotación, cierre y post cierre de la operación minera; Alternativas para la Prevención, Control y Tratamiento, y Monitoreo y Vigilancia*, en concordancia con el marco de referencia dado por el Ministerio de Minas y Energía, y se consideraron otras, aportadas por la investigación, relacionadas con la Predicción, Medidas para la Caracterización y Manejo del Drenaje Ácido Minero (fase de planeamiento y etapa de construcción y montaje), *Gestión del Riesgo, Buenas Prácticas y Economía Circular*. En total son siete (7) líneas estratégicas, las cuales serán abordadas a lo largo del presente documento.

De ahí que los lineamientos parten del marco regulatorio minero y ambiental vigentes, pretendiendo que sean armónicos y coherentes con los términos y dimensiones del actual ordenamiento, donde se definen objetivos con líneas de base e indicadores, que sirvan de referencia en la planeación y desarrollo de la actividad minera por parte de los titulares mineros y a la vez sean integrados al sistema de evaluación y seguimiento por parte de la autoridad minera, que le permita medir a futuro el estado de implementación y avance en la aplicación de dichos lineamientos, con miras al desarrollo de una minería con responsabilidad social y más competitiva.

ABREVIATURAS

ABA: Prueba de Balance Acido-Base

DAM: Drenaje Ácido Minero

DAR: Drenaje Ácido de Roca

EPT: Elementos Potencialmente Tóxicos

EQ: Estabilidad Química

GARD: Guía Global de Drenaje Ácido de Roca (Guía GARD). Red Internacional para la Prevención del Ácido (INAP). 2014

INAP: The International Network for Acid Prevention, Red Internacional para la Prevención del Ácido.

MEND: Mine Environment Neutral Drainage, Programa de Drenaje Neutral en el Ambiente Minero.

NAF: Non Acid Forming. No formador de ácido

PA: Potencial de Producción de Ácido

PN: Potencial de Neutralización

NNP: Potencial Neto de Neutralización

PAF: Potential Acid Forming. Potencialmente generador de ácido

PTO: Programa de Trabajos y Obras

1. DEFINICIONES

Aguas ácidas: Se forman por meteorización de minerales sulfurosos, simultáneamente a la acción catalizadora de bacterias.¹

Análisis geoestadístico: La información obtenida en los análisis geoestadísticos son los datos básicos para el cálculo de recursos de minerales y el control de la graduación. El análisis comienza con el examen de los datos producidos mediante la elaboración del modelo del yacimiento.

Contaminante: se define como una sustancia que normalmente no está presente (por ejemplo, pH bajo) o como una sustancia presente por encima de los niveles de referencia o de referencia (por ejemplo, un metal o metaloide). Para determinar si esa contaminación puede o no causar un efecto.²

Depósito de relave: Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una Planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la Planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos (Decreto Supremo 248, Título I, Capítulo II, Artículo 5°).³

Depósito de relave espesado: Depósito de relave donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de sedimentación, mediante espesadores, eliminándole una parte importante del agua contenida. El depósito de relave espesados deberá ser construido de tal forma que se impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado y contar con un sistema de piscinas de recuperación del agua remanente (Decreto Supremo 248, Título I, Capítulo II, Artículo 6°, letra I).⁴

Depósito de relave filtrados: Depósito de relave donde, antes de ser depositados, son sometidos a un proceso de filtración, mediante equipos especiales de filtros, donde se asegure que la humedad sea menor a un 20%. Deberá asegurarse que el relave así depositado no fluya a otras áreas distintas a las del emplazamiento determinado (Decreto Supremo 248, Título I, Capítulo II, Artículo 6°, letra m).⁵

¹ Glosario Técnico Minero. Resolución 40599 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía.

² Guía Global de Drenaje Ácido de Roca (Guía GARD). Red Internacional para la Prevención del Ácido (INAP). 2014

³ Chile, Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, Ministerio de Minería, 2018.

⁴ Chile, Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, Ministerio de Minería, 2018.

⁵ Chile, Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, Ministerio de Minería, 2018.

Depósito de relave en pasta: Depósito de relave que presenta una situación intermedia entre el relave espesado y el relave filtrado, corresponde a una mezcla de relave sólidos y agua, entre 10% y 25% de agua, que contiene partículas finas, menores de 20 μ en una concentración en peso superior al 15%, muy similar a una pulpa de alta densidad. Su depositación se efectúa en forma similar al relave filtrado, sin necesidad de compactación, poseyendo consistencia coloidal (Decreto Supremo 248, Título I, Capítulo II, Artículo 6°, letra k).⁶

Drenaje: Cualquier agua que drene de una característica natural o artificial, incluida la escorrentía de agua superficial natural; drenaje de minas y agua subterránea que ha salido a la superficie.

Drenaje Ácido de Mina: Un DAM es un agua de pH bajo, enriquecida en sulfatos y con grandes concentraciones de acidez. La acidez de los DAM es producida por oxidación e hidrólisis de minerales de sulfuros y está representada por acidez mineral (hierro, aluminio, manganeso y otros metales, que depende de la geología del depósito) y acidez del ion hidrógeno.⁷

Drenaje Acido de Relaves: El ARD se refiere a procesos por los cuales el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros, además un drástico incremento del contenido de los sulfatos.⁸

Drenaje Ácido de Roca: Fenómeno de generación de aguas ácidas, producido por procesos de oxidación de rocas (principalmente oxidación de sulfuros) en cualquier ambiente. Existe en el medioambiente sin actividad minera.

Drenaje de Mina Neutral: Un drenaje de pH neutro, cargado de metales y rico en azufre que se produce durante la alteración de la tierra donde el azufre o los sulfuros metálicos están expuestos a las condiciones atmosféricas. Se forma en condiciones naturales a partir de la oxidación de minerales de sulfuro y donde la alcalinidad iguala o excede la acidez.⁹

Elementos potencialmente tóxicos: Los metales pesados y metaloides se conocen ahora como Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), y corresponden al conjunto de metales pesados y metaloides (As, Cd, Cr, Co, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb y Zn, entre otros), que a pesar de que se presentan en los suelos, sus concentraciones normales (en total no más del 1% de la corteza) no generan daño ambiental; sin embargo, las actividades industriales incrementan las concentraciones tanto en

⁶ Chile, Guía Metodológica para Evaluación de la Estabilidad Física de Instalaciones Mineras Remanentes, Ministerio de Minería, 2018.

⁷ Glosario Técnico Minero. Resolución 40599 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía.

⁸ Perú, Guía ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas, Ministerio de Minas y Energía, 2016.

⁹ Guía global de drenaje ácido de rocas, The International Network for Acid Prevention, 2014.

suelo como en el agua, afectando de forma severa sus condiciones y generando riesgos ambientales y a la salud (Masciandaro et al., 2013; Pourret y Hursthouse, 2019).¹⁰

Factores ambientales: aquellos que son necesarios para el proceso de generación de DAM. Estos factores son principalmente el agua y el oxígeno.¹¹

Fuentes Potencialmente Generadoras de Drenaje Ácido Minero: se define como la liberación de contaminantes (botaderos o stock-pile, relaves, pilas, rajos, minas subterráneas) son todas aquellas instalaciones mineras constituidas por materiales que, tras un proceso físico y/o químico de carácter antrópico, quedan expuestos a los factores ambientales como superficies con capacidad de reacción.¹²

Gestión del Riesgo: Es el proceso social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia del mismo, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo cuando ya existe y para prepararse y manejar las situaciones de desastre, así como para la posterior recuperación, entiéndase: rehabilitación y reconstrucción. Estas acciones tienen el propósito explícito de contribuir a la seguridad el bienestar y calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible.¹³

Lagunas anaerobias: Se utilizan comúnmente como primera fase en el tratamiento de aguas residuales urbanas o industriales con alto contenido de materia orgánica. Su objetivo es la reducción de contenido de sólidos y materia orgánica del agua residual.

Lagunas aerobias: Este tipo de lagunas se usan para la degradación de la materia orgánica mediante la actividad de bacterias aerobias que consumen el oxígeno producido por las algas.

Lagunas facultativas: Poseen una zona aerobia y una zona anaerobia situadas respectivamente en superficie y fondo, por ello, se puede encontrar cualquier tipo de microorganismo que reacciona con el medio que también puede poseer cierto tipo de algas, que dependen del constante cambio de oxígeno.

Medios de exposición (transporte): se define como el transporte de los contaminantes (agua subterránea, agua superficial, sedimentos, suelos).¹⁴

¹⁰ Colombia, Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia, Universidad del Rosario, 2020

¹¹ Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

¹² Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

¹³ Ley 1523 de 2012. Por el cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el sistema nacional de gestión del riesgo de desastres. Congreso de Colombia

¹⁴ Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

Modelos de bloques: Por lo general, el primer paso es crear un conjunto de secciones perforadas a partir de la base de datos de perforación. Estas secciones se usan a continuación para verificar los datos del proyecto y, posteriormente, para establecer límites geológicos interpretados para los diferentes tipos de roca y mineral. El próximo paso es dividir las zonas geológicas en bloques y calcular el tonelaje y la graduación de cada bloque. La forma de los bloques y los métodos de cálculo varían en función de los requisitos específicos de su proyecto.

Monitoreo: medida de los contaminantes y de sus efectos con objeto de ejercer control sobre la exposición del hombre o de elementos específicos de la biósfera a esos contaminantes.¹⁵

Muestreo: Es un proceso selectivo de separación, realizado sobre una porción dada de material (yacimiento, lote original o muestra previa) con el objeto de reducir su volumen, pero mantener sus características globales, físicas, químicas o mineralógicas con el fin de determinar las propiedades o composición del material original.¹⁶

Receptores: se define como el destino de los contaminantes (vida acuática, vida terrestre, vegetación, personas).¹⁷

Represa de colas: Obras de infraestructura construidas para almacenar o represar los relaves, colas y desechos acuosos productos de grandes operaciones mineras. Generalmente al explotar una mina se retira la cobertura vegetal y esto ocasiona que el agua fluya por varias partes. Por lo anterior es necesario construir represas para almacenar esta agua o disminuir su velocidad.¹⁸

Tratamientos activos: Los tratamientos activos corresponden a los métodos más empleados y más conocidos, ya que parten de los sistemas de tratamiento convencionales de aguas residuales, con las etapas de pretratamiento, tratamientos primarios, secundarios y terciarios; el modelo general del sistema de tratamiento de aguas residuales comprende tamizado, homogenización, sedimentación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración, digestión anaerobia, aireación, oxidación (Spellman, 2014), para el caso de las cargas metálicas los principales procesos son ultrafiltración, electrodiálisis, uso de reactivos específicos, la adsorción y el intercambio iónico (Matveeva et al., 2019), sin embargo, se incluyen también procesos de filtración por membrana (Kefeni et al., 2017).¹⁹

¹⁵ Glosario Técnico Minero. Resolución 40599 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía

¹⁶ Glosario Técnico Minero. Resolución 40599 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía

¹⁷ Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

¹⁸ Glosario Técnico Minero. Resolución 40599 de 2015 del Ministerio de Minas y Energía

¹⁹ Colombia, Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia, Universidad del Rosario, 2020

Tratamientos pasivos (fisicoquímicos y biológicos): Los sistemas de tratamiento pasivo se enfocan en la neutralización química y la eliminación de metales y metaloides, pueden ser de tipo fisicoquímico como los subdrenajes anóxicos de caliza o los canales abiertos de caliza; también se incluyen los humedales artificiales considerados sistemas pasivos de tipo biológico. Por la naturaleza y variedad de las cargas contaminantes, los efluentes mineros pueden requerir diversos métodos de tratamiento, integrando diferentes varias tecnologías de tratamiento pasivos (Doshi, 2006).²⁰

Unidades discretas: material o conjunto de materiales geológicos que se caracterizan por condiciones mineralógicas similares (litología, alteración, mineralización), comportamiento geoquímico similar, comportamiento similar en presencia de agua, puede o no coincidir con las unidades geológicas.²¹

²⁰ Colombia, Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia, Universidad del Rosario, 2020

²¹ Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

2. MARCO REGULATORIO

2.1. Marco legal minero

La normatividad vigente para el componente minero es la relacionada con la elaboración del Plan de Trabajos y Obras, Resolución 299 del 13 de junio de 2018 de la Agencia Nacional de Minería- ANM-, por medio de la cual se modifica la Resolución No. 143 de 29 de marzo de 2017. En esta resolución se acogen los términos de referencia para los trabajos de exploración, programa mínimo exploratorio y programa de trabajos y obras (PTO) para materiales y minerales distintos del espacio y fondo marino.

A continuación, se realiza un análisis de la información establecida en los términos de referencia vigentes que está asociada a cada una de las líneas estratégicas definidas para establecer las buenas prácticas para estandarizar los procesos de Drenaje ácido (en explotaciones mineras y presas de relaves).

Tabla 1. Análisis comparativo línea estratégica vs. Alcance términos de referencia.

LÍNEA ESTRATÉGICA	ALCANCE TÉRMINOS DE REFERENCIA Resolución No. 143 de 29 de marzo de 2017
<p>1. CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TIPO DE DRENAJE DE MINA</p>	<p>FASE I: EXPLORACIÓN GEOLÓGICA DE SUPERFICIE</p>
	<p>Numeral 4.1- Revisión bibliográfica (análisis de literatura para los componentes geoquímicos, hidrológicos, hidrogeológicos)</p> <p>Numeral 4.4 - Cartografía Geológica (características geoquímicas)</p> <p>Numeral 4.6 - Geoquímica (muestreo sistemático- sedimentos activos, suelos. rocas-, en los drenajes, a lo largo de una malla regular, o en lo diferentes afloramientos, túneles, trincheras y apiques, entre otros. Se determinan los contenidos de metales preciosos, elementos guías de la mineralización, anomalías geoquímicas.</p>
	<p>FASE II: EXPLORACIÓN GEOLÓGICA DEL SUBSUELO</p>
	<p>Numeral 5.4.2. Estudio hidrológico (deberá proveer la información necesaria para diseñar las obras y sistemas para el manejo de las aguas que permitan una eficiente operación minera).</p> <p>Numeral 5.4.3. Estudio hidrogeológico (características de los acuíferos presentes en el área y los efectos que produciría el agua subterránea sobre la explotación minera)</p>
	<p>FASE III: EVALUACIÓN Y MODELO GEOLÓGICO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Mapas de anomalías geoquímicas y geofísicas, para el caso en que se utilicen estas herramientas, a escala según el nivel de los estudios. • El conocimiento hidrogeológico y geotécnico del área deberá proveer la información necesaria para fijar criterios y diseñar los sistemas de drenaje, desagüe, despresurización y estabilidad de taludes de las explotaciones, tanto a cielo abierto, como subterráneas.

LÍNEA ESTRATÉGICA	ALCANCE TÉRMINOS DE REFERENCIA Resolución No. 143 de 29 de marzo de 2017
<p>2. DEFINICIÓN Y MODELAMIENTO DE LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO A PARTIR DE INFORMACIÓN DE LAS ETAPAS DE EXPLORACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE, EXPLOTACIÓN, CIERRE Y POST CIERRE</p>	<p>NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO</p>
<p>3. ALTERNATIVAS PARA PREVENCIÓN, CONTROL Y TRATAMIENTO</p>	<p>FASE IV: PROGRAMA DE TRABAJOS Y OBRAS</p> <p>Diseño y planeamiento minero de la explotación</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cielo abierto: secuenciamiento de avance de los botaderos y retrollenados/ sistema de control y bombeo de aguas de escorrentía y subterráneas/plano general con la geometría de los tajos, instalaciones principales, botaderos de superficie, pilas de suelo, vías de acceso, línea eléctrica, canales y diques de protección. • Explotación subterránea: se hará el diseño detallado de las labores mineras (desagüe). También se incluirá el diseño de los botaderos de superficie y demás instalaciones principales requeridas para el proyecto. Plano de infraestructura e instalaciones de soporte (botaderos de estéril en superficie). <p>Beneficio y transformación de minerales</p> <p>Caracterización física, química y mineralógica del mineral, lo que permitirá conocer el estado actual de las operaciones y procesos de beneficio de minerales, así como de las potencialidades y limitaciones al tratar de mejorar estos procesos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operaciones de beneficio, metalurgia y transformación de minerales: definidas las características mineralógicas de la mena y sus asociaciones, se determinará el proceso más apropiado para su tratamiento, en aras de obtener la mayor recuperación de metal valioso, para ello se realizan estudios que permiten definir las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la sustancia mineral y así seleccionar los equipos más apropiados para su beneficio y transformación. • Fundición y separación metálica: descripción del proceso, métodos utilizados en el tratamiento de los precipitados, tipos de carga en la fundición, manejo de escorias, descripción de la separación selectiva de metales preciosos, tipos de equipos, manejo y disposición de las colas.
<p>4. MONITOREO Y VIGILANCIA</p>	<p>PROGRAMA DE TRABAJOS Y OBRAS DE EXPLOTACIÓN E INFORMES</p> <p>Numeral e) Descripción y localización de las instalaciones y obras de minería, depósito de minerales, beneficio y transporte y, si es del caso, de transformación.</p> <p>Numeral i) Características físicas y químicas de los minerales por explotarse.</p> <p>Numeral k) Plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura.</p>

LÍNEA ESTRATÉGICA	ALCANCE TÉRMINOS DE REFERENCIA Resolución No. 143 de 29 de marzo de 2017
	<p style="text-align: center;">PLAN DE CIERRE Y ABANDONO</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para la minería a cielo abierto, se buscará que el área explotada se recupere con miras a darle otro uso potencial a la zona, acorde con el medio ambiente circundante y los planes de ordenamiento territorial municipal, los cuales pueden ser, de tipo urbanístico o industrial, de recreación pasiva o intensiva, agrícola o forestal, conservación de la naturaleza, depósito de agua, vertedero de estéril y basuras. • Si se trata de explotaciones subterráneas se debe evaluar y definir en superficie la proyección de los posibles daños que se pueden causar en el futuro por efecto de la subsidencia tardía del terreno y sus consecuencias en obras civiles y de infraestructura, para lo cual se deben calcular las consecuencias y costos, haciendo las provisiones necesarias.
<p style="text-align: center;">5. GESTIÓN DEL RIESGO</p>	<p style="text-align: center;">PROGRAMA DE TRABAJOS Y OBRAS DE EXPLOTACIÓN E INFORMES</p> <p>Numeral j) plan de cierre de la explotación y abandono de los montajes y de la infraestructura.</p>
<p style="text-align: center;">6. BUENAS PRÁCTICAS</p>	<p style="text-align: center;">NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO</p>
<p style="text-align: center;">7. ECONOMÍA CIRCULAR</p>	<p style="text-align: center;">NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO</p>

Fuente: ATG Ltda., 2020.

2.2. Marco legal ambiental

Dando cumplimiento a la Ley 685 de 2001 (por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones), los Ministerios de Minas y Energía y del Medio Ambiente mediante *Resolución 18-0861 del 20 de agosto de 2002* adoptan las Guías Minero Ambientales de Exploración, Explotación y de Beneficio y Transformación, las cuales son un instrumento de consulta obligatoria y orientación de carácter conceptual, metodológico y procedimental.

El marco legal ambiental que está asociado específicamente con la temática de DAM, corresponde a la normatividad vigente en materia de vertimientos a nivel nacional: *Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

El DAM también se encuentra contemplado en los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación mineros, para proyectos de gran y mediana minería, los cuales fueron adoptados mediante la *Resolución 2206 del 27 de diciembre de 2016 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

Para la pequeña minería, la temática de DAM se contempla en la *Resolución 0447 del 20 de mayo de 2020 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*: “por el

cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental global o definitiva para proyectos de explotación de pequeña minería y se toman otras determinaciones”.

2.2.1. Guías Minero Ambientales- Resolución 18-0861 de 2002

Guía de Exploración: dentro de las actividades a realizar se contempla el componente de Geoquímica, pero con el fin de estudiar la distribución cualitativa y cuantitativa de los elementos y compuestos químicos primarios de los materiales de la corteza terrestre. Se utiliza para delimitar zonas potencialmente favorables para generar o encajar depósitos minerales. Conduce específicamente a delimitar zonas superficiales con alto potencial geológico minero. No se contempla la temática específica de DAM.

Guía de Explotación: la temática del DAM es abordada en la ficha de Manejo de Aguas Residuales Mineras, se establece que se debe realizar una caracterización previa del yacimiento y de los componentes de los estériles para prever la posible formación de aguas ácidas. Las aguas de escorrentía que hayan transitado sobre materiales estériles, apilamientos de mineral, y las provenientes de los drenajes mineros deben ser interceptadas y conducidas a sistemas de tratamiento mediante canales hechos en tierra o impermeabilizados. Los yacimientos que contienen materiales reactivos, que favorecen la formación de aguas ácidas se deben cubrir por medio de coberturas o sellos de baja permeabilidad, como suelos de textura fina, arcillas o limos, y materiales sintéticos, de polietileno o neopreno. Para el tratamiento de las aguas ácidas, se proponen técnicas de neutralización como la adición de cal, por su bajo costo y alta eficiencia.

Guía de Beneficio: la temática del DAM es abordada en la ficha de Manejo de Aguas Residuales Industriales, se establece que el contacto del agua con la piritita y otros minerales inestables como al azufre estimula procesos acelerados de oxidación que contribuyen a la acidificación del agua. Para el tratamiento de las aguas ácidas, se proponen técnicas de neutralización como la adición de cal, por su bajo costo y alta eficiencia.

2.2.2. Resolución 631 de 2015

Para el caso de los vertimientos, la norma que los regula a nivel nacional es la Resolución 631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”, en el título VI, artículo 10, se establecen los parámetros físicoquímicos a monitorear y sus valores límites

máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas residuales no domésticas (ARnD) a cuerpos de agua superficiales de actividades de minería. A continuación, se listan los parámetros relacionados específicamente con el DAM y que fueron extraídos de la resolución 631 de 2015. Se muestra el parámetro, la unidad de medida y los límites normativos para cinco (5) clasificaciones de extracciones mineras: Extracción de carbón de piedra y lignito, Extracción de minerales de Hierro, Extracción de oro y otros metales preciosos, Extracción de minerales de Níquel y otros minerales metalíferos no ferrosos y Extracción de minerales de otras minas y canteras.

Tabla 2. Parámetros de calidad de agua y límites normativos para vertimientos del sector minero.

Item	Descripción	Und	Extracción de carbón de piedra y lignito	Extracción de minerales de Hierro	Extracción de oro y otros metales preciosos	Extracción de minerales de Níquel y otros minerales metalíferos no ferrosos	Extracción de minerales de otras minas y canteras
PARÁMETROS GENERALES							
1	pH	Unidades	6,00 - 9,00	6,00 - 9,00	6,00 - 9,00	6,00 - 9,00	6,00 - 9,00
2	DQO	mg/L O ₂	150	150	150	150	150
3	DBO ₅	mg/L O ₂	50	50	50	50	50
4	Sólidos Suspendedos Totales	mg/L	50	50	50	50	50
5	Sólidos Sedimentables	mL/L-h	2	2	2	10	2
IONES							
6	Cianuro Total	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
7	Cloruros	mg/L	500	250	250	-	250
8	Sulfatos	mg/L	1200	250	1200	250 ó 1000 cuando se realicen procesos de hidrometalurgia	400
9	Sulfuros	mg/L	1,0	1,0	1,0	-	1,0
METALES Y METALOIDES							
10	Arsénico	mg/L	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
11	Cadmio	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
12	Zinc	mg/L	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
13	Cobre	mg/L	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
14	Cromo Total	mg/L	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
15	Hierro total	mg/L	2,0	2,0	2,0	5,0	2,0
16	Mercurio	mg/L	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
17	Níquel	mg/L	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
18	Plomo	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Fuente: ATG Ltda., 2020. Tomado y modificado de la Resolución 631 de 2015

2.2.3. Resolución 2206 de 2016

La Resolución 2206 del 27 de diciembre de 2016 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: “por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones” aborda la temática de Drenaje ácido (en explotaciones mineras y presas de relaves).

A continuación, se establecen los numerales específicos de los términos de referencia vigentes que están asociados a las líneas estratégicas definidas para establecer las buenas prácticas para estandarizar los procesos de Drenaje ácido (en explotaciones mineras y presas de relaves).

Capítulo 3. Descripción del proyecto

- *Numeral 3.2.2. Resultados de la exploración geológica*
- *Numeral 3.3 Diseño del proyecto*
- *Numeral 3.4 Beneficio y transformación de minerales*
- *Numeral 3.6.1 Manejo y disposición de sobrantes*

Capítulo 5. Caracterización del área de influencia

Numeral 5.1.1.2 Geología del yacimiento

Numeral 5.1.1.3 Geoquímica del yacimiento

Numeral 5.1.5 Hidrología

Numeral 5.1.5.1 Calidad del agua

Numeral 5.1.6.3 Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica

2.2.4. Resolución 0447 de 2020

La Resolución 0447 del 20 de mayo de 2020 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible: “por el cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental global o definitiva para proyectos de explotación de pequeña minería y se toman otras determinaciones” aborda la temática de Drenaje ácido (en explotaciones mineras y presas de relaves).

A continuación, se establecen los numerales de los términos de referencia vigentes que están asociados a las líneas estratégicas definidas para establecer las buenas prácticas para estandarizar los procesos de Drenaje ácido (en explotaciones mineras y presas de relaves).

Capítulo 2. Descripción del proyecto

Numeral 2.2.1 Información geológica del yacimiento

Numeral 2.3 Diseño del proyecto

Numeral 2.4 Beneficio y transformación de minerales

Numeral 2.7 Manejo y disposición de sobrantes

Capítulo 4. Medio Abiótico

Numeral 4.1.1 Geología del yacimiento

Numeral 4.5 Hidrología

Numeral 4.6 Calidad del agua

Numeral 4.8 Hidrogeología

A continuación, se relaciona el marco legal ambiental analizado previamente y cada una de las líneas estratégicas definidas para establecer las buenas prácticas para estandarizar los procesos de Drenaje Ácido Minero.

Tabla 3. Línea estratégica vs. Alcance Marco Legal Ambiental

LÍNEA ESTRATÉGICA	GUÍAS MINERO AMBIENTALES Resolución 18-0861 de 2002	ALCANCE TÉRMINOS DE REFERENCIA Resolución No. 2206 de 2016	ALCANCE TÉRMINOS DE REFERENCIA Resolución No. 0447 de 2020
CONCEPCIÓN Y DEFINICIÓN DEL TIPO DE DRENAJE DE MINA	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO	X	X
DEFINICIÓN Y MODELAMIENTO DE LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO A PARTIR DE INFORMACIÓN DE LAS ETAPAS DE EXPLORACIÓN, EXPLOTACIÓN, CIERRE Y POST CIERRE	X	X	X
ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO, CONTROL Y PREVENCIÓN	X	X	X
MONITOREO Y VIGILANCIA	X	X	X
GESTIÓN DEL RIESGO	X	X	X
BUENAS PRÁCTICAS	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO
ECONOMÍA CIRCULAR	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO	NO SE ENCUENTRA CONTEMPLADO

Fuente: ATG Ltda., 2020.

3. ANALISIS COMPARATIVO DE INFORMACIÓN

3.1. Concepción y definición del tipo de drenaje de mina

En la Guía de Drenaje Ácido Global de Roca, INAP (2014) se establece que el drenaje ácido de roca se forma por la oxidación natural de minerales sulfurosos cuando son expuestos al aire y al agua. Las actividades que involucran la excavación de rocas con minerales sulfurosos, tales como la minería de metal y carbón, aceleran el proceso. El drenaje resultante del proceso de oxidación puede ser de neutro a ácido, con o sin metales pesados disueltos, pero siempre con contenido de sulfatos. Los minerales sulfurosos en los depósitos de mineral se forman bajo condiciones reductoras en la ausencia de oxígeno. Cuando se exponen al oxígeno atmosférico o a aguas oxigenadas debido a la minería, el procesamiento del mineral, excavación u otros procesos de movimiento de tierras, los minerales sulfurosos pueden volverse inestables y oxidarse.

Aunque la piritita es por mucho, el sulfuro dominante responsable de la generación de acidez, diferentes depósitos de mineral contienen diferentes tipos de minerales de sulfuro. Por ello, la generación potencial de ácido de un depósito de mineral o un desecho de mina, generalmente depende de la cantidad de sulfuro de hierro presente.

En este documento se determina que los elementos mayores y traza en el Drenaje Ácido de Roca (ARD), Drenaje Neutro de Mina (NMD) y Drenaje Salino (SD) se originan de la oxidación de sulfuros y la 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 trazan como Cu, Pb, Zn, Cd, Mn, Co y Ni también pueden lograr altas concentraciones. Los autores, al citar a Nordstrom y Alpers (1999), resaltan que el proceso de oxidación de sulfuros y la formación del ARD, NMD y SD es muy complejo e involucra a una multitud de procesos químicos y biológicos que pueden variar significativamente dependiendo de las condiciones ambientales, geológicas y climáticas.

El ARD resulta de una serie de reacciones y etapas que típicamente proceden de condiciones de pH casi neutras a más ácidas. En la siguiente tabla, se presentan de manera resumida, los diversos tipos de drenaje, expuestos por los autores.

Tabla 4. Tipos de drenaje producidos por oxidación de sulfuros.

DRENAJE ÁCIDO DE ROCA - ARD	DRENAJE NEUTRO DE MINA - NMD	DRENAJE SALINO
pH ácido. Es menor de 6	pH cerca a neutro a alcalino >6	pH neutro a alcalino >6
Metales de moderado a elevado	Metales bajo a moderado. Puede ser elevado en zinc, cadmio, Manganeso, antimonio, arsénico, selenio.	Metales bajo. Puede tener hierro moderado

DRENAJE ÁCIDO DE ROCA - ARD	DRENAJE NEUTRO DE MINA - NMD	DRENAJE SALINO
Sulfatos elevados	Sulfato bajo a moderado	Sulfato, magnesio y calcio moderados.
Tratamiento para neutralización de ácidos y eliminación de metales y sulfatos	Tratamiento para eliminación de metales y algunos sulfatos	Tratamiento para eliminación de sulfatos y de algunos metales

Fuente: ATG Ltda., 2020.

De otra parte, O. Aduvire (2006) dice que durante la explotación de determinados yacimientos (carbón, sulfuros metálicos, hierro, uranio y otros), quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurosos que pueden llegar a formar drenajes ácidos. Para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias.

Nordstrom y Alpers, 1998, citados por Aduvire (2006) describen el proceso de oxidación de la pirita como principal responsable de la formación de aguas ácidas y, afirman que estas reacciones geoquímicas se aceleran en áreas mineras debido a que el aire entra en contacto con mayor facilidad con los sulfuros a través de las labores de acceso y la porosidad creada en las pilas de estériles y residuos, unido a ello el cambio de composición química y el incremento de la superficie de contacto de las partículas. También afirman que los procesos físicos, químicos y biológicos tienen gran influencia en la generación, movilidad y atenuación de la contaminación ácida de las aguas, y los factores que más afectan a la generación ácida son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución de la pirita.

Para determinar el tipo de drenaje es necesario hacer un estudio detallado de las condiciones físicas del medio, el clima de lugar y una caracterización de los efluentes de mina, para ello, se realizan muestreos de agua y sedimentos para su análisis en laboratorio y determinar las concentraciones metálicas presentes, también se recurre a la medición in-situ de parámetros como: pH, contenido de oxígeno, potencial redox, conductividad, temperatura, Fe, acidez/alcalinidad, turbidez y otros.

El autor establece que, independientemente de la fuente que da origen a los drenajes de mina, éstos se pueden subdividir en dos grandes grupos:

- Drenajes alcalinos o aguas residuales con bajo potencial de solubilización.
- Drenajes ácidos o aguas residuales con alto potencial de solubilización.

Para el efecto, cita que en 1968 White hace una clasificación de las aguas residuales de mina en función al pH y los agrupa en 6 categorías:

Tabla 5. Clasificación de aguas residuales.

Clase	pH
Altamente ácidas	1,5 a 4,5
Blandas, ligeramente ácidas	5,0 a 7,0
Duras, neutras a alcalinas	7,0 a 8,5
Blandas, alcalinas	7,5 a 11,0
Muy salinas	6,0 a 9,0
Blandas ácidas	3,5 a 5,5

Fuente: Nordstrom y Alpers, 1998, citados por Aduvire (2006).

Así mismo el autor, al citar a Morin and Hutt (2001) anota, que teniendo en cuenta el pH del drenaje y los contenidos de metales o especies minerales presentes en el mismo, éste puede agruparse en cuatro tipos, según se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6. Clasificación de drenajes en función del pH y el potencial de acidez/alcalinidad de los minerales (Morin and Hutt, 2001).

CLASE	pH	DESCRIPCIÓN
Acido	< 6	- Acidez generada por oxidación de minerales, particularmente de sulfuros. - Nivel de metales disueltos es mayor que en drenajes casi neutros. - Asociado a minas metálicas, carbón y piritas
Alcalino	> 9 ó 10	- Alta alcalinidad generada por disolución de minerales básicos, particularmente óxidos, hidróxidos y algunos silicatos. - Niveles de algunos metales como el Al son mayores que en los drenajes casi neutros. - Asociado con minería de diamantes, molienda de bauxita, cenizas de combustión de carbón
Casi neutro	6 – 9 ó 10	- Dependiendo de la abundancia de los minerales, en determinados períodos pueden ser ácidos o alcalinos. - Concentración de metales disueltos algunas veces puede exceder niveles tóxicos.
Otros	Irrelevante	- Puede afectar la concentración de metales. - Asociado a minería no metálica como: potasa, sales, boratos, bentonitas, gravas, arcillas, etc.

Fuente: O. Aduvire (2006).

Skousen et al. (1994 y 1998) y Ziemkiewics et al. (1997) a partir del pH y el contenido de oxígeno y metales pesados hacen una clasificación de los drenajes de mina y lo agrupan en 5 tipos, según Aduvire (2006).

Tabla 7. Tipos de drenajes de mina.

TIPO	pH	DESCRIPCIÓN
I	<4.5	Alta concentración de Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Ni, Pb, y otros metales. Alto contenido de oxígeno. Muy ácido (llamado Drenaje Ácido de Mina)
II	<6.0	Alta cantidad de sólidos disueltos. Alta concentración de ión ferroso (Fe ²⁺) y Mn. Bajo contenido de oxígeno. Por oxidación, el pH del agua baja drásticamente hasta convertirse en Tipo I.

TIPO	pH	DESCRIPCIÓN
III	>6.0	Moderada a alta cantidad de sólidos disueltos. Bajo a moderado contenido de ion ferroso (Fe ²⁺) y Mn. Bajo contenido de oxígeno. Alta alcalinidad (llamado Drenaje Alcalino de Mina). Por oxidación de metales la acidez generada es neutralizada por la alcalinidad presente en el agua.
IV	>6.0	Alta cantidad de partículas disueltas. Drenaje neutralizado, pero todavía no se han fijado los hidróxidos en el agua. A mayor tiempo de residencia en las balsas mayor fijación de partículas y el agua puede llegar a ser similar al de Tipo V.
V	>6.0	Agua del drenaje es neutralizado. Alta cantidad de sólidos disueltos. Gran cantidad de hidróxidos precipitados y fijados en las balsas. Cationes restantes son disueltos por Ca y Mn. Oxi-aniones solubles como bicarbonato y sulfato quedan en la solución.

Fuente: (Skousen and Ziemkiewics, 1996, según O. Aduvire (2006)).

De otra parte, la Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras (2015) establece que el drenaje minero (DM) se puede clasificar en:

- Drenaje Minero Ácido (DMA): rangos de pH menores a 6, elevados contenidos de sulfatos y frecuentemente un contenido significativo de metales disueltos.
- Drenaje Minero Neutro (DMN): pH mayor a 6 y elevada concentración de metales en solución en pH cercanos al neutro.
- Drenaje Minero Alcalino (DMAL): pH mayor a 6
- Drenaje Minero Salino (DMS): contiene elevados niveles de sulfato en rangos de pH cercanos al neutro sin una carga significativa de metales en solución, siendo sus principales constituyentes el sulfato, magnesio y calcio.

En la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, Perú (2016), se establece que cualquiera sea el término empleado -DAM o DAR- el drenaje ácido se refiere a: drenaje contaminado que resulta de la oxidación de minerales sulfurados y lixiviación de metales asociados, provenientes de las rocas sulfurosas cuando son expuestas al aire y al agua. El desarrollo del DAR es un proceso dependiente del tiempo y que involucra procesos de oxidación tanto química como biológica y fenómenos físico-químicos asociados, incluyendo la precipitación y el encapsulamiento. Es importante reconocer que la definición se refiere al drenaje contaminado.

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

drenaje contaminado puede incluir, pero sin limitarse a ello, lo siguiente: pH, acidez, alcalinidad; sulfatos; nutrientes; metales (disueltos o totales); núclidos radiactivos; sólidos disueltos totales (SDT); sólidos suspendidos totales (SST).

La Guía define que generalmente el DAR se caracteriza por: valores de pH por debajo de 7 hasta 1.5; alcalinidad decreciente y acidez creciente; concentraciones elevadas de sulfato; concentraciones elevadas de metales (disueltos o totales); concentraciones elevadas de sólidos disueltos totales.

3.2. Metodologías para la clasificación de los DAM

La Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera (2002), reseña que el DAM se desarrolla en general siguiendo tres (3) etapas en el tiempo, caracterizadas por el pH del agua en el microambiente de los minerales sulfurados.

- Etapa 1: los minerales sulfurados, principalmente pirita, son oxidados químicamente por el oxígeno del aire, que es el oxidante principal. Si el agua o suelo se encuentra en el rango normal de pH (5-7) se puede neutralizar la acidez y originan la oxidación y precipitación del hierro como óxido o hidróxido.
- Etapa 2: el pH del microambiente ha disminuido hasta 4,5 por lo que ocurren reacciones de oxidación tanto químicas como biológicas y la oxidación continúa hasta que se haya agotado todo el potencial de neutralización, en este momento se presentarán valores de pH por debajo de 3,5.
- Etapa 3: las reacciones catalizadas por bacterias aumentan. Se produce hierro ferroso que se oxida biológicamente a hierro férrico, el cual se convierte en la oxidante dominante reemplazando al oxígeno. El DAM se vuelve aún más ácido producto de la oxidación de sulfuros metálicos, con mayores concentraciones de metales disueltos. La velocidad de oxidación vs la etapa 1 es de 10 a 1 millón de veces más.

De manera complementaria, esta Guía expone los métodos estándar y metodologías para predecir la probabilidad de generación de DAM y la calidad de éste, entre los que se encuentran:

- Predicción del DAM: dependen del tipo de mina y de su etapa de operación. Los principales objetivos son la caracterización geoquímica de la roca para identificar su potencial de generación de ácido y/o lixiviación y la predicción de la calidad y características del agua de drenaje. En Chile para predecir el DAM se utilizan principalmente ensayos estáticos de Balance Ácido Base (BAB) y pH en pasta, por su bajo costo, tiempo corto para obtener los resultados, facilidad de interpretación y comparación con otras partes del mundo. Usualmente estos ensayos se combinan con el ensayo de extracción o toxicidad SPLP. En Chile las pruebas cinéticas son poco frecuentes debido

a que los ensayos duran como mínimo 20 semanas y por lo tanto son más caros.

- Métodos de laboratorio: ensayos estáticos, ensayos cinéticos y ensayos de extracción.
- Métodos de campo
- Modelación matemática: métodos empíricos, modelos determinísticos.

Esta Guía hace referencia a la Dinámica del DAR en el medio ambiente, resaltando los principales factores que inciden en generación, transporte y efectos del DAM, pueden ser agrupados en factores primarios, secundarios y terciarios (con base en Ferguson & Erickson) y a su vez se pueden sub-agrupar en factores hidrológicos, geológicos y mineros). En la siguiente tabla, se presentan de manera resumida, los factores que influyen en la dinámica del DAM, según la Guía en mención.

Tabla 8. Factores que influyen en la Dinámica del DAM.

COMPONENTE	FACTORES	ALCANCE ESPECÍFICO
FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DEL DAM	Hidrológicos	Primarios: disponibilidad de agua, pH inicial del agua. Secundarios: concentración de elementos disueltos en el agua. Terciarios: potencial de migración o transporte de contaminantes, factores climáticos, hidrogeología del yacimiento, química natural y caudal de dilución de cuerpos de agua receptores.
	Geológicos	Primarios: tipo de yacimiento, marco litológico, cantidad y mineralogía de sulfuros, disponibilidad de oxígeno, resistencia de sulfuros a la meteorización. Secundarios: disponibilidad, mineralogía y resistencia de especies químicas neutralizantes. Terciarios: comportamiento electroquímico de los sulfuros, mineralogía de los procesos de alteración, tipo de alteración.
	Mineros	Primarios: ubicación del yacimiento, cantidad de sulfuros en los residuos, actividad microbiológica presente en rípidos de lixiviación. Secundarios: química del agua de drenaje a lo largo de la ruta de flujo. Terciarios: características físicas del material del residuo minero, factores hidrogeológicos del material del residuo.

Fuente: ATG Ltda., 2020. con información tomada de Guía metodológica sobre drenaje ácido en la industria minera (2002).

Osvaldo Aduvire (2006) en el documento técnico “Drenaje ácido de mina generación y tratamiento”, expone de manera amplia, algunas metodologías para la clasificación de materiales a estimar en la generación ácida, sobre la capacidad máxima de generación ácida, tanto en laboratorio como in situ e igualmente para predecir la generación ácida, lo cual se resume a continuación.

3.2.1. Clasificación de los materiales para estimar la generación ácida

Por lo general existen dificultades a la hora de determinar todos los factores que intervienen en el proceso de formación de aguas ácidas. Al respecto se han desarrollado diferentes métodos para determinar el potencial ácido de un drenaje, los mismos que pueden clasificarse en tres grandes grupos:

Grupo 1. Los que estiman la capacidad máxima de generación de aguas ácidas, mediante el análisis del contenido de sulfuros se calcula el total de sulfatos que la muestra puede originar.

Grupo 2. Los que estiman la capacidad real de producción de aguas ácidas en un determinado lugar y para un determinado material. Para ello, se realizan ensayos insitu aislando una parte de la mina, escombrera o presa de residuos y controlando durante un período mínimo de un año la evolución en la producción de aguas ácidas.

Grupo 3. Los que combinan los dos anteriores que estiman la producción máxima en laboratorio y ajustan el rendimiento (la cinética) con ensayos insitu.

3.2.2. Estimación de la capacidad máxima de generación ácida

Se inicia con la determinación de la composición química, analizando el contenido total en sulfuros. Con este método aparece el problema de la determinación analítica de las diferentes formas de azufre (sulfuro, sulfato y orgánico).

El análisis de las formas de azufre fue considerado en primer lugar en explotaciones mineras de carbón donde existía interés en conocer el contenido en pirita (entre otras razones debido a que puede dar lugar a problemas medio ambientales mediante la generación de aguas ácidas o a través de los gases de combustión generar lluvia ácida).

El hecho es que la aplicación de esta metodología de análisis en la predicción del potencial generador de aguas ácidas lleva implícita una serie de presunciones como son:

- Todo el azufre está como disulfuro de hierro (pirita y/o marcasita)
- Todo el disulfuro de hierro reaccionará para formar ácido (rendimiento máximo)
- Todos los minerales carbonatados se disolverán para formar disoluciones alcalinas que reaccionen y neutralicen al ácido producido a partir de la oxidación de los sulfuros de hierro.

3.2.3. Estimación de la capacidad máxima en laboratorio y ensayos insitu

Es el método más adecuado ya que combina los métodos insitu con lo que se logra estimar la cinética real, con los métodos de laboratorio que predice la generación ácida a futuro o la evolución del problema de contaminación ácida.

Si se realiza un ensayo de lixiviación en laboratorio se puede estimar una cinética de laboratorio, dicha cinética se diferencia de la real únicamente por un factor de escala que es fácil de determinar mediante la utilización de un lisímetro insitu.

Algunos autores han calculado que para cada 10 días de laboratorio le corresponden 6,3 días reales en campo.

A la vista de los mecanismos de producción de aguas ácidas descritos anteriormente, hay que señalar que una estimación por esta forma tiene únicamente una validez local, (dependerá de la granulometría, mineralogía, etc.), y puede cambiar drásticamente en cuanto se agote la capacidad amortiguadora del medio y el método empleado. Además, la utilización de estos métodos exige una inversión mínima y el desplazamiento periódico al lugar estudiado para la toma de muestras, así como de los datos de caudal de los lisímetros.

3.2.4. Metodología para predecir la generación ácida.

El objetivo de la predicción ácida es determinar, por un lado, si el volumen de los residuos de mina puede o no generar acidez mediante la aplicación de una serie de ensayos analíticos, y por otro estimar la calidad de los drenajes en función a su cinética de formación ácida aplicando el modelo más apropiado.

Ambos aspectos se ven muy influenciados por la rigurosidad de los ensayos analíticos. Por lo tanto, una vez realizado el muestreo la estrategia principal será seleccionar el método de análisis más adecuado, teniendo en cuenta ciertos factores que afectan al muestreo y al método de análisis, como el conocimiento de la geología, los costes y el tiempo de realización del ensayo.

Estos métodos de predicción de la generación ácida se basan principalmente en ensayos analíticos de tipo estático y cinético, en algunos casos se recurre a la estimación mediante programas informáticos. Para evaluar el potencial generador de las aguas ácidas de mina es necesario conocer al menos lo siguiente:

- a.** Para estimar el máximo volumen total de aguas ácidas que se pueden generar
 - Cantidad de materiales ácidos generadores (sulfuros).
 - Cantidad de materiales ácidos neutralizantes (carbonatos y otros).
 - Composición del material potencialmente generador de aguas ácidas.
 - Aporte de agua al sistema.
- b.** Para estimar el rendimiento de la producción de aguas ácidas (cinética)
 - Medidas insitu sobre la generación actual de aguas ácidas.
- c.** Para estimar los posibles cambios en la cinética de producción aguas ácidas.
 - Para cambios puntuales, en cortos períodos de tiempo: régimen de lluvias, variación de temperatura.
 - Para cambios bruscos de largo alcance: capacidad amortiguadora del medio y su evolución.

De la guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, del Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera de Chile (2015), se resalta que una vez los distintos tipos de drenaje minero son clasificados y se han determinado los factores que influyen en la tasa de oxidación de los sulfuros, se procede a la gestión de la estabilidad química (EQ) durante el ciclo de vida de una faena minera, la que requiere de una estrategia de trabajo definida y consecuente, que considere no sólo el cumplimiento de las exigencias normativas, sino que también las crecientes exigencias de la comunidad.

De esta manera, se llega al desarrollo de un Programa de estabilidad química, para las etapas de evaluación que incluye los aspectos relacionados con cada etapa, la descripción de las fuentes generadoras de DAM y los modelos para la predicción del DAM. Así mismo contempla las fases de muestreo en la gestión de la Estabilidad Química, que abarca el diseño de muestreo inicial y de largo plazo para fuentes formadas y fuentes en fase de planificación o potenciales.

➤ Sobre los ensayos

En relación con los ensayos, O. Aduvire (2006) reseña que los datos obtenidos en los ensayos estáticos y cinéticos se utilizan para hacer una clasificación de los materiales y residuos de mina y al igual permiten determinar el potencial ácido generador de los mismos. Esta información puede ser obtenida y evaluada desde

el estudio económico de la mina en su fase de exploración, durante su ciclo productivo y en la fase de clausura. El autor, al citar a la California Mining Association (1991) y la British Columbia AMD (1989), resalta que los pasos para realizar la predicción del potencial ácido generador, son:

- Definición de las unidades geológicas (geología y mineralogía).
- Desarrollo de un plan de muestreo geológico del macizo rocoso circundante.
- Selección de los ensayos estáticos y cinéticos para evaluar el potencial de la generación ácida.
- Evaluación de los criterios de muestreo y la forma de realizar los ensayos cinéticos.
- Desarrollo de un modelo apropiado para la predicción ácida.
- Elaboración de una clasificación de las unidades geológicas (basado en los resultados) en función a su capacidad de formación o no de acidez.

De otra parte, la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas (2016) del Perú, describe de manera amplia diferentes tipos de pruebas para la predicción del drenaje ácido, los cuales se resumen en la siguiente tabla, construida por el consultor.

Tabla 9. Tipo de pruebas para la predicción.

TIPO DE PRUEBAS	OBJETIVO/PASOS	TÉCNICA - NORMA O ESTÁNDAR
Estáticas	Análisis del contenido metálico de la muestra sólida. Medición del pH en pasta Determinación del contenido total de azufre y de las especies sulfurosas Titulación para la determinación del potencial de neutralización.	Prueba de Balance Acido-Base (método Sobek o EPA) Prueba Modificada de Balance Acido-Base
Extracción	Pruebas de corto plazo de extracción de lixiviado, que se utilizan para determinar los constituyentes fácilmente solubles en una muestra.	· ASTM D3987 extracción con agua destilada · Procedimiento Especial para Extracción de Desechos B.C. (SWEPE), que utiliza ácido acético como extractante; · U.S. EPA 1312, procedimiento que utiliza ácido nítrico/sulfúrico como extractante; · U.S. EPA 1312 o prueba de lixiviado TCLP, que utiliza extractante derivado del ácido acético. Prueba WET
Cinéticas	· Validar los resultados de las pruebas estáticas · Comparar el comportamiento de lixiviación de diferentes tipos o clases de roca de mina · Predecir la calidad del agua de drenaje de tipos de roca y botaderos · Seleccionar o confirmar las opciones de disposición y control.	· Prueba de confirmación de Investigación B.C.; · Prueba de intemperismo en frasco de agitación; · Prueba de extracción soxhlet; · Pruebas de celda de humedad; · Pruebas de columna de humedad; · Pruebas de lixiviación en columna; y · Parcelas de prueba de campo.

Fuente: ATG Ltda., 2020 con información tomada de Guía Ambiental para el manejo del Drenaje Ácido de Minas (2016).

Por considerarse de importancia, dado que sirve de referencia para la aplicación en la determinación de generación potencial del DAM en relaves mineros, se destaca el documento “Determinación de posible drenaje ácido de mina y caracterización de relaves mineros provenientes de la mina Cerro de Mercado, Durango, México” de Fernando Benigno SALAS URVIOLA y Otros (2018), del cual se reseña la metodología para la caracterización de los relaves mineros y la posible determinación del DAM y las técnicas y/o normas utilizadas por los autores de la investigación en la mina Cerro de Mercado, uno de los yacimientos de hierro más importantes de México, que está emplazado en una secuencia de rocas volcánicas del terciario compuesto por una brecha cuyos fragmentos son de riolacita cementada con hematita; mineralógicamente, está constituido por magnetita (Fe²⁺, Fe³⁺)₂O₄ y hematita (Fe₂O₃). En la siguiente tabla se presentan de manera resumida, los componentes que hacen parte de la investigación.

Tabla 10. Caracterización de Relaves Mineros y Determinación de posible DAM.

TIPO DE ANÁLISIS	DETERMINACIÓN	TÉCNICA O INSTRUMENTO NORMA O ESTÁNDAR
Muestreo	Área: 16.2 Ha Número muestras: 27 Profundidad: 30 cm	Norma mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006 (S 2006)

TIPO DE ANÁLISIS	DETERMINACIÓN	TÉCNICA O INSTRUMENTO NORMA O ESTÁNDAR
Granulometría	Módulo de finura (Normal: 2.5-3)	ASTM C 136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
Generación de Acidez	Acidez	Prueba modificada de balance ácido-base (ABA)
Potencial de acidez	Determinación de azufre en forma de sulfato y azufre total	Método turbidimétrico (APHA 2003).
Pruebas de movilidad	Movilidad de cromo y antimonio	Método de lixiviación con agua en equilibrio en CO ₂ Norma NOM-141-SEMARNAT-2003
Potencial de Neutralización (PN)	Medición cualitativa de carbonatos (Kg CaCO ₃ /t)	NOM-141-SEMARNAT-2003, anexo 5, punto 4.4.1
PN/PA	Si PN/PA<3: genera drenaje ácido, peligroso	NOM-157-SEMAR- NAT-2009
Metales y Metaloides	Análisis de Ag, As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe y Al	Análisis semicuantitativo por fluorescencia de rayos X Método US-EPA 6200 Valores del análisis: norma NOM-157-SEMARNAT-2009

Fuente: ATG Ltda., 2020 con información tomada de Salas Urviola y Otros (2018)

3.3. Definición y modelamiento de la generación del potencial ácido a partir de información de las etapas de exploración, explotación, cierre y post cierre

3.3.1. Generación del potencial ácido a partir de la etapa de exploración.

En el documento DRENAJE ÁCIDO DE LA MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO, del Instituto Geológico Minero de España (2006), O. Aduvire expone que la predicción de la generación ácida debe iniciarse desde la etapa de exploración del yacimiento, para ello debe realizarse la recogida de muestras en zonas mineralizadas y estériles con el fin de efectuar su correspondiente análisis ácido-base descriptivo. Estos resultados preliminares permitirán a que en la fase de planeamiento de la mina se considere o no el tratamiento de los drenajes ácidos que podrían generarse en la fase de explotación y cierre de la instalación.

También debe realizarse un reconocimiento de las unidades geológicas en donde se encuentra emplazado el yacimiento y las áreas sobre las que se ubicarán las escombreras y presas de residuos, esto ayudará a conocer mejor la litología, la mineralogía y la continuidad de las unidades geológicas, así como el tipo de residuo o estéril que se generará en el proceso productivo. De igual forma la comparación con minas vecinas de áreas geológicas y paleo-ambientales similares, ayudarán a predecir el volumen de drenaje ácido que se va a emitir o generar.

Todo proceso de predicción de generación ácida se inicia con la definición del volumen de muestreo en la fase de exploración, para cada una de las unidades

geológicas que comprende el yacimiento a explotar. Entre los factores geológicos que regulan la generación de los drenajes ácidos podemos considerar:

- Estado de oxidación de los minerales y materiales.
- Composición mineralógica de los materiales ácido generadores y sulfuros.
- Textura y desarrollo cristalino en los sulfuros.
- Presencia de minerales ácido consumidores.
- Presencia de estructuras rocosas que influyen sobre la permeabilidad.

El autor, expone como el objetivo de la predicción ácida es determinar, por un lado, si un determinado volumen de materiales o residuos de mina pueden o no generar acidez, mediante la aplicación de una serie de ensayos analíticos y, por otro estimar la calidad de los drenajes en función a las condiciones medioambientales del lugar.

Teniendo en cuenta que con el tiempo ciertos minerales se comportan como ácido productor y otros como base productora que neutralizan la acidez, conociendo esta característica se puede predecir la calidad del agua de mina. Para ello se recurre al empleo de uno o varios ensayos estáticos en el que se determina el potencial ácido/base de los materiales, así como al empleo de ensayos cinéticos (principalmente métodos de lixiviación) insitu o en laboratorio en los que se reproducen las condiciones ambientales de campo (físicas, químicas y biológicas).

Los ensayos estáticos, se basan en la evaluación del balance entre el potencial de generación ácida (oxidación de minerales sulfurosos) y la capacidad de neutralización ácida (disolución de carbonatos y otros minerales que aportan alcalinidad). Entre las técnicas de análisis estático de mayor aplicación tenemos la *relación ácida/base*, el ensayo de *generación ácida neta (NAG)* y la medida de conductividad (EC) y pH en medio saturado.

Uno de los ensayos estáticos más utilizados en la predicción de la generación ácida de mina es la relación ácida/base (acid-base accounting ABA), que se obtiene por comparación entre la máxima acidez potencial (maximum potential acidity MPA) representado por el azufre total en la muestra y la neutralización potencial (neutralization potential NP).

Los ensayos cinéticos se diferencian de los estáticos en que éstos pretenden reproducir en laboratorio las condiciones naturales de las reacciones de oxidación. Frecuentemente ayudan a confirmar los resultados de los ensayos estáticos y sirven para estimar de forma rápida cuando y como va a ocurrir la generación ácida.

Estos ensayos se realizan en muestreos de grandes volúmenes y en períodos de tiempo muy largos y dan información sobre el rango de oxidación del sulfuro mineral, por lo tanto, indican la producción ácida y la calidad del agua del drenaje, que sirven para evaluar el tratamiento requerido y adoptar las medidas de control necesarias.

Los ensayos cinéticos pueden emplearse para estudiar el comportamiento de diferentes variables que influyen en la generación del potencial ácido, como la temperatura de la muestra, la acción de las bacterias, etc. Estos ensayos tienden a acelerar los procesos de oxidación natural observados en campo, para ello, se suele evaluar los cambios de acidez y pH, así como el contenido de sulfato y la concentración de metales formadores de acidez.

En la Guía de Drenaje Ácido Global de Roca de INAP (2014), los autores plantean que la generación, liberación, transporte y atenuación del ARD son intrincados procesos regidos por una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. El hecho que el ARD se convierta en una preocupación ambiental depende en gran medida de las características de las fuentes, trayectorias y receptores involucrados. La caracterización de estos aspectos es por tanto crucial para la predicción, prevención y manejo del ARD. Los programas de caracterización ambiental están diseñados para recolectar la suficiente información para responder a las siguientes preguntas:

- ¿Es probable que ocurra el ARD? Qué tipo de drenaje se espera (ARD/NMD/SD)?
- ¿Cuáles son las fuentes del ARD? ¿Cuánto ARD será generado y cuándo?
- ¿Cuáles son las trayectorias más importantes que transportan los contaminantes al medio ambiente receptor?
- ¿Cuáles son los impactos ambientales esperados de la liberación del ARD al medio ambiente?

Las características geológicas y minerales del yacimiento y la roca huésped son los principales controles del tipo de drenaje que se ha generado como resultado de la minería. Posteriormente, el clima del sitio 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. Para evaluar estas cuestiones, se requiere del conocimiento y concurso de varias disciplinas.

Las características geológicas de los depósitos minerales ejercen importantes y predecibles controles sobre la firma ambiental de las áreas mineralizadas (Plumlee, 1999, según INAP, 2009). Por tanto, se deberá realizar una evaluación preliminar del potencial del 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 (ej: agua, tierra, vegetación y biota) también pueden proveer una indicación del potencial del ARD y sirve para documentar las potenciales concentraciones de metal naturalmente elevadas.

De otra parte, la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas (2016) de Perú, plantea que la identificación prematura de los materiales potencialmente generadores de ácido y el desarrollo de un plan de manejo adecuado de los desechos pueden reducir considerablemente los problemas ambientales de largo plazo y los costos de las medidas correctivas. Además, la identificación prematura y la incorporación de medidas de control, pueden reducir las obligaciones financieras de mantener instalaciones de recolección y tratamiento a largo plazo, por ejemplo, mantener a perpetuidad una planta de tratamiento químico. Es importante que tanto la compañía minera como las autoridades competentes efectúen las pruebas suficientes y apropiadas para garantizar que todos los problemas potenciales hayan sido identificados y tratados.

De ahí que establece la importancia de definir los Objetivos de la Predicción, donde plantea dos objetivos o etapas principales en las pruebas de predicción:

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

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

1. Definición de los objetivos.
2. Identificación de los componentes del lugar y la geología de cada uno de éstos.
3. Diseño e implementación de un programa de muestreo, con la asistencia de geólogos y los ingenieros de planificación de la mina.
4. Evaluación de las muestras mediante pruebas estáticas para la caracterización de la roca, y pruebas cinéticas para la caracterización de la calidad del agua.
5. Interpretación de los resultados.
6. Identificación de las medidas de control y repetición del muestreo y prueba, si fuese necesario.

3.3.2. Generación del potencial ácido a partir de la etapa de explotación

En el documento DRENAJE ÁCIDO DE LA MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO, del Instituto Geológico Minero de España (2006), O. Aduvire, describe los procedimientos de predicción del potencial ácido generador en zonas mineras, que comprenden las siguientes actuaciones:

- Comparación con minas similares y vecinas.
- Muestreo sistemático para recogida de muestras representativas.
- Pruebas estáticas sobre las muestras.
- Pruebas cinéticas basadas en la reproducción de las condiciones insitu.
- Modelado y simulación de los procesos ácido generadores.

El autor resalta aspectos importantes como factores que influyen en la generación del DAM, destacando que el potencial ácido generador de los residuos de mina está en función al tipo de material movido en las actividades mineras, tales como: mineral gastado de las pilas de lixiviación, residuos y rechazos de la planta de beneficio, estériles de las escombreras y de las labores de desarrollo. También hay que tener en cuenta la generación ácida producida por las superficies descubiertas tanto en minería a cielo abierto (taludes, bancos, etc.) como en minados subterráneos (galerías, chimeneas, pozos, etc.). De igual forma influyen en la formación de aguas ácidas el tamaño de las partículas, la variedad mineralógica, la calidad del agua de los drenajes, ciertas características físico-químicas del entorno y las condiciones climáticas del lugar.

En la Guía de Drenaje Ácido Global de Roca, INAP (2014) se plantea que uno de los objetivos principales de la caracterización del sitio es la predicción del potencial de ARD y 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 con la planeación general del proyecto. La integración de los trabajos de caracterización y predicción dentro de la operación de la mina, son elementos claves para el manejo exitoso del ARD. La exacta predicción de las futuras descargas de la mina requiere el entendimiento de los procesos de muestreo, pruebas y análisis utilizados, las consideraciones de las futuras condiciones físicas y geoquímicas y la identidad, ubicación y reactividad de los minerales contribuyentes.

Los programas de predicción necesitan ser elaborados a la medida de la mina en cuestión. Los objetivos de un programa de predicción pueden ser variables. Por ejemplo, pueden incluir la definición de los requerimientos de tratamiento de agua, 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.

Las predicciones de la calidad del drenaje se hacen en un sentido cualitativo y cuantitativo. Las predicciones cualitativas se enfocan en evaluar en donde se pudieran desarrollar las condiciones ácidas en los desechos de mina, con la correspondiente liberación de metales y acidez al drenaje de mina. En donde las predicciones cualitativas indiquen una alta probabilidad de generación de ARD, la atención se vuelve a la revisión de alternativas para evitar el ARD y el programa de predicción se reenfoca. La predicción cuantitativa de la calidad de agua de mina puede ser un reto debido a la amplia gama de reacciones involucradas y los

períodos potencialmente largos sobre los cuales se producen estas reacciones. A pesar de estas incertidumbres, las predicciones cuantitativas que han sido desarrolladas usando suposiciones realistas, han probado ser de valor significativo para la identificación de las opciones de manejo del ARD y la evaluación de los potenciales impactos ambientales.

La predicción de la calidad de agua de la mina generalmente está basada en uno o más de los siguientes aspectos:

- 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 y otras.
- Los sitios análogos históricos o en operación son también valiosos en la predicción del ARD.

Por su parte, la Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, del Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera de Chile (2015), en su Programa de Estabilización Química, destaca las fuentes potencialmente generadoras de DAM y describe el alcance específico que debe tener en su caracterización y predicción cada una de estas fuentes, tal como se muestra en la siguiente tabla, lo cual se considera de gran utilidad para la conformación de lineamientos.

Tabla 11. Fuentes potencialmente generadoras de DAM.

COMPONENTE	FUENTE	ALCANCE ESPECÍFICO
IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LAS FUENTES GENERADORAS DE DAM	Botaderos	Historia de su construcción (Método de disposición del material, edad del botadero) Información del plan minero Secuencia de llenado Tonelaje y volúmenes Ganulometría / distribución del material Geología: litología, alteración, mineralogía (LAM) Información del modelo de bloques y modelo de leyes
	Depósitos de relaves	Tipo de depósito (embalse, tranque, espesado, filtrado, etc) Tipo de yacimiento (oro, cobre, hierro, etc) Etapa en que se encuentra el proyecto Análisis de la información histórica del depósito y su variabilidad en el tiempo Secuencia de llenado Balance metalúrgico Geología: mineralogía del material que se procesa Balance hidrológico, considerando el clima y manejo de agua (circulación, recirculación, lugar de entrada y salida, etc) Estudios de geofísica para una caracterización completa, incluyendo la base del depósito
	Depósitos de lixiviación	Diseño de la pila o ripio Secuencia de depósito del material Geología y mineralogía Tonelaje y volumen Información hidrogeológica del sistema

COMPONENTE	FUENTE	ALCANCE ESPECÍFICO
		Modelo hidrogeoquímico Información metalúrgica Leyes de recuperación y estimación de leyes remanentes Caracterización de las soluciones de recirculación Información de lavados del depósito o lavado final
	Mina a cielo abierto y/o subterránea	Geología regional Geología del frente: litología, alteración y mineralización (DAM) Mapeo del frente: zonas mineralizadas y zonas estériles Modelo estructural Modelo hidrogeológico Información sobre permeabilidad e impermeabilidad del sistema

*Fuente: Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera – 2015.
 Adaptado: ATG Ltda., 2020.*

3.3.3. Generación del potencial ácido a partir de las etapas de cierre y post cierre

En la Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras (2015), se plantea que el Drenaje Minero (DM) se puede producir en dos etapas, durante la etapa de explotación del rajo y/o al finalizar dicha etapa. Por otra parte, al finalizar las actividades de explotación, las depresiones creadas por la extracción del mineral se pueden convertir, en función de las condiciones específicas del lugar, en lagos (Pit Lakes), alimentados principalmente por el agua subterránea que hace subir los niveles hasta recuperar su nivel freático. La velocidad de este proceso es variable para cada proyecto, por ejemplo, en zonas áridas donde las tasas de descarga de agua subterránea son bajas, la formación del lago puede tardar décadas o siglos (INAP, 2012).

El contacto del agua con el material que queda expuesto en el rajo puede provocar el deterioro de su calidad, alcanzando niveles de pH muy bajos, además de contener concentraciones muy elevadas de metales. Este es un problema ambiental a largo plazo, sobre todo teniendo en cuenta el volumen de agua que suponen. Si bien, en estas zonas, los procesos de evaporación pueden llegar a ser muy altos debido a la gran superficie de agua que queda expuesta, esto sólo consigue aumentar más aún la concentración de sólidos disueltos. Debido a todo esto, los lagos pueden funcionar como fuentes de DM en el largo plazo, por lo que es muy importante predecir el proceso para evaluar las posibles medidas de control (INAP, 2012).

En el documento se plantea mediante la evaluación de la estabilidad química, que en las etapas de cierre y post-cierre de las operaciones mineras, se definan los objetivos y la forma de desarrollo, así como el plan de cierre, lo cual se presenta en las figuras 1 y 2.

EVALUACIÓN de la ESTABILIDAD QUÍMICA			
ETAPA de la FAENA	Objetivos	Desarrollo	Fases
Desmantelamiento y Cierre / Post-Cierre	Interpretar los datos generados a lo largo de todo el ciclo de vida	El personal calificado debe realizar la interpretación de todos los datos generados en todas las fases de Plan para la toma de decisiones en el desmantelamiento y cierre del proyecto.	FASE 5 Monitoreo MONITOREO (Fase continua)
	Diseñar un plan de monitoreo post-cierre	Será diseñado por el personal calificado	
	Implementar y desarrollar el plan de monitoreo post-cierre	Será implementado y diseñado por el personal calificado	
	Evaluación de resultados	Evaluación de la efectividad e idoneidad del proceso de caracterización y del plan de monitoreo post-cierre	

Figura 1. De la Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras (Chile). Mina: a rajo abierto y subterráneo.
 Fuente: Modificado de INAP, 2012.

Objetivos

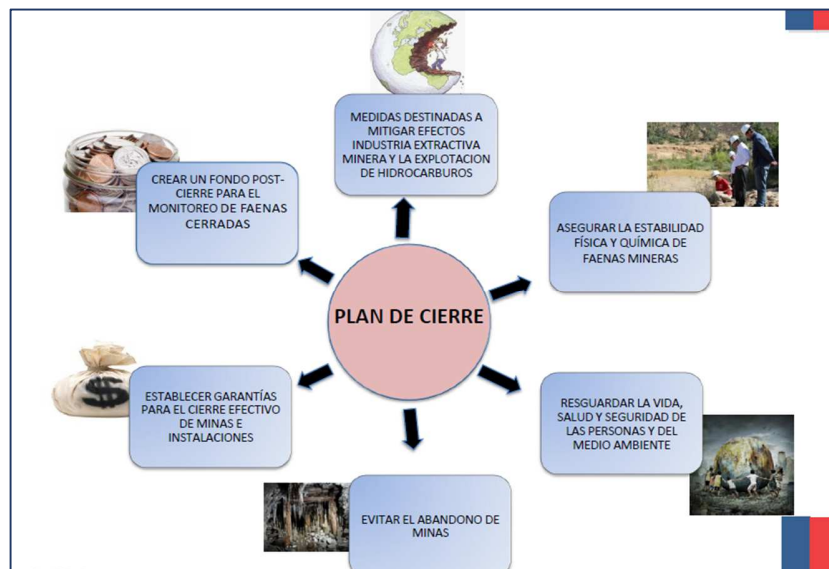


Figura 2. Ley 20.551, regula el cierre de faenas e instalaciones mineras, ministerio de minas gobierno Chile.

De otra parte, se plantea la creación de un fondo post-cierre, definiendo la finalidad y los mecanismos de su composición y administración, lo que se representa e manera conceptual en las figuras 3 y4, a continuación.

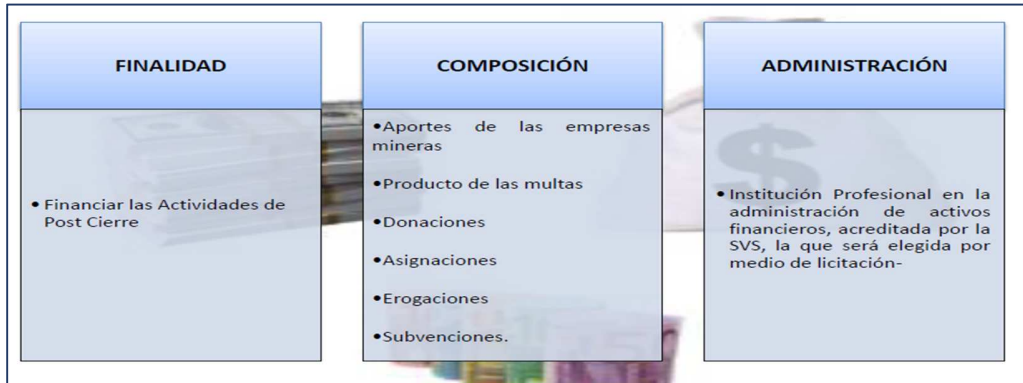


Figura 3. Fondo Post Cierre

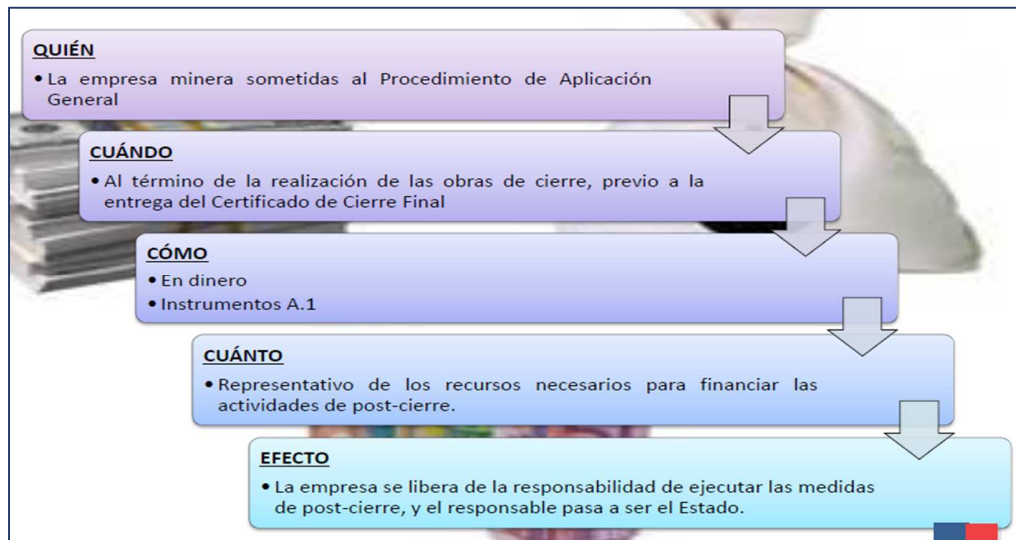


Figura 4. Aporte Fondo Post Cierre

En la Guía para la elaboración de planes de cierre de minas del Ministerio de Energía y Minas del Perú se describe de manera esquemática, según figura 5, los requisitos de presentación de estudios y los procesos para la actualización de los planes de cierre y la obtención del certificado de cierre

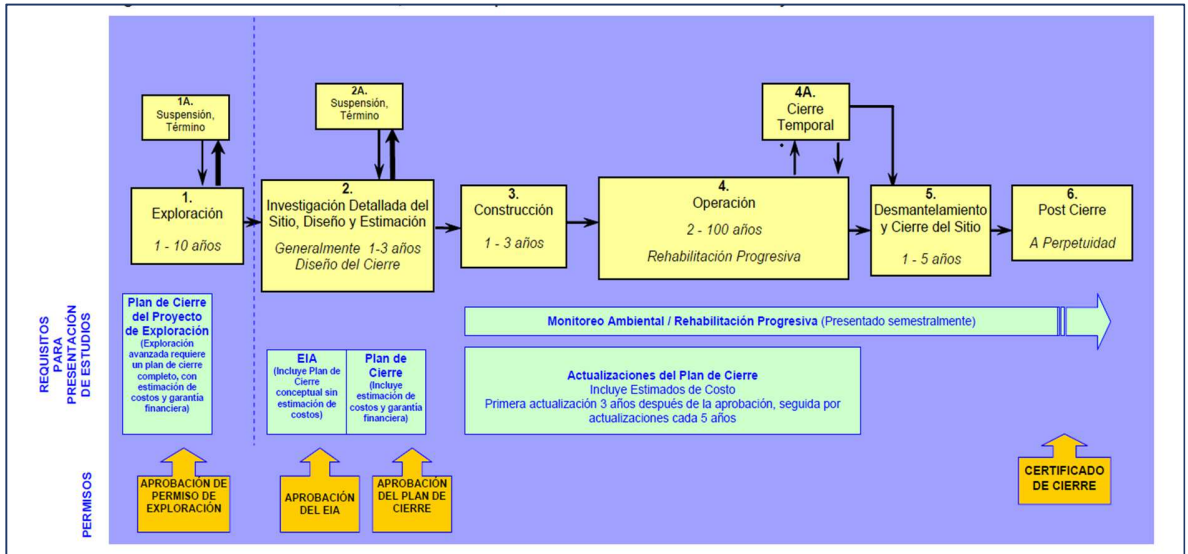


Figura 5. Ciclo de Vida de la Mina, con los Requisitos de Presentación de Estudios y Permisos de Cierre.

Fuente: Guía para la elaboración de planes de cierre de minas Ministerio de energía y minas (Perú).

NOTA: Esta figura ha sido adaptada de “Metal Mining Sustainable Development North América”, desarrollada por el proyecto “Global Mining Initiative” (GMI).

La filosofía para el Diseño de Cierre se basa en las siguientes cuatro premisas:

- **Primero**, la minería genera cambios permanentes en las condiciones superficiales y sub-superficiales del terreno y los cursos de agua, y en muchos casos crea cambios permanentes en la comunidad local.
- **Segundo**, los impactos ambientales negativos de la actividad minera pueden ser manejados de tal manera que el terreno y los cursos de agua retornen a una condición en que puedan ser utilizados después de finalizada la actividad minera.
- **Tercero**, la minería puede ser manejada de tal forma que los impactos sociales después del cierre sean minimizados.
- **Cuarto**, la mejor y más factible forma para lograr un legado positivo es “empezar por el final”, y considerar desde las primeras etapas del proyecto los efectos y las potenciales consecuencias que pueden ocurrir a largo plazo y manejarlos apropiadamente.

En la práctica, el diseño del cierre requiere que el titular minero adopte dos formas de trabajo:

- Una estrecha coordinación entre el diseño de la mina y los cambios en el plan de operaciones durante la vida de la mina, considerando las condiciones ambientales y sociales durante la operación y el cierre.
- Comunicación permanente y compromiso entre el titular minero y los gobiernos, así como las comunidades y grupos de interés potencialmente

afectados para definir objetivos realistas y desarrollar e implementar planes de manejo adecuados.

La Guía Ambiental para el Cierre y Abandono de Minas de Perú (2016), 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. De igual manera es 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.

Al revisar la situación de cierre de minas en el contexto internacional, Ospina & Molina en *Legislación colombiana de cierre de minas, es realmente necesaria? Universidad Nacional (2013)* reseñan que en Estados Unidos existe una bifurcación legislativa en el caso del cierre de minas de carbón y de roca dura (agrupadas aquí como metálicas, materiales de arrastres, calcáreos, entre otros) quizá se deba a la tradición minera del país. La primera norma fue expedida por el gobierno federal en el año de 1977 y corresponde a la Ley de Control y Recuperación en Minería Superficial de Carbón (Surface Mining Control and Reclamation Act), SMCRA por sus siglas en inglés. Aún está vigente y representa el primer instrumento creado en Estados Unidos para el control del cierre y abandono de minas de carbón. Ante todo, es una pieza preventiva de legislación ambiental y de regulaciones que describen objetivos precisos del plan de recuperación y requerimientos constructivos de mantenimiento. Algunos Estados como, por ejemplo, Colorado, expidieron sus propias leyes a partir de la expedición de la SMCRA, en el año de 1979. La constante observada muestra que siempre se hace la diferenciación para minas superficiales de carbón y para otro tipo de minería. Las leyes aprobadas por los gobiernos de los Estados deben cumplir por lo menos con que sean igual de estrictas que la ley federal, razón por la cual muchos otros estados han adoptado el SMCRA.

Para roca dura (no carbonífera) la responsabilidad legislativa reposa sobre los Estados, no existe Ley Federal que sea referente como en el caso del carbón, razón por la que existen diferentes normas. Arizona es el único Estado que mantiene un sistema unificado (al gobierno federal) de permisos para recuperación de minas no carboníferas.

En cuanto al tema de las garantías financieras que deben mostrar las empresas mineras con objeto de asegurar el cumplimiento de sus planes de cierre y abandono, Estados Unidos desarrolló un complejo instrumento económico para asegurar este objetivo; su característica principal se centra en que además de contar con la garantía misma, cuenta con un acompañamiento de permisos (permitting), inspecciones y presiones legales.

Es de importancia resaltar el programa Abandoned Mine Land (AML) que significa Tierras de Minas Abandonadas, instituido por el título IV de la SMCRA y cuyo objetivo específico es promover la recuperación de minas abandonadas. Se trata de

un importante instrumento legislativo del cual hacen parte las principales agencias mineras estadounidense, tales como: Bureau of Land Management (BLM), Environmental Protection Agency (EPA), Mine Safety and Health Administration (MSHA), National Park Services (NPS), Office of Surface Mining (OSM), U.S Geological Survey (USGS), Forest Service y Army Corps of Engineers (USACE). En términos de cuantía el AML es un programa de grandes dimensiones. Según un inventario del Bureau of Land Management (BLM), actualizado para el 10 de enero de 2013, Estados Unidos contaba con cerca de 39.000 minas abandonadas.

3.4. Alternativas para la prevención, control y tratamiento del drenaje ácido minero - DAM

En el contexto internacional las alternativas para la prevención, control y tratamiento de drenajes ácidos de mina, se abordan principalmente a través de guías y documentos técnicos, mientras que, para el caso colombiano, ante la ausencia de guías temáticas, se abordan generalmente desde el ámbito académico.

En la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas, Perú (2016), se hace referencia a las medidas tomadas para prevenir o limitar la generación o migración de drenaje contaminado que podría originar un impacto ambiental adverso. El agua de drenaje contaminado o DAR, que surge de la oxidación y la generación de ácido de minerales sulfurosos, puede tener diferentes características: neutro con concentraciones elevadas de sulfatos; neutro con concentraciones elevadas de metales; ácido con tenores elevados de metales; pH bajo, alto nivel de sulfatos y acidez.

En este documento se establece que en el control del DAR se deben reconocer dos términos diferentes:

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

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

Así mismo existen tres enfoques para el control del DAR:

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

En la guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015), se contemplan las etapas para asegurar la estabilidad química relacionadas con la prevención, control y tratamiento de DAM.

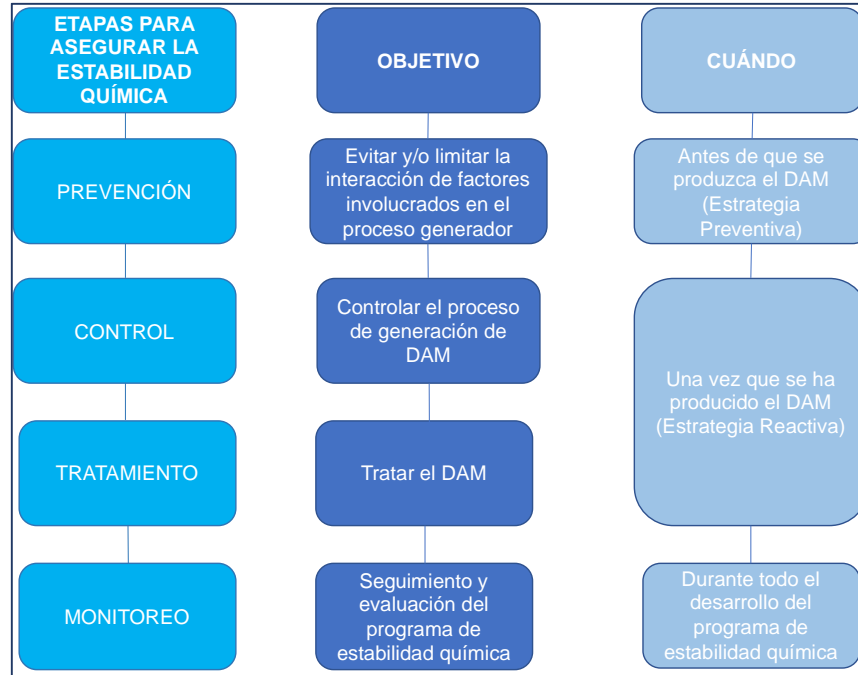


Figura 6. Clasificación de las etapas para asegurar la estabilidad química.

Fuente: Modificado de la Guía metodológica para la estabilización de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015).

Las principales estrategias y/o medidas de prevención y/o control del DAM establecidas en la guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015), se encuentran en las siguientes tablas.

Tabla 12. Estrategias y/o medidas de prevención y/o control del DAM.

Objetivo	Estrategia / Medida		Convenional No convenion. Emergente	Prevención	Control	Tipo de fuente				
						Botadero	Relaves	Depósito de lixiviación	Rajo/ Mina Subt.	
Gestión del material con capacidad de reacción (Manejo estratégico)	1. Minería secundaria <i>Secondary mining</i>		E		*	◇	◇	◇	◇	
	2. Manejo de material <i>Material handling</i>	2.1 Planificación de la explotación/Minería selectiva <i>Mine planning/selective mining</i>	C	*					◇	
		2.2 Manejo selectivo <i>Selective handling</i>	C/E	*		◇	◇	◇		
		2.3 Mezcla de materiales <i>Blending and Layering (material mixing)</i>	Enmiendas alcalinas <i>Alkaline amendments</i>	C	*	*	◇	◇		◇
	3. Microencapsulación/Pasivación <i>Microencapsulation/Passivation</i>	NC		*	*	◇	◇		◇	
	4. Prevención/Control Microbiológico <i>Prevention/Control at Microbial Level</i>		E	*	*	◇	◇	{◇}	◇	
	5. Gestión de relaves <i>Tailing management</i>	5.1 Relaves deshidratados <i>Dewatering of tailings</i>	Relaves espesados <i>Thickened tailings</i>	C	*			◇		
			Relaves filtrados <i>Filtered Tailings</i>	C	*			◇		
			Relaves en pasta <i>Paste Tailings</i>	C	*			◇		
		5.2 Desulfuración <i>Desulfurization</i>		NC	*			◇		
5.3 Drenaje de relaves <i>Drained tailings</i>		NC	*	*		◇				

Fuente: Guía metodológica para la estabilización de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015).

Tabla 13. (Continuación) Estrategias y/o medidas de prevención y/o control del DAM.

Objetivo	Estrategia / Medida		Convencional No convencional. Emergente	Prevención	Control	Tipo de fuente			
						Botadero	Relaves	Depósito de lixiviación	Rajo/ Mina Subt.
Gestión del agua y/o de la aireación	6. Control del nivel de agua <i>Dewatering</i>		C	*	*	(o)			◇
	7. Desvío cursos de agua <i>Diversion/Streamflow regulation</i>		C	*		◇	◇	◇	◇
	8. Barreras ingenieriles <i>Artificial material</i>	8.1 Sellos <i>Seals</i>	C	*					◇
		8.2 Liners <i>Liners</i>	C	*		◇	◇	◇	
	9. Cubiertas <i>Covers</i>	Material natural <i>(Natural material)</i>	9.1 Cubiertas de suelo <i>Soil covers</i>	C	*		◇	◇	◇
			Cubiertas repelentes de agua <i>Water covers</i>	C	*		◇	◇	◇
		Tecnológicas <i>Technological</i>	9.2 Cubiertas de agua	NC	*			◇	
			9.3 Cubiertas de materia orgánica	NC	*		◇	◇	
	Otros	10. Establecimiento de plantas <i>Plant establishment</i>		C	*	*	◇	◇	◇
		11. Facilitar la atenuación natural <i>Encouragement of natural attenuation</i>		E		*	◇	◇	◇
(*) 12. Co-disposición de botaderos y relaves <i>Co-disposal in waste dumps and TSF</i>		NC	*	*	◇	◇			
13. Disposición submarina de relaves <i>Co-disposal in waste dumps and TSF</i>		NC	*			◇			

(*) Actualmente, prohibida bajo legislación chilena.

Fuente: Guía metodológica para la estabilización de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015).

Dentro de las alternativas de control y tratamiento la mayoría de los documentos analizados y específicamente en el artículo Drenajes Ácidos de Mina- Formación y Manejo, Université du Québec à Montréal UQÀM (2017) se realiza la clasificación en dos grandes grupos que son: activos y pasivos.

Se entiende por métodos de tratamiento activo aquellos que requieren de una supervisión constante del sistema, de electricidad, insumos químicos, remoción de subproductos, entre otros. Los procesos unitarios generales para este método de tratamiento son:

- Fase previa de oxidación del hierro ferroso al estado férrico (a través de aireación natural o mecánica para disminuir la cantidad de insumos químicos a aplicar)
- Adición de un agente neutralizante (carbonato de calcio, cal hidratada, soda caustica, entre otros), que permite ajustar el pH a valores permisibles para descarga y precipita metales que se hacen insolubles en pH neutros (hierro, cobre, cadmio, plomo, entre otros)
- Adición de un agente floculante para remover los sólidos suspendidos remanentes en el agua
- Si el drenaje presenta elevadas concentraciones de sulfatos y cloruros se debe hacer una remoción de estos ya que las bases no los remueven eficientemente (se utilizan resinas de intercambio iónico, sistemas de membranas, adición de reactivos como el hidróxido de aluminio, o la remoción por vía biológica a través de la reducción de sulfatos a sulfuros)
- Existen métodos de tratamiento para los drenajes de mina, que no necesariamente requieren la adición de una base, ya que son drenajes neutros de mina a los que se les puede aplicar un agente coagulante para remover algunos metales, sulfatos y cloruros presentes.

Los sistemas de tratamiento pasivos constituyen una de las herramientas más atractivas para las empresas mineras, especialmente en la fase de desmantelamiento y abandono ya que estos requieren un mínimo de intervención humana, rara vez requieren manejo de subproductos y no es necesario el uso de electricidad y reactivos químicos.

Entre los principales métodos pasivos se tienen:

- Uso de humedales, canales de caliza abiertos y cerrados, barreras reactivas permeables, entre otros.
- Canales de caliza abiertos y cerrados los cuales están diseñados para efluentes con bajas concentraciones de hierro y metales, ya que la precipitación de costras de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ pueden cubrir la piedra caliza y disminuir su capacidad de neutralización.
- Las barreras reactivas constituyen uno de los principales métodos alternativos a los humedales ya que estos requieren grandes extensiones de tierra para que puedan funcionar y no así las barreras. (contienen una capa de agua, otra de materia orgánica y finalmente una de caliza, en donde el DAM entra, la materia orgánica y los microorganismos presentes en ella reducen los sulfatos y precipitan los metales, y para concluir, se corrige el pH del drenaje con el lecho de caliza).

Como subproductos del tratamiento se generan principalmente lodos neutros con altos contenidos de ferrihidrita, metales precipitados y en algunos casos sulfato de calcio, que en la actualidad no están siendo aprovechados para usos comerciales,

y solo en la codisposición con minerales generadores de acidez. De ellos se podrían obtener pigmentos, materiales para construcción y otra serie de aplicaciones que vale la pena investigar para generar fuentes de ingreso alternativas en los lugares en donde los DAM afectan las comunidades.

En la guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015), se realiza una caracterización adicional para los sistemas de tratamiento, ya que incluyen dentro de los métodos pasivos y activos la clasificación de bióticos y abióticos y también se realiza la clasificación por tipo de tratamiento así: convencional, no convencional y emergente.

En la Guía de Drenaje Ácido Global de Roca, INAP (2014), se establecen algunas consideraciones relacionadas con las características del sitio de la mina que influenciarán la construcción, operación y mantenimiento de una planta de tratamiento de drenaje tales como: diseño de la mina y topografía; espacio; clima; fuentes de drenaje de mina que alimentan la planta de tratamiento; ubicación y usuarios de agua tratada. En esta guía también se realiza una clasificación de las tecnologías de tratamiento según el objetivo de tratamiento y las agrupan en tecnologías para neutralización, remoción de metales, desalinización y para el tratamiento específico de contaminantes.

En la guía para la gestión integral agua y minería en cuencas áridas y semiáridas, programa hidrológico internacional de la UNESCO (2009), se menciona que actualmente los diferentes sistemas que pueden ser catalogados como pasivos pueden ser agrupados en tres categorías diferentes (Younger et al., 2002):

- Sistemas pasivos tipo “humedal” (Wetland-type passive-systems).
- Sistemas Pasivos de Medio Inorgánico (IMPs, Inorganic Media Passive systems).
- Sistemas de flujo subsuperficial con actividad bacteriana sulfato-reductora (SFBs, Sub- surface Flow Bacterial reduction systems).

Para el caso de los documentos internacionales analizados, se mencionan, entre otros, los siguientes tipos de tratamiento y medidas de control para la generación del DAM:

- Sistema sustrato disperso alcalino (DAS)
- Drenaje anóxico de calizas (ALD)
- Sistemas de flujo vertical
- Sistemas de producción sucesiva de alcalinidad (SAPS)
- Estanques de caliza y canales abiertos de caliza (OLC)
- Barreras permeables reactivas (BPR)
- Metodologías de adsorción química
- Reactores bioquímicos
- Lagunas de sedimentación y lechos filtrantes

- Sistemas de coberturas para el control de DAM
- Humedales naturales y artificiales

Para el contexto colombiano la temática es abordada en documentos académicos, tales como tesis, artículos y presentaciones. En la tesis denominada “Manejo de drenajes ácidos de mina (DAM), Universidad Industrial de Santander”, Colombia (2009) se aborda la temática de manejo del DAM y se menciona que la geología juega un papel muy importante en la generación del DAM, en virtud de que la composición mineralógica de las rocas con altos contenidos de sulfuros incide de forma directa en la composición del DAM. La prevención del drenaje ácido es preferible a su tratamiento. En algunos casos (especialmente para escombreras y balsas de retención) es posible prevenir la generación de lixiviados ácidos con el uso de coberturas que previenen el contacto entre los sulfuros, el oxígeno y el agua. Es primordial identificar el problema y caracterizarlo para definir el sistema de manejo más adecuado.

En la tesis se menciona que el control de la generación de ácido se puede hacer a través de la remoción de uno o más de los componentes esenciales: azufre, aire, agua. Se distinguen dos tipos de tratamiento para el DAM: activo y pasivo.

Por "tratamiento activo" se entiende la aplicación de los métodos tradicionales de depuración de aguas residuales, que generalmente incluyen el uso de reactivos sintéticos (en este caso, álcalis y floculantes), uso de energía eléctrica (para bombeo, para la mezcla de reactivos con agua entre otros), sedimentación intensificada (en un estanque o en una clarificadora).

Por “tratamiento pasivo” (termino que no existía antes del año 1990; Cohen and Staub, 1992) implica tratamiento en sistemas estáticos (sin bombeo etc.) que contienen materias naturales (abono, piedra caliza etc.). Los sistemas pasivos provocan la mejora de la calidad del agua por reacciones biogeoquímicas, sin el uso de reactivos sintéticos y sin la aplicación de energía externa.

El sistema de tratamiento a utilizar debe estar asociado a factores específicos de la zona (topografía, área disponible, facilidad de acceso, facilidad de mantenimiento, entre otros).

Se concluye en la tesis que para minas con la misma formación geológica es muy probable la aplicación de transferencia de tecnología, ya que los DAM tendrán características similares.

En el artículo denominado “Impacto de los drenajes de mina sobre los microorganismos del suelo”, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, Universidad Central, Bogotá, D.C., Colombia (2020), se establece que durante la explotación minera los minerales sulfurados presentes en el suelo entran en contacto con el

agua y el oxígeno del ambiente generando drenajes de mina que pueden ser corrosivos, tóxicos e, incluso, radioactivos. Se clasifican como drenajes ácidos de mina (DAM) si el pH es $<4,5$ o como drenajes neutros de mina (DNM) cuando el pH se encuentra entre 4,5 y 7,5. Los DAM presentan un alto contenido de sulfatos y metales disueltos, como Mn^{2+} , Fe^{3+} , Al^{3+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} y Zn^{2+} y As, en tanto que los DNM contienen menor concentración de sulfatos disueltos pero pueden contener Cd^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} (Nordstrom, et al., 2015).

Las características fisicoquímicas de los drenajes de mina y la forma en que son dispuestos sobre el suelo producen efectos negativos sobre la composición de las comunidades microbianas asociadas con los ciclos biogeoquímicos (Pereira, et al., 2015). Los metales presentes en los DAM son bioacumulados a nivel celular generando toxicidad por la obstrucción del sitio activo de algunas enzimas, así como afectación en la síntesis del ADN y las proteínas (Jaishankar, et al., 2014). Por otra parte, aun cuando los DNM contienen menor concentración de metales y sulfatos, estos ocasionan la precipitación de minerales que incrementan la salinidad del suelo y tienen un impacto en la diversidad y la abundancia de las comunidades microbianas (Pereira, et al., 2014). También se ha encontrado que los drenajes de mina favorecen la presencia de géneros de bacterias acidófilas, oxidadoras y reductoras de hierro y azufre como las bacterias sulfato reductoras, que pueden subsistir en condiciones de alta concentración de metales, poca concentración de nutrientes, pH ácido y sulfatos (Méndez-García, et al., 2015) cambiando la composición microbiana original.

En el artículo denominado “Prevención de drenajes ácidos de mina utilizando compost de champiñón como enmienda orgánica” Universidad Central, Bogotá, D.C., Colombia (2017), se realizó la evaluación del uso del compost de champiñón como enmienda de carbono orgánico para promover sulfato-reducción y precipitación de metales durante la formación de DAM. El uso de compost de champiñón como enmienda orgánica sobre estériles de carbón con alto contenido de azufre pirítico mostró resultados promisorios para establecer condiciones sulfato-reductoras, inmovilizar los metales e incrementar la alcalinidad, el pH y la actividad microbiana durante la formación del DAM. Aunque todas las mezclas evaluadas en este estudio fueron prometedoras, la mezcla con menor porcentaje de compost de champiñón (25:75) presentó una mayor concentración de sulfuro en el lixiviado, así como mayor actividad microbiana. Estos resultados confirman que en la remoción de los metales participan Bacterias Sulfato Reductoras (BSR) que a través de su actividad metabólica reducen el sulfato a sulfuro que químicamente reacciona con los metales para generar sulfuros metálicos. No obstante, se recomienda evaluar el compost de champiñón como enmienda orgánica en ensayos de campo porque aún no se conoce si este substrato puede ser fuente de carbono y energía para una comunidad microbiana activa durante un largo período de tiempo o si las condiciones ambientales pueden inducir una posterior movilidad de los metales.

En el artículo “Drenajes ácidos de mina, alternativas de tratamiento”, Secretaría de Minería de Córdoba (2016), se menciona que cualquier afloramiento con sulfuros de hierro que permita el acceso de agua en condiciones aeróbicas y ligero pH ácido incrementará la biomasa bacteriana y como subproducto se tendrá drenaje ácido. Cuando este drenaje resulta favorecido en algún porcentaje por la actividad minera se denomina drenaje ácido de mina DAM. En la minería subterránea, de cuerpos cuya mena o ganga contenga sulfuros de hierro (pirita en particular), las probabilidades de poner en contacto estos minerales con agua en condiciones aeróbicas, es muy alta y, por ende, luego de un lapso de tiempo no muy prolongado se estará generando agua con valores de pH inferiores a 4. Por otro lado, cuando dichos drenajes se producen luego del cierre de los proyectos mineros, estos, constituyen un problema completamente diferente. Comienzan a producirse o, a advertirse, luego de un largo período de inactividad de la mina. Como métodos de tratamiento en este documento se mencionan:

- Drenajes Anóxicos
- Productores Continuos de alcalinidad
- Piletas de Caliza (PC)
- Canales de Caliza (CC)
- Barrera Reactiva Permeable

En el artículo denominado “Evaluación de un Biorreactor UASB para remoción de sulfatos en drenajes ácidos de minas.”, Universidad Jorge Tadeo Lozano, se presenta el diseño del UASB (del inglés Upflow Anaerobic Sludge Blanket) como sistema de tratamiento pasivo de DAM y se describe el proceso constructivo de este tipo de reactor.

En el artículo “Remoción de metales pesados de drenajes ácidos de minas de carbón usando bacterias sulfato reductoras.”, Universidad Industrial de Santander (2008), se evaluó la remoción de metales pesados de una disolución preparada de DAM usando Bacterias Sulfato Reductoras (BSR). Los cambios fueron muy rápidos para los DAM que presentaban menor concentración de metales. El valor del Eh indica el cambio de las condiciones de oxidación a reducción de las disoluciones acuosas de DAM durante los ensayos, como resultado de las reacciones de metabolismo que llevan a cabo las BSR.

Finalmente, en la presentación de Juan Pablo Salazar Giraldo, Geólogo, PhD Ingeniería (2020), se aborda la temática de tratamiento de DAM y se describen los tratamientos activos y pasivos. Los tratamientos activos corresponden a los métodos más empleados y más conocidos, parten de los sistemas de tratamiento convencionales de aguas residuales. El modelo general del sistema de tratamiento de aguas residuales comprende tamizado, homogenización, sedimentación, coagulación floculación, sedimentación, filtración, digestión anaerobia, aireación, oxidación.

Para el caso de las aguas residuales mineras, los sistemas activos buscan principalmente la regulación del pH, la disminución de la carga de metales y de sulfatos (Johnson y Hallberg 2005).

Así mismo en la presentación se describen las operaciones unitarias de neutralización, sedimentación o clarificación y remoción de metales.

En conclusión, el principal documento que fue usado como base para establecer los lineamientos de prevención, control y tratamiento de DAM es la “**Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras**”, publicada en el año 2015 por el Servicio Nacional de Geología y Minería - Departamento de Seguridad Minera.

En este documento se aborda la temática del DAM en el marco de un programa de estabilidad química, la Guía propone y establece la necesidad y relevancia de implementar medidas de prevención y, en el caso que esto no sea posible, implementar medidas de control y tratamiento de los drenajes mineros, de acuerdo al riesgo que ellos supongan sobre la salud de las personas y el medio ambiente.

La Guía es una herramienta muy útil, que contempla todos los aspectos relevantes del DAM. El capítulo de la guía metodológica para la estabilización química que se relaciona con la línea estratégica de prevención, control y tratamiento es el denominado Herramientas y criterios para asegurar la estabilidad química.

Dentro de los anexos de esta Guía se encuentran de manera detallada unas fichas técnicas e información específica y detallada para la prevención, control y tratamiento del DAM.

3.5. Seguimiento y monitoreo

El desarrollo de un proceso de monitoreo se debe llevar a cabo durante todas las etapas del proyecto desde la pre-operación hasta el post cierre de la mina lo cual se hace una práctica exigente e indispensable para la toma de decisiones preventivas. En la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías, ofrece una oportunidad sin precedentes para poder materializar este objetivo y poder dar solución a un problema de gran impacto que se ha venido presentando en los últimos tiempos como lo es el drenaje ácido minero DAM. Se debe tener en cuenta que estas prácticas han venido implementándose en contados proyectos mineros en Colombia, ya que no existe una metodología establecida para determinar la calidad de estos drenajes provocados por las fuentes potencialmente generadoras de drenajes ácidos mineros.

Por lo anterior se llega a la necesidad de acudir a metodologías, guías y protocolos que se manejan en diferentes países, con el fin de extraer información relevante hacia el monitoreo y vigilancia de los drenajes ácidos mineros de acuerdo con las buenas prácticas internacionales.

A partir de la Guía Global de Drenaje Ácido de Roca (Guía GARD) 2014, lo cual es implementada por la Red Internacional para la Prevención del Ácido (INAP) es una guía que abre pautas acerca de la predicción, prevención y gestión del drenaje producido por la oxidación de minerales sulfurados. De allí parte el impulso y el interés de implementar metodologías acogidas en diferentes países para llevarlas a la industria minera.

La GARD, define el desarrollo de un programa de monitoreo del ARD 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 magnitud de alteraciones de la superficie y el subsuelo, el procesamiento del mineral y los procedimientos de molienda, las áreas de eliminación 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/rutas para descargar el ARD al ambiente receptor y los receptores que pudieran ser impactados por estas descargas, así como la potencial mitigación que se pudiera requerir.

Chile, es uno de los países que acoge algunos criterios y lineamientos de la Guía GARD; diseñando e implementando la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras que fue publicada en el año 2015 por el Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera.

La Guía Metodológica de Chile parte de dos definiciones:

- **Estabilidad química (EQ):** una instalación minera se encuentra estable químicamente cuando, en su interacción con los factores ambientales, no genera impactos que impliquen un riesgo significativo para la salud de las personas y/o para el medio ambiente.
- **Programa de Estabilidad Química (PEQ):** es un programa de trabajo compuesto por un conjunto de etapas, estudios y/o procesos (descripción/caracterización, predicción y evaluación de riesgo ambiental - prevención, control y tratamiento), que tienen como objetivo asegurar la estabilidad química de las instalaciones remanentes de un proyecto minero, al momento del cese de sus operaciones (etapa de post-cierre).

Cabe resaltar que dentro de la metodología llevada a cabo en la Guía chilena para la línea estratégica de monitoreo y vigilancia de DAM, se definen dos componentes,

el programa de monitoreo y el programa de muestreo, los cuales se relacionan a continuación, según lo establecido en la guía anteriormente mencionada.

PROGRAMA DE MONITOREO EN LA GESTIÓN DE LA EQ

La Guía Metodológica de Chile, define la etapa del monitoreo en la gestión de la estabilidad química que dentro de este contiene el monitoreo durante la etapa de evaluación de la estabilidad química, el monitoreo durante la etapa que asegura la estabilidad química y el monitoreo durante la fase de cierre y post cierre.

Monitoreo en la Gestión de la Estabilidad Química

El monitoreo en la gestión de la estabilidad química se establece por fases que incluye la definición de los objetivos de monitoreo, la identificación de los componentes de monitoreo, el diseño del programa de monitoreo y, a través de su implementación, con los datos obtenidos, retroalimentar el PEQ y el propio diseño del programa de monitoreo.

Definición de los objetivos de monitoreo:

- Caracterizar las condiciones de la línea base: caracterización de las condiciones ambientales de la línea base (física, química y biológica), de manera de poder contrastar la información con los cambios producidos por la actividad minera.
- Verificar el potencial de generación de DAM: validar o verificar los resultados determinados en la etapa de predicción.
- Determinar o predecir el inicio de la generación de DAM: detectar el inicio o predecir de manera temprana la generación de DAM, para implementar medidas de gestión, validar y/o calibrar los modelos predictivos.
- Verificar el comportamiento esperado: confirmar el comportamiento esperado de los materiales, de manera de validar o complementar los resultados obtenidos en las etapas de descripción/caracterización y predicción, a través de la detección de comportamientos inesperados, para iniciar las acciones correctivas adecuadas.
- Evaluar el destino y transporte de contaminantes: caracterizar las condiciones físicas o geoquímicas del DAM y su entorno, de manera de evaluar la movilidad de los potenciales contaminantes hacia los receptores.
- Evaluar los impactos en los receptores: caracterizar las condiciones de los receptores, de manera de evaluar los potenciales impactos del DAM.
- Gestión Ambiental: evaluar el desempeño de las medidas de gestión de la EQ implementadas, ya sea para prevenir, controlar o tratar el DAM.

Definición de los componentes de un programa de monitoreo:

Una vez establecidos los objetivos de monitoreo, se deben determinar los componentes del programa de monitoreo, que incluyen.

- Fuentes o instalaciones potencialmente generadoras de DAM: botaderos, relaves, pilas, rajos, minas subterráneas.
- Medios de exposición (transporte): agua subterránea, agua superficial, sedimentos, suelos.
- Receptores: vida acuática, vida terrestre, vegetación, personas

Diseño del programa de monitoreo:

Los programas de monitoreo pueden presentar diferentes diseños, en función del tipo de monitoreo o de los objetivos, entre otros, pero también están involucrados otros aspectos como el presupuesto destinado a su implementación, la duración o frecuencia del mismo o el propio juicio del equipo con capacidad de decisión en esta etapa.

Tabla 14. Diseños del programa de monitoreo.

Monitoreo diagnóstico de alerta temprana	Monitoreo de impacto (involucran uno de los 4 diseños)
<ul style="list-style-type: none"> - Programas de monitoreo de cumplimiento o diagnósticos que involucran un muestreo repetido en el tiempo - Identifican y definen parámetros de interés que actúan como punto de referencia, señalando cuándo un programa de monitoreo debe ser más intenso o si es necesario un nuevo programa - En este monitoreo, si bien se recomiendan las estaciones de referencia o control, no son obligatorias - Normalmente, este tipo de monitoreo no provee conclusiones sobre los impactos ambientales 	<ul style="list-style-type: none"> - Control-Impacto (CI) o Diseño espacial. Comparación espacial entre sitios potencialmente afectados y sitios de referencia o control - Antes-Después (AD) o Diseño temporal. Comparaciones temporales entre datos de línea de base (pre-impacto) e impacto. - Antes-Después-Control-Impacto (ADCI) o Diseño espacio-temporal. Este diseño es el más completo de todos, provee comparaciones espaciales y temporales, así como la posibilidad de investigar las interacciones tiempo-espacio - Diseño de gradiente. Comparaciones espaciales a lo largo de un gradiente

Fuente: ATG Ltda., 2020.

Modificado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015.

Una vez definidos los objetivos, identificados los componentes y seleccionado el diseño del programa de monitoreo, se debe implementar el programa de monitoreo como tal.

Programa de monitoreo durante la etapa de evaluación de la estabilidad química

Uno de los objetivos principales de este monitoreo es el seguimiento de todas las acciones llevadas a cabo durante la **descripción/caracterización, predicción y**

evaluación de riesgo ambiental, como parte de la gestión de las fuentes potencialmente generadoras de DAM y su EQ. Igualmente, el seguimiento de los mecanismos de transporte (escorrentía, infiltración, etc.) y los medios de exposición (agua superficial, subterránea, sedimento y suelo), que puedan arrojar cambios y modificar los resultados de la etapa de evaluación de riesgo ambiental y, por tanto, los impactos o la gravedad de los mismos en los receptores.

En esta etapa del PEQ, el programa de monitoreo, normalmente, sigue un diseño de monitoreo diagnóstico de alerta temprana del proceso de generación de DAM, de manera que se puedan implementar medidas de gestión lo antes posible.

Programa de Monitoreo durante la etapa que asegura la estabilidad química

El objetivo principal de este monitoreo es el seguimiento a las medidas y tecnologías implementadas en las etapas de **prevención, control y tratamiento**; el diseño del monitoreo es especialmente importante en la etapa de prevención, cuando aún no se ha detectado la generación de DAM.

En esta etapa del PEQ, el programa de monitoreo sigue un diseño de un monitoreo de impacto con un enfoque sobre los componentes más importantes, en este caso, los medios de exposición (agua superficial, subterránea, sedimento y suelo) y los receptores (humanos y ecológicos).

Programa de Monitoreo durante la fase de post cierre

Uno de los aspectos críticos es determinar la **frecuencia** de monitoreo, que normalmente es reducida en comparación al monitoreo durante la operación, y se dirige sobre las medidas de gestión de la EQ en aquellas instalaciones potencialmente o generadoras de DAM. En esta etapa, se puede enfocar el programa de monitoreo bajo dos visiones diferentes, que condicionan el diseño del tipo de monitoreo a desarrollar. A continuación, se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 15. Aspectos a considerar para la selección del Monitoreo en la etapa del Post cierre.

Monitoreo de recuperación	Monitoreo de control
<ul style="list-style-type: none"> - Evalúa aquellos hábitats impactados, en faena y/o alrededores, que presentan signos de recuperación tras el cese de la actividad minera - Determina si se requiere de acciones adicionales de remediación como parte de la recuperación del sistema en el tiempo - Está enfocado principalmente en los medios de exposición (agua superficial, subterránea, sedimento y suelo) y los receptores (humanos y ecológicos) 	<ul style="list-style-type: none"> - Monitorea la integridad o la operatividad de cada medida o procedimientos de control, como por ejemplo, el estado de una cubierta en un depósito de relaves o un sistema de tratamiento de agua - Normalmente, incluye un seguimiento de las fuentes generadoras de DAM y los medios de exposición, pero también puede incluir el monitoreo sobre los receptores

Fuente: ATG Ltda., 2020.

Modificado de la *Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015.*

PROGRAMA DE MUESTREO EN LA GESTIÓN DE LA EQ

Cabe resaltar que cada programa de monitoreo tiene un programa de muestreo asociado. Sin embargo, para el desarrollo de la guía, priorizaron el programa de muestreo en las fuentes potencialmente generadoras de DAM tanto por su importancia como por la falta de información y unificación de criterios en este aspecto. Finalmente se mencionaron algunas normas chilenas que regulan los aspectos de muestreo en los principales medios de exposición (agua subterránea, agua superficial, sedimento y/o suelo).

Los programas de muestreo, dependen principalmente de la etapa del PEQ a la que van dirigidos y, además, son específicos para cada instalación, medio de exposición y receptor

Muestreo en las Fuentes Potencialmente Generadoras de DAM

La Guía de Chile resalta que no existe una metodología común para el muestreo en las fuentes o instalaciones potencialmente generadoras de DAM, debido a que cada fuente es única y se debe hacer un muestreo específico.

Además de considerar que los objetivos del muestreo dependen de la etapa del PEQ a la que va dirigido, es conveniente considerar que un muestreo puede variar en función de si una instalación ya existe (activa o inactiva), o si por el contrario se encuentra en etapa de planificación y/o construcción (fuentes nuevas), (**ver Figura 7**).

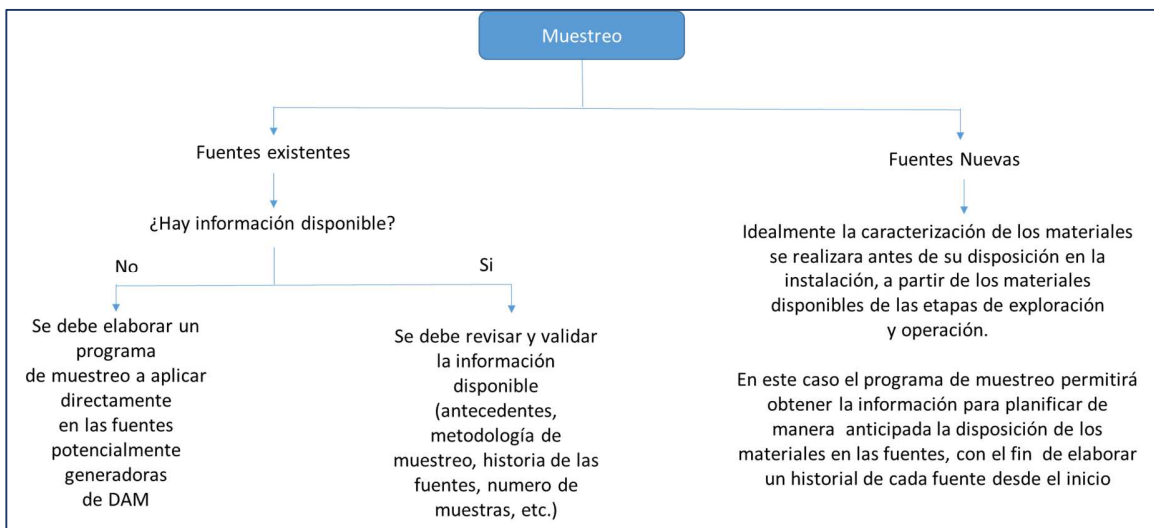


Figura 7. Generalidades del programa de muestreo en fuentes existentes y nuevas.

Fuente. ATG Ltda., 2020.

Modificado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015.

Así mismo la Guía Chilena define la estrategia para llevar a cabo el muestreo, planteándolo en diferentes fases, de tal manera que la caracterización geoquímica de las fuentes potencialmente generadoras de DAM, se considere como una actividad progresiva, abandonando la visión puntual que es común tener a este respecto.

Muestreo en Fases

Partiendo de esta deducción, se debe comenzar por una fase inicial de muestreo o exploratoria, que permita diseñar tantas fases posteriores como sean necesarias para alcanzar una caracterización detallada. Por tanto, las distintas fases de muestreo irán de menos a más precisión, y se relacionan unas con otras, como se representa en la siguiente tabla. Igualmente se distinguen las actividades aplicables a fuentes ya formadas (FF), y fuentes que están en una etapa de planificación y que se construirán y operarán en el futuro (FN).

Tabla 16. Parámetros a definir y métodos de análisis en las fases de muestreo.

Fase 1. Muestreo Inicial	
Se considera como una fase exploratoria, que sirve como levantamiento de la información más relevante de los materiales en estudio (caracterización preliminar)	
Objetivo	Métodos de análisis en los que se debe enfocar el muestreo
<ul style="list-style-type: none"> - Diseñar un plan de muestreo en largo plazo FF y FN - Caracterización geológica y mineralógica inicial de los materiales FF y FN - Determinar el volumen del material (estimación de las dimensiones) FF - Definir cómo se va a disponer el material con base a las unidades discretas definidas previo a la formación de la instalación FN 	<ul style="list-style-type: none"> - Reconocimiento en terreno con la búsqueda de indicadores in situ y la descripción preliminar de las muestras de mano - Utilización de técnicas instrumentales - Test estáticos de predicción - Otras técnicas, estudios geofísicos, etc.
Fase 2. Muestreo Detallado	
Validar los datos obtenidos en la fase inicial, enfocar el muestreo a definir nuevos parámetros que permitan desarrollar una caracterización más detallada de la fuente	
<ul style="list-style-type: none"> - Determinar el volumen del material dispuesto en las potenciales fuentes – FF - Determinar el volumen de las unidades discretas definidas en la fase 1 – FF y FN - Caracterización geológica y mineralógica detallada de los materiales – FF y FN - Recolectar más muestras de las unidades discretas con mayor variabilidad – FF y FN - Establecer una secuencia de disposición – FN - Determinar la variabilidad de las muestras – FF y FN 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de técnicas instrumentales - Test cinéticos de laboratorio - Test cinéticos de campo
Próximas fases de muestreo más concretos	
Muestreo específico para un programa geoquímico en la fase de operación	

Fuente: ATG Ltda., 2020.

Modificado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

Determinación del número mínimo de muestras

Igualmente como no existe una metodología común para el muestreo en las fuentes o instalaciones potencialmente generadoras de DAM, no existen directrices específicas como tal para determinar y definir el número mínimo de muestra que se debe recolectar en cada fuente. Pero la guía define algunos factores a tener en cuenta para su determinación, entre ellos los antecedentes disponibles; objetivos y el tipo de estudio para el cual se diseña el muestreo; condiciones específicas de la fuente (composición, características, variabilidad, dimensiones totales y específicas, y grado de alteración, entre otros); recursos económicos disponibles; grado de confiabilidad estadística requerido; factores del entorno. Idealmente, esta información se debiera considerar a la hora de determinar el número de muestras, junto con el juicio y la experiencia del profesional encargado de diseñar el plan de muestreo.

La Guía Chilena hace énfasis en algunos criterios internacionales que hacen referencia al número de mínimo de muestras, mediante estudios realizados por diferentes autores. Cabe destacar que el número de muestras que estos autores recomiendan son para unidades geológicas homogéneas como primera fase del muestreo, en la **Tabla 17** y la **Figura 8**, muestran los mismos números mínimos de muestras para las diferentes masas de unidades geológicas.

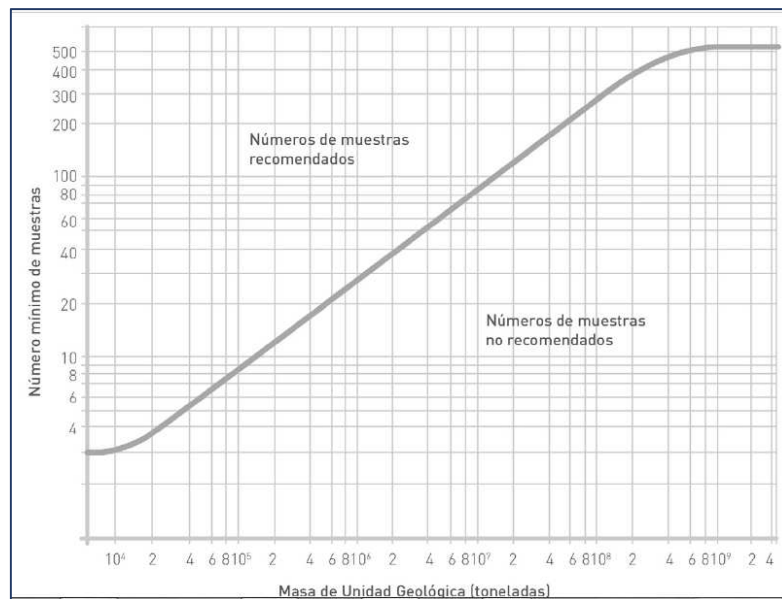


Figura 8. Número mínimo de muestras en base a la masa de cada unidad geológica, según Steffen, Robertson and Kiersten, 1989.

Fuente. Tomado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015.

Tabla 17. Número mínimo de muestras en base a la masa de cada unidad geológica, según Price and Errington, 1994.

Masa de cada tipo de roca (en toneladas)	Número Mínimo de muestras
< 10.000	3
< 100.000	8
< 1.000.000	26
10.000.000	80

Fuente. Tomado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras. Fundación Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería y Ministerio de Minería. 2015

Indicaciones y recomendaciones a considerar en cada fuente potencialmente generadora de DAM

La Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras de Chile demuestran dos tablas resumen con los puntos más importantes para cada instalación, incluyendo los aspectos críticos que se deben tener en consideración a la hora de planificar un programa de muestreo en cada una de las fuentes.

- **Botaderos y depósito de relaves**

Tabla 18. Resumen de los principales aspectos a considerar en el muestreo de botaderos y depósitos de relaves.

	Botaderos	Depósito de relaves
Aspectos críticos	Método constructivo; clima/hidrología; granulometría; volumen; definición de unidades discretas; caracterización horizontal y vertical; procesos de segregación, interacción y mezcla del material depositado; muestras "frescas" (no meteorizadas); fase del proceso de generación de DAM en que pudiera encontrarse el botadero; seguridad en el muestreo	Proceso metalúrgico (cianuración, magnetización, flotación, etc.); etapa del proyecto; tipo de muro (arenas, estériles o empréstito); historia del relave - secuencia de llenado; granulometría del material; fases presentes (sólida y líquida) y su variabilidad; cambios de las condiciones en superficie y en profundidad; contenido en humedad; balance hídrico (zona saturada y no saturada); tipo de agua utilizada en el proceso de flotación (agua de mar, agua de recirculación, etc.); balance metalúrgico; información del plan minero; estudio y análisis vertical del depósito; información sobre la base del depósito
Método de muestreo	Botaderos existentes operando: el muestreo se puede realizar desde los testigos o sondajes de exploración; en calicatas y muestras de sondajes en el mismo botadero; o directamente en el material de la mina que será el mismo que es el mismo que el depositado en un botadero	Consideraciones generales: el muestreo no se debe limitar a muestras superficiales; idealmente realizar sondajes lo más próximos que sea posible al muro (en función del método de descarga) y hasta la base, abarcando toda la superficie del depósito; utilización de métodos geofísicos; utilización de piezómetros para el control y muestreo de la fase líquida; utilización de

	Botaderos	Depósito de relaves
Aspectos críticos	Método constructivo; clima/hidrología; granulometría; volumen; definición de unidades discretas; caracterización horizontal y vertical; procesos de segregación, interacción y mezcla del material depositado; muestras "frescas" (no meteorizadas); fase del proceso de generación de DAM en que pudiera encontrarse el botadero; seguridad en el muestreo	Proceso metalúrgico (cianuración, magnetización, flotación, etc.); etapa del proyecto; tipo de muro (arenas, estériles o empréstito); historia del relave - secuencia de llenado; granulometría del material; fases presentes (sólida y líquida) y su variabilidad; cambios de las condiciones en superficie y en profundidad; contenido en humedad; balance hídrico (zona saturada y no saturada); tipo de agua utilizada en el proceso de flotación (agua de mar, agua de recirculación, etc.); balance metalúrgico; información del plan minero; estudio y análisis vertical del depósito; información sobre la base del depósito
	Botaderos nuevos: se muestreará el material en los sondajes de exploración y directamente en mina	calicatas y sondajes para el muestreo de la fase sólida Depósitos nuevos: hacer pruebas en plantas piloto de relave (precaución con el agua y su representatividad). Depósitos en operación: muestreo de los concentrados desde la planta (llevar registro); muestreo de las diferentes fases en el muro y la cubeta mediante calicatas y sondajes; muestreo del agua de poro (importante cuando el relave se comienza a secar); muestreo de la fase líquida mediante piezómetros; muestras de agua en la laguna y en la salida del depósito; muestreo de testigos (muestras de planta almacenadas); tomar muestras en el mineroducto
N° mínimo de muestras	Definir en base a criterios tales como unidades discretas, volumen, hidrología e hidrogeología, a juicio del especialista, etc.	Considerar y priorizar un mayor número de muestras verticales frente a las horizontales; tomar muestras de todas las fases (material seco y húmedo); determinar el número considerando el análisis granulométrico; hacer un seguimiento en la etapa de operación de mina y en el depósito el relave
Complejidad	Botaderos existentes operando: falta de información (para reconstruir la historia, disposición, edad, etc.); desconocimiento de la fase de generación de drenaje en que se encuentra la unidad; falta de definición de las unidades discretas presentes en el botadero	La seguridad del muestreo en este tipo de depósito puede limitar el desarrollo de una campaña de muestreo
Buenas practicas	Instrumentalización del botadero (sondeos) in situ; análisis en conjunto con los sondajes de exploración y directos de la mina; gestión desde las primeras fases del ciclo de vida del botadero; actualización del modelo	Instalación de pozos de monitoreo alrededor del depósito; plantas piloto que reproduzcan los procesos (escalamiento); análisis de muestras provenientes de planta; utilización de la información de la planta de tratamiento sobre el contenido

	Botaderos	Depósito de relaves
Aspectos críticos	Método constructivo; clima/hidrología; granulometría; volumen; definición de unidades discretas; caracterización horizontal y vertical; procesos de segregación, interacción y mezcla del material depositado; muestras "frescas" (no meteorizadas); fase del proceso de generación de DAM en que pudiera encontrarse el botadero; seguridad en el muestreo	Proceso metalúrgico (cianuración, magnetización, flotación, etc.); etapa del proyecto; tipo de muro (arenas, estériles o empréstito); historia del relave - secuencia de llenado; granulometría del material; fases presentes (sólida y líquida) y su variabilidad; cambios de las condiciones en superficie y en profundidad; contenido en humedad; balance hídrico (zona saturada y no saturada); tipo de agua utilizada en el proceso de flotación (agua de mar, agua de recirculación, etc.); balance metalúrgico; información del plan minero; estudio y análisis vertical del depósito; información sobre la base del depósito
Observación	geoquímico conforme se avanza en el ciclo de vida de la instalación No se recomienda tomar muestras compuestas ni meteorizadas	metálico; utilización de métodos geofísicos; muestreo aguas abajo de los depósitos Planificar el muestreo en conjunto con los profesionales de geotecnia

Tomado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras, Chile 2015.

- **Depósitos de lixiviación y Mina Rajo abierto/subterránea**

Tabla 19. Resumen de los principales aspectos a considerar en el muestreo en depósitos de lixiviación y Minas Rajo Abierto y Subterránea.

	Depósitos de lixiviación	Mina rajo abierto/subterránea
Aspectos críticos	Tipo de instalación; método constructivo; secuencia de depósito o llenado en las pilas; dimensión del depósito; granulometría; mineralogía (óxidos, sulfuros, mixtos); leyes remanentes; contenido en humedad (%); humedad remanente; seguridad en el muestreo; calidad química de las soluciones de recirculación, número de lavados; complejidad de caracterización del material de la base del depósito; modelo hidrogeoquímico; lavado final del depósito; previsión de la realización de lixivitaciones secundarias; ripsos de cianuración; existencia o no de geomembranas	Modelo estructural; litología, alteración, mineralización (LAM); modelo hidrogeológico; permeabilidad; impermeabilización; túneles (diseño según el tipo de explotación)
Método de muestreo	Asegurar un muestreo representativo del depósito; cuando por seguridad no se puede acceder al depósito recurrir a los rechazos de las pruebas de lixiviación; muestreo mediante sondajes y calicatas en operación; muestreo regular (o de malla); muestreo en calicatas en cada nivel del depósito (para pilas ROM o pilas dinámicas); muestreo de la pila durante su desarme; métodos geofísicos para la determinación y distribución de la humedad	Definición de unidades discretas; muestreo a través de sondajes y muestreo directo; test de pared.
N° mínimo de muestras	El número de muestras se debe determinar en función del tonelaje, de las dimensiones	El número de muestras se debe determinar en función del objetivo del estudio. Por

	Depósitos de lixiviación	Mina rajo abierto/subterránea
	y diseño de la pila, del tipo de muestreo y de la información disponible sobre el depósito	ejemplo, puede estar enfocado en la caracterización de las unidades durante la operación, o en la evaluación de las unidades que quedarán expuestas después del cierre. En cada caso, el número de muestras dependerá entre otras cosas del volumen de cada unidad dentro de la instalación, de la información disponible, representatividad, etc.
Complejidad	Seguridad del muestreo; evolución en el tiempo del sistema; uso del sondaje sísmico en pilas ROM	Seguridad del muestreo, difícil acceso a algunos sectores
Buenas practicas	Toma de muestra en el desarme de pilas; utilización de métodos geofísicos para determinar la humedad en el depósito; determinación de consorcios de microorganismos; estudios de biolixiviación; instalación de pozos de monitoreo enfocado en el cierre; instrumentalización de la humedad para su monitoreo; caracterización de la mineralogía remanente; instalación de las pilas sobre geomembranas para evitar la infiltración de soluciones al subsuelo; muestreo de aguas abajo del depósito; reproducir el proceso de lixiviación a pequeña escala; estudio del depósito en su desarme (pilas dinámicas); conservar rechazos de los laboratorios; geomembranas sistematizadas.	Levantar modelos hidrogeológicos tempranos si no existen o si el detalle no es suficiente; acoplar el muestreo con los muestreos geometalúrgicos; trabajo en equipo con la gerencia de operaciones; en mina subterránea ir cementando túneles progresivamente
Observación	No se recomienda mezclar con otros materiales (considerados estériles); analizar sondajes previos ya que el propio proceso de lixiviación modifica la composición del material	

Tomado de la Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras, Chile 2015.

Arboles de decisión

La Guía complementa la información para determinar la capacidad de generación de DAM de suelos, estériles y colas de mina con árboles de decisión como apoyo a los profesionales encargados de la toma de decisiones para el desarrollo del muestreo en cada una de las fuentes potencialmente generadoras de DAM.

- **Botaderos**

Se consideran tres realidades en cuanto a la disponibilidad de información (mucho, poca o ninguna) para un botadero ya formado, se plantea el siguiente diagrama de decisiones.

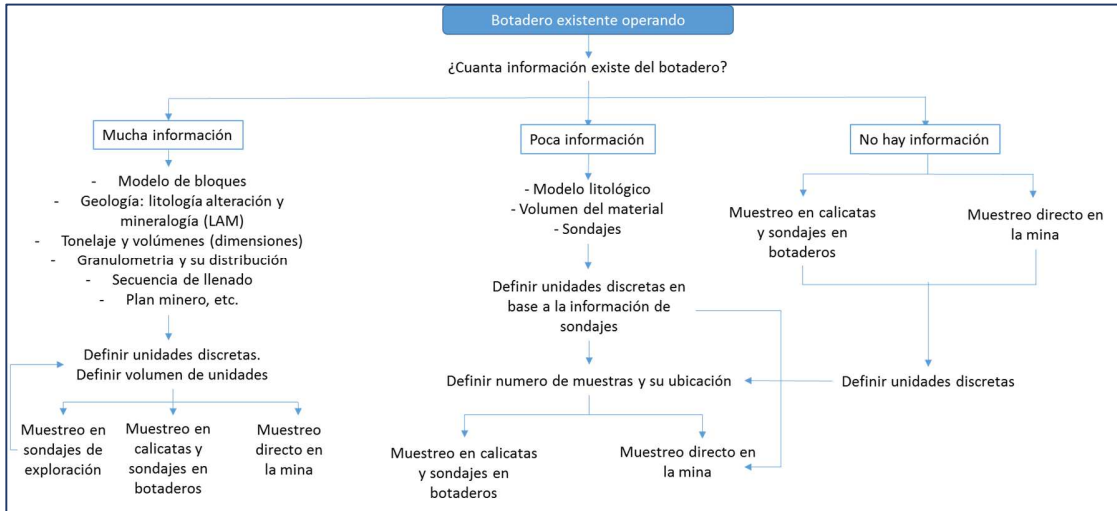


Figura 9. Árbol de decisiones para el muestreo en botaderos en operación.
 Fuente: ATG Ltda., 2020, modificado de la Guía Metodológica de Chile, 2015.

• **Depósito de relaves**

Así mismo, considerando diferentes estados de operación se presenta a continuación el árbol de decisiones para el muestreo en los depósitos de relaves.

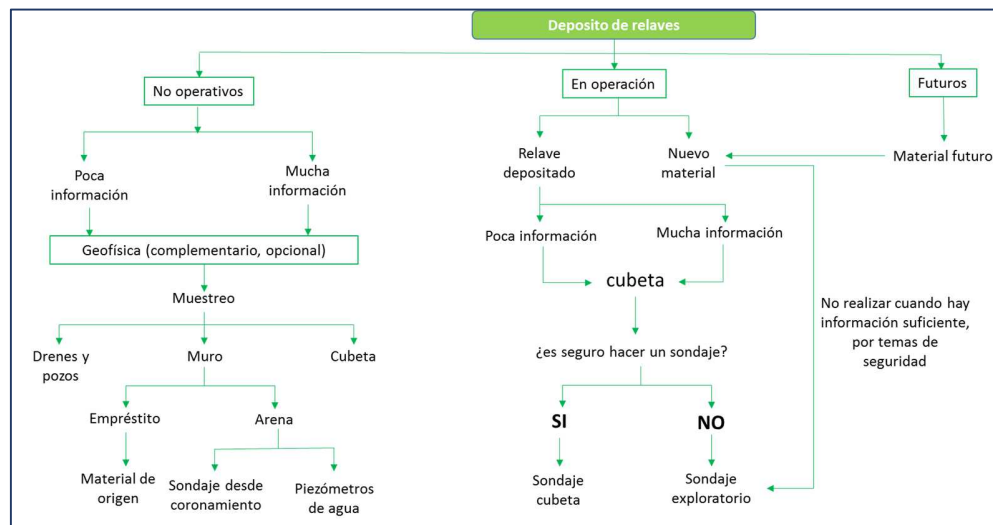


Figura 10. Árbol de decisiones para el muestreo en depósitos de relaves.
 Fuente: ATG Ltda., 2020, modificado de la Guía Metodológica de Chile, 2015.

• **Depósitos de lixiviación**

De acuerdo a la guía el diagrama de decisiones para el muestreo en instalaciones con material resultante de procesos de recuperación de material a partir de su lixiviación, se presenta a continuación.

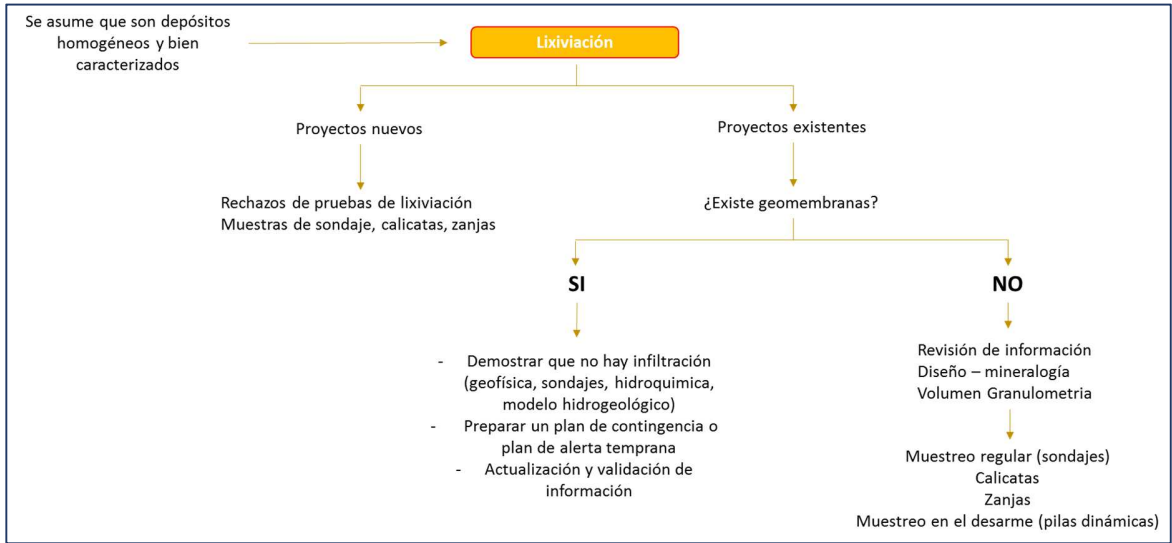


Figura 11. Árbol de decisiones para el muestreo en instalaciones con material lixiviado.
 Fuente: ATG Ltda., 2020, modificado de la Guía Metodológica de Chile, 2015.

Un caso particular en Colombia es el Estudio de Impacto Ambiental de la Minera de Cobre Quebradona localizada en el municipio de Jericó Antioquia. Allí realizan un plan de seguimiento y monitoreo con el fin de controlar la posible generación de drenaje ácido en la etapa de construcción y montaje, donde aplican medidas de manejo siguiendo los lineamientos de la “Guía GARD” (Guía Global de Drenaje Ácido de Roca) en la que se trata la predicción y prevención del drenaje producto de la oxidación del mineral sulfuroso, mediante la aplicación de diferentes métodos.

Para el seguimiento y control de los DAM presentes en el proyecto Quebradona, durante la etapa de construcción – montaje y de operación se deposita de forma separada el material con potencial de generación de drenaje ácido. Así mismo garantiza el tratamiento de las aguas ácidas, por lo tanto, realizan la neutralización de estas aguas mediante la aplicación de agentes alcalinos que permiten tratar los efluentes. Para la etapa de operación se realiza la conformación del depósito de pirita, manejo de aguas, encapsulamiento de la pirita, tratamiento de las aguas de contacto. El registro de disposición de material extraído (volúmenes, origen del material y sitios de disposición) serán el soporte de seguimiento a utilizar.

Dentro de la literatura analizada sobre Perú, se resalta la Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas, 2016, que constituye una guía práctica para la predicción, control y evaluación del drenaje ácido de roca en las minas ubicadas en ese país, con el fin que las pautas trazadas sirvan de ayuda a las compañías mineras y metalúrgicas a definir la dimensión actual del drenaje ácido de mina, a diseñar y evaluar medidas de control alternativas para prevenirlo o limitarlo y, finalmente, a determinar el potencial futuro de generación de ácido y drenaje contaminado.

Los principios y procedimientos básicos para el monitoreo del drenaje ácido de mina en Perú, son los mismos que manejan para el monitoreo de otros efluentes y aguas superficiales en cualquier instalación minera. En este país hace énfasis principalmente en el seguimiento y control para la calidad de agua, implementando así un protocolo de monitoreo de calidad de agua para la industria minero-metalúrgica, distribuido por la Dirección General de Asuntos Ambientales DGAA, que resume estos procedimientos.

Cabe destacar que en el territorio nacional, se han desarrollado diferentes metodologías, guías y protocolos de monitoreo y seguimiento como por ejemplo el para el monitoreo y seguimiento del agua (IDEAM, 2007), La Guía para el Monitoreo de Vertimientos, aguas superficiales y subterráneas que dan soporte con relación a evaluar las condiciones en los medios de exposición y los posibles impactos en los receptores cumpliendo con la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015-Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible). Sin embargo, para el monitoreo y seguimiento en las fuentes potenciales generadoras de drenajes ácidos mineros no contempla como tal una metodología aplicada al control de estas instalaciones.

Finalmente, en la presentación de Juan Pablo Salazar Giraldo, Geólogo, PhD Ingeniería (2020), se aborda la temática del programa de muestreo tanto en minas nuevas como en las minas existentes y se describen los pasos a seguir que a continuación se definen para determinar la capacidad de generación de DAM de suelos, estériles y colas de minas.

Programa de Muestreo (Minas Nuevas)

- Sobre los perfiles geológicos:
 - Definir y analizar los tipos de rocas
 - Definir la posible distribución de sulfuros y minerales alcalinos (Según litología)
 - Clasificación geoquímica preliminar (Alto, bajo potencial probable para DAM y unidades con potencial neutralizante probable)
- Muestreo de las unidades o submuestras de varias unidades según clasificación preliminar, sin embargo, cabe resaltar que en yacimientos de carbón lo ideal es muestrear estratos arriba y abajo de los mantos de carbón.
- Realizar análisis estáticos (ABA, NAGpH), y hacer una segunda clasificación.
- Para muestras que dan resultado positivo o con Incertidumbre de potencial de DAM, pasar a realizar pruebas dinámicas (Columnas y celdas).

Programa de Muestreo (Minas Existentes)

- Definir la geología, la mineralización, tipos de estériles.
- Considerar plan minero y la historia colocación de residuos.
- Identificar las fuentes de muestras (clasificación preliminar).
- Hacer muestreo inicial y programa de pruebas.
- Realizar análisis estáticos (ABA, NAGpH), hacer una segunda clasificación.
- Para muestras que dan resultado positivo o con Incertidumbre de potencial de DAM, pasar a realizar pruebas dinámicas (Columnas y celdas).

En conclusión, el principal documento que fue usado como base para establecer la propuesta de lineamientos de monitoreo y vigilancia de DAM es la “**Guía metodológica para la estabilización química de faenas e instalaciones mineras**”, publicada en el año 2015 por el Servicio Nacional de Geología y Minería - Departamento de Seguridad Minera de Chile. El capítulo de la guía metodológica que se relaciona con la línea estratégica de monitoreo y vigilancia es el denominado “Monitoreo y Muestreo en la Gestión de la estabilidad química”; así mismo dentro de los anexos de esta Guía se encuentran de manera detallada las generalidades del muestreo: programa de muestreo y fichas de muestreo en terreno tanto en fuentes potencialmente generadoras de DAM, como para el muestreo en efluentes superficiales.

3.6. Gestión del riesgo

De la Guía Metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones (Chile). La exigencia de evaluar los riesgos relacionados con la EQ de manera de implementar medidas de control cuando dichos riesgos son significativos, queda normada en la Ley que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras en Chile (Ley 20.551). Para los efectos de la citada Ley y su Reglamento, el riesgo es una relación entre la probabilidad de ocurrencia de un hecho y la severidad de sus consecuencias. En este sentido, la probabilidad de ocurrencia corresponde a la combinación de circunstancias y elementos que provocan un evento no deseado, que trae con-sigo consecuencias para las personas y/o el medio ambiente. Por su parte, la severidad de las consecuencias se refiere al impacto o daño que pueda producirse como resultado de ese hecho, ya sea sobre las personas y/o el medio ambiente.

A nivel internacional, la evaluación de riesgo es considerada como una herramienta robusta que debería formar parte integral del manejo de la EQ de una faena minera y que se recomienda aplicar durante todo su ciclo de vida, de manera de obtener información objetiva y con base científica para la toma de decisiones más precisa y generando un proceso transparente de evaluación. Su aplicación es recomendada ya que permite reducir costos e incertidumbres del proceso de cierre. En este

contexto, el nivel de detalle de la evaluación de riesgo depende principalmente de tres factores:

1. De la fase del ciclo de vida minero en que se encuentra cada instalación y faena.
2. De la magnitud de los peligros y/o riesgos detectados en evaluaciones preliminares.
3. De la sensibilidad y vulnerabilidad del entorno frente a estos peligros y, por ende, la magnitud de las potenciales consecuencias de estos.

En general, la evaluación de riesgo inicial para un nuevo proyecto minero es llevada a cabo a un nivel conceptual, pasando a un nivel de mayor detalle en la fase de factibilidad, diseño y operación. Los resultados de estas evaluaciones de riesgo son especiales-mente importantes para la planificación del cierre de una faena minera, para lo cual se recomienda implementar el mayor detalle posible en esta etapa, debido a las implicancias ambientales, sociales y económicas que en el largo plazo puede provocar la “inestabilidad química” de una faena o de sus instalaciones.

Existen a nivel nacional e internacional diferentes metodologías para evaluar el riesgo, que, si bien tienen ciertas diferencias, comparten el mismo procedimiento general, el que se resume en la siguiente figura y se describe a continuación.

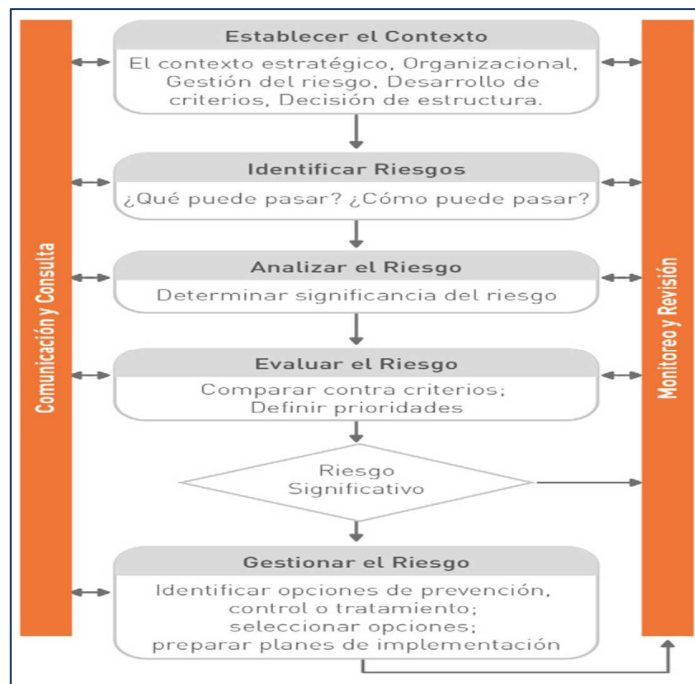


Figura 12. Procedimiento general de evaluación de riesgos.
Fuente: Modificado de Elliot and Pershke, 2006.

Establecer el Contexto: para la evaluación de los riesgos y oportunidades de cierre se requiere en primera instancia definir una visión de los resultados finales del

cierre; esta visión puede precisar objetivos concretos que deben ser alcanzados, definiendo para la evaluación de sus cumplimientos criterios medibles y objetivos. En esta fase se deben definir los usos del suelo post cierre y los objetivos de cierre consistentes con este uso. Ambos, el uso post-cierre del suelo como los objetivos del cierre son necesarios para proveer la base para la definición de criterios de cumplimiento e indicadores de desempeño.

Identificar Riesgos: en este paso se deben establecer hipótesis preliminares respecto de los potenciales efectos que puedan ocurrir, considerando para ello las potenciales fuentes generadoras de DM, las vías de liberación y transporte, y los potenciales receptores humanos y ecológicos. Para la representación gráfica de estos factores se utilizan a menudo modelos conceptuales. En la figura a continuación se presenta un modelo conceptual simplificado a modo de ejemplo.

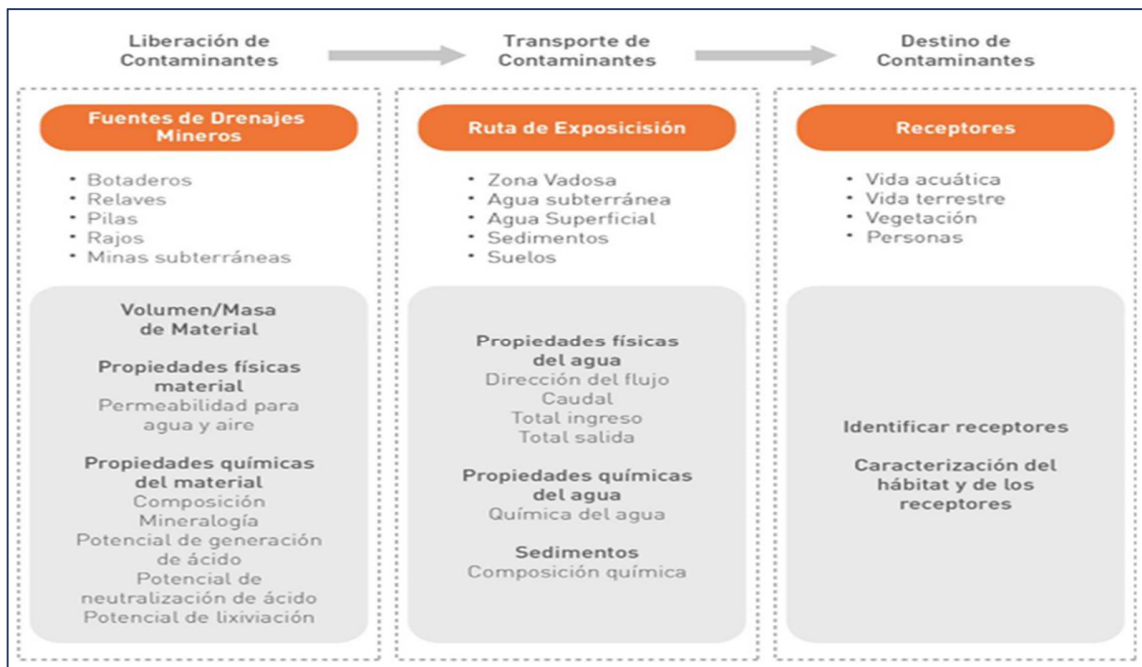


Figura 13. Modelo conceptual simplificado.
 Fuente: Modificado de INAP, 2012

Análisis del riesgo: este paso analiza el riesgo tomando en consideración los resultados de la caracterización geoquímica de las fuentes potenciales, del entorno, de los modelos hidrogeoquímicos, u otra información que fue levantada en el proceso de caracterización y predicción del programa de estabilidad química (PEQ). El método de evaluación de riesgos seleccionado definirá cómo utilizar esta información; por ejemplo para el caso de la evaluación de riesgo ecológica la información podrá ser utilizada para definir las fuentes de los contaminantes de interés potencial, su distribución en el medio receptor, y su contacto con los receptores; evaluar las relaciones crónicas y agudas de respuesta en los receptores

(es decir, la evidencia de la exposición); y definir el impacto de las respuestas de los receptores en los puntos finales de evaluación.

Evaluación y priorización de los riesgos: esta etapa implica evaluar el grado de confianza del análisis de riesgo. Este análisis también debe identificar los aspectos sociales, económicos, políticos y legales asociados a los riesgos, y priorizarlos.

Gestión de riesgo: esta etapa implica la identificación de estrategias adecuadas para hacer frente a los riesgos significativos. La significancia o aceptabilidad del riesgo residual, es decir, el riesgo que permanece posterior a la implementación de la medida de gestión es un tema importante y se recomienda abordarlo tempranamente con los diferentes stakeholders (autoridades y comunidades).

Monitoreo y revisión de riesgos, y comunicación y consulta: se recomienda que la comunicación y consulta de los stakeholders, y el monitoreo y la revisión, sean permanentes y durante todo el proceso de evaluación de riesgo. Incluso, si los stakeholders no están involucrados en el proceso de identificación y evaluación de riesgos, deben ser informados de los riesgos asociados con las medidas de cierre en una etapa temprana de la planificación de cierre, para abordar la potencial preocupación de la comunidad antes de que se convierta en una barrera para la implementación del cierre propiamente.

La aplicabilidad de las diferentes metodologías de evaluación de riesgos existentes dependerá del objetivo de la evaluación de riesgos, del nivel de detalle de información con el que se cuente y de la fase del ciclo de vida minero en que se encuentre cada instalación u operación. En Chile, a pesar de ser un instrumento reconocido en la Ley de Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300), no existe a la fecha una metodología consensuada, sino que diferentes guías elaboradas por las autoridades sectoriales y ambientales, algunas de las cuales se describen brevemente a continuación:

- Guía Metodológica de Evaluación de Riesgos para el Cierre de Faenas Mineras (SNGM, 2014) .Esta guía busca orientar a las empresas mineras en identificar y evaluar los riesgos de una instalación en su condición de cierre en forma progresiva durante la vida útil de la operación minera. La base de esta metodología radica en la identificación y cuantificación de los riesgos, manteniendo los lineamientos de la norma “ISO 31.000 Risk Management Principles and Guidelines” y complementado con el análisis de factores técnicos operacionales, además de las condiciones geográficas que permitan que la evaluación recoja los aspectos propios e individuales de cada faena.
- Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes¹⁹ (MMA, 2013) y Lineamientos Metodológicos para la Evaluación de Riesgo Ecológico (MMA, 2014). La Guía Metodológica para la Gestión de Suelos

con Potencial Presencia de Contaminantes tiene por objetivo definir los procedimientos para estandarizar la investigación de sitios con potencial presencia de contaminantes en el país, para lo cual se describen las etapas y procedimiento requeridos. A su vez, la Guía Lineamientos Metodológicos para la Evaluación de Riesgo Ecológico constituye una exposición metodológica práctica y sistemática de los procedimientos involucrados en la evaluación de riesgo con un enfoque ecológico que implica la identificación de peligros, el análisis y caracterización de riesgo y, finalmente, la gestión y comunicación de éste.

- Guía de Evaluación de Riesgo (SEA, 2012). Esta guía busca clarificar y entregar lineamientos sobre la pertinencia de presentar un EIA, específicamente sobre lo que respecta a la letra a) del artículo 11 de la Ley N° 19.300, referida al “Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos”.

Las metodologías nacionales e internacionales resultan especialmente importantes cuando se trata de evaluar y gestionar la presencia de contaminantes en los drenajes mineros y su impacto en la calidad de suelos, sedimentos, aguas superficiales y subterráneas, debido a que actualmente en nuestro país esto no se encuentra regulado en una normativa específica. Independiente de la metodología de evaluación de riesgo que se utilice, se debe buscar aumentar el nivel de detalle de información y análisis como un proceso continuo en el tiempo a través del desarrollo de estudios, investigaciones y monitoreos. Es así que el proceso debe estar orientado a pasar desde los impactos y riesgos supuestos, a los riesgos evaluados, y finalmente a los riesgos confirmados, pudiendo entenderse como:

- Riesgo supuesto: los impactos y riesgos de EQ han sido identificados de manera preliminar y en base a experiencia internacional, y no se encuentran respaldados por investigaciones técnicas en la faena misma.
- Riesgo evaluado: los riesgos de EQ han sido identificados y evaluados mediante una evaluación sitio específica e investigaciones técnicas.
- Riesgo confirmado: los riesgos de EQ han sido confirmados por estudios adicionales de especialistas y evaluaciones ambientales post-cierre.

En cuanto a los riesgos residuales que permanecerán posterior a la implementación de las medidas de prevención, control y tratamiento, se recomienda evaluar su factibilidad, eficiencia y desempeño, pasando nuevamente por un proceso continuo de profundización de la información, desde una evaluación basada en experiencias por su aplicación en otras faenas, a su evaluación basada en pruebas a nivel de laboratorio, hasta su comprobación a través de ensayos en terreno a partir de los cuales se pueda demostrar su éxito.

➤ Riesgos versus impactos

Como se ha indicado anteriormente, de acuerdo a la Ley que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras en Chile (Ley 20.551), el riesgo es una relación entre la probabilidad de ocurrencia de un hecho y la severidad de sus consecuencias. Por otro lado, conforme a la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente, el impacto ambiental se entenderá como la alteración del medio ambiente provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada.

En principio, a objeto de analizar los riesgos de una faena minera respecto de la EQ, se debe determinar el impacto sobre el medio ambiente y los riesgos que estos impactos revisten para la salud de las personas y/o el medio ambiente, como un elemento relevante de la evaluación de la consecuencia de un hecho sobre los bienes a proteger. Por lo tanto, integrando desde el punto de vista técnico los conceptos de riesgo e impacto de la regulación sectorial y ambiental, es posible plantear que el objeto de la gestión de cierre de una faena minera es el de controlar los riesgos que genera la actividad para prevenir y/o minimizar las alteraciones significativas sobre el medio ambiente, en especial sobre las personas y componentes ambientales como el aire, agua y suelo.

De la guía Minero Ambiental de explotación (Colombia 2002). El plan de contingencia es el instrumento estratégico que identifica las situaciones de riesgo que puedan ocurrir por fuera de las condiciones normales de operación y define las acciones para su prevención y control. Asimismo, determina los recursos físicos y humanos, y la metodología necesaria para responder oportuna y eficazmente ante una emergencia.

Objetivos Específicos

Identificar las amenazas de los procesos o actividades de orden técnico, natural o antrópico, que puedan materializarse sobre los recursos empresariales, comunitarios y del medio ambiente para lo cual es necesario:

- Identificar los escenarios de riesgo en las diferentes etapas del proyecto y elaborar el mapa de riesgos.
- Estimar los riesgos y evaluar la vulnerabilidad de los recursos empresariales, comunitarios y del medio ambiente, ante las amenazas identificadas
- Formular un plan de emergencia que articule estrategias (procedimientos, recursos e instrumentos) para la prevención, control y atención de los riesgos evaluados para las actividades del proyecto.

- Contribuir a la consolidación de una cultura de administración de riesgos, para asegurar los recursos empresariales, humanos, físicos y financieros, así como la información y la política empresarial.
- Capacitar y concientizar sobre posibles riesgos, al personal que participa en todas las actividades del proyecto, los grupos comunitarios y la población del área, para lograr el desarrollo de respuestas inmediatas, eficientes y coordinadas.
- Establecer los procedimientos, recursos y apoyos interinstitucionales necesarios para activar el plan de contingencia.
- Establecer un Banco de Información para la administración de riesgos e implementación del plan de contingencia (plan estratégico y plan operativo).

3.7. Economía circular

Para esta línea estratégica se encontró específicamente un artículo de Perú, denominado “Innovaciones técnicas en el tratamiento de aguas acidas de mina con recuperación de subproductos con valor económico”, SRK Consulting (Perú) S.A. Osvaldo Aduvire (2019).

En este artículo se describen las mejores técnicas disponibles en la caracterización hidrogeoquímica de aguas de mina, junto con procesos innovadores desarrollados para la recuperación de metales y/o subproductos con valor económico de las aguas ácidas de mina.

La metodología de recuperación de subproductos, permite dimensionar sistemas de tratamiento de aguas de mina más eficientes, con un menor consumo de reactivos y mejor control ambiental, además, de considerar a los efluentes de mina como fuentes de donde es posible recuperar la carga metálica y obtener un subproducto con aprovechamiento económico, hacia la viabilidad técnica, ambiental y económica de la metodología a evaluar.

La aplicación de técnicas innovadoras permite considerar a los residuos generados en la operación minera como recursos de segunda generación con posibilidades de aprovechamiento y recuperación para obtener subproductos con valor económico.

La obtención de subproductos con valor económico puede tener una repercusión económica directa al consumir menor cantidad de cal, pero, también conlleva otros beneficios añadidos como: reducir el volumen de lodos a trasladar a los depósitos para su almacenamiento, por tanto, aumenta la vida de estos depósitos y reducir los costos de operación, entre otros.

3.8. Contexto colombiano- reuniones con empresas

Como resultado de las reuniones con las empresas mineras seleccionadas a partir de su experiencia, conocimiento respecto al manejo y gestión en procesos y proyectos relacionados con presas de relaves (colas) y drenaje ácido minero, a continuación, se presenta la información suministrada por cada una de ellas asociada con las líneas estratégicas definidas para estandarizar los procesos de DAM.

- **UNIMINAS S.A.S**

Realizan la caracterización físico química del agua en cada una de las minas, para definir en cuales se presenta DAM. Resaltan que son costos elevados.

Implementan tratamiento piloto pasivo- humedal anaerobio (lo establecieron posterior a la evaluación de la mejor alternativa por condiciones de la zona, tales como el área disponible y topografía de la zona).

Realizan la caracterización fisicoquímica y microbiológica del cuerpo de agua receptor del vertimiento. Se hace en el marco del seguimiento ambiental y se reporta en los Informes de Cumplimiento Ambiental (ICAS). Según el avance de la explotación realizan seguimiento a la calidad del agua. Consideran importante realizar seguimiento a los sistemas de sedimentación previa al sistema de tratamiento (retención de polvo de carbón), para no colmatar el sistema de tratamiento- humedal anaerobio. Las labores de mantenimiento se realizan con frecuencia trimestral.

- **MINER S.A.**

En las fases de predicción, se determinó que no se presenta sulfurización y el potencial de generación de DAM es muy bajo. Cuentan con sistemas de tratamiento de aguas que permiten garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente. Se realiza monitoreo de calidad de agua, aguas arriba y aguas abajo de la operación.

- **GRAN COLOMBIA GOLD**

Esta empresa no genera DAM. Realizó estudios de predicción para drenajes ácidos mineros y no encontró que la roca presentara potencial generador de acidez.

- **CERROMATOSO S.A. - SOUTH32**

Realiza la caracterización geoquímica en cada zona de explotación incluyendo presa de relaves, para determinar potencial de acidez. Se estableció la ausencia de

sulfuros y una probabilidad muy baja de generación de acidez (se realizan pruebas ABA y potencial generación de acidez).

Realiza la caracterización geoquímica en cada zona previo inicio de explotación y durante las diferentes etapas del proyecto, para determinar potencial de acidez.

El proyecto cuenta con canales perimetrales, piscinas de sedimentación, sumideros y demás obras de conducción de agua para garantizar su control y seguimiento. Esta agua no requiere ningún tipo de tratamiento y se reusa en actividades del proyecto.

Se realizan actualizaciones frecuentes al plan de cierre con corte a 5 años previos al cierre (ingeniería conceptual) y 2 años previos al cierre (ingeniería de detalle).

- **ANTIOQUIA GOLD LTD**

Se realizan pruebas estáticas y cinéticas para verificar la persistencia de la acidez y la presencia de metales.

- **DRUMMOND LTD**

Se indica que se debe realizar una predicción (mineralogía, geoquímica), antes de abrir un tajo, para ellos utilizan núcleos de perforación para realizar un estudio geoquímico de caracterización y determinar los potenciales de los materiales para generar DAM. Se realizan pruebas estáticas iniciales y si se presenta potencial de generación de acidez, se realizan pruebas dinámicas.

En el proyecto La Loma que lleva más de 20 años de operación, se ha realizado zonificación de materiales, botaderos, esta información es usada para el planeamiento minero.

Realizan caracterización química de los materiales sobrantes (metales pesados) tanto de los frentes de explotación, del proceso de beneficio, de la transformación, lixiviados resultantes, y demás procesos químicos contaminantes que puedan presentarse durante el tiempo de funcionamiento de las zonas dedicadas a la disposición temporal o definitiva de los sobrantes del proceso minero.

Se realizó mineralogía de rayos X, análisis de sulfuros, y pruebas estáticas ABA se revisó la neutralización con más de 50 muestras de roca aguas, sedimentos, entre otras. El ensayo de rayos X se realizó en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y el de metales en laboratorios acreditados de Colombia.

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) quien es la autoridad ambiental competente para realizar el seguimiento ambiental del proyecto, toma el tema de drenajes ácidos como un riesgo latente.

- **CONTINENTAL GOLD**

Se realizan inicialmente pruebas estáticas para la predicción del DAM, de ser necesario y si se presenta potencial generación de acidez, se realizan pruebas cinéticas para evaluar el riesgo de DAM.

Se realizan actividades de control preventivo (mezcla de materiales para neutralizarlos), se previene la infiltración y se realiza un adecuado manejo de aguas de escorrentía.

- **GRAMALOTE COLOMBIA LTD**

Se realiza caracterización geoquímica y pruebas estáticas y cinéticas. Se determinó que el material estéril no tiene potencial de generación de DAM. En las colas de lixiviación se determinó potencial de generación y se estableció como medida de manejo la disposición sub acuática. Las colas de lixiviación se usan nuevamente en el proyecto y se estableció que el tiempo que transcurre antes de su uso en el proceso no es suficiente para generar DAM. Se establecieron áreas de no contacto y de contacto de agua con fuentes potencialmente generadoras de DAM y se realiza un manejo diferenciado de aguas.

4. METODOLOGÍA

Para la conceptualización y elaboración de la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con drenajes ácidos, se tomó como base la información obtenida en las reuniones desarrolladas con empresas mineras, mesas de trabajo con actores del sector y documentos nacionales e internacionales recopilados, revisados y analizados en el desarrollo de la presente consultoría.

La construcción de los lineamientos fue realizada por el equipo de trabajo de ATG Ltda., conformado por profesionales en diferentes áreas de la ingeniería de minas, geología e ingeniería ambiental, a través del método heurístico de análisis, en donde se evaluó conjuntamente la información recopilada identificando y seleccionando aspectos, criterios, directrices, buenas prácticas y técnicas disponibles a nivel internacional, que fueran aplicables al sector minero colombiano, teniendo en cuenta las particularidades del mismo y del territorio.

Teniendo en cuenta las Líneas Estratégicas ya establecidas, se buscó una definición oficial de Lineamiento para lograr identificar una interrelación entre estos conceptos, obteniendo que es una orientación de carácter general, corresponde a una disposición o directriz que debe ser implementada en las entidades del Estado colombiano (<https://www.mintic.gov.co/arquitecturati/630/w3-article-9471.html>).

Las líneas estratégicas definidas previamente y que se evidencian en la **Figura 14** serán abordadas a lo largo del presente documento.

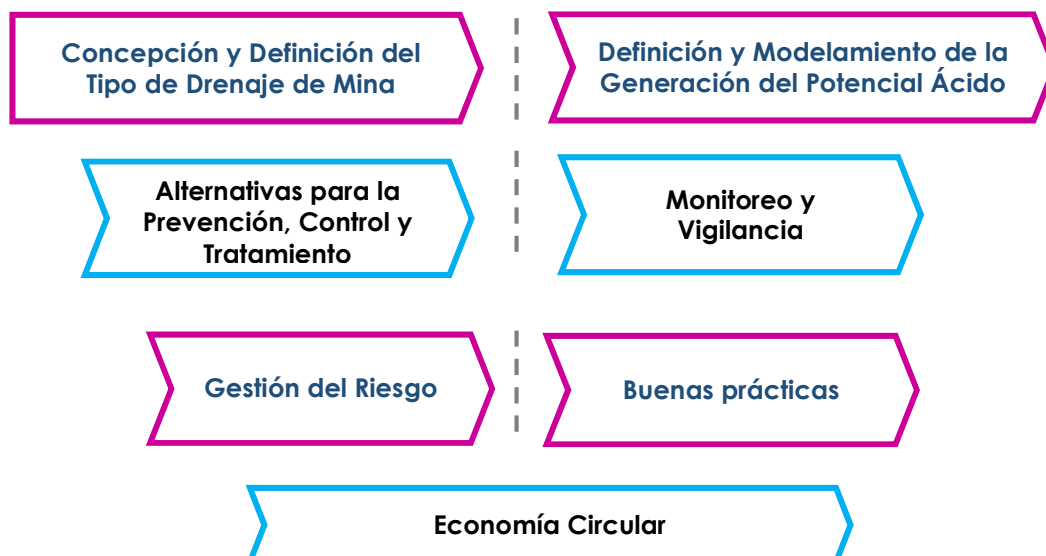


Figura 14. Líneas Estratégicas para drenajes ácidos mineros.
Fuente: ATG Ltda., 2020.

A partir del conocimiento y definición de cada **Línea Estratégica**, y del significado del concepto de **Lineamiento**, se formularon cuestionamientos respecto a un proyecto minero que involucrase la generación de drenajes ácidos mineros, para satisfacer un paso a paso para cada Línea; con base en esos planteamientos a modo de inquietudes, se fueron creando Lineamientos, y se añadió a cada lineamiento específico el enfoque de directriz; es decir, que se necesita o quiere conocer?, que para esta estructura se va a denominar **Componente**; cada componente debe tener un propósito o **Alcance**, bajo el interrogante de para qué necesitamos conocer ese componente?; pregunta que se resuelve con la **Actividad o Información Requerida**, que se sintetizaría en el cómo logramos construir dicha información para satisfacer el lineamiento planteado?, ver Figura 9.

En síntesis, los **Lineamientos** se estructuraron a partir de **Componentes**, que corresponden a la información a conocer para su aplicación; para cada componente se establece un **Alcance**, y una **Actividades** específicas que permitirán su desarrollo; lo que en conjunto estructura lineamientos sólidos y consistentes que dan respuesta a necesidades y requerimientos para cada **Línea Estratégica**.

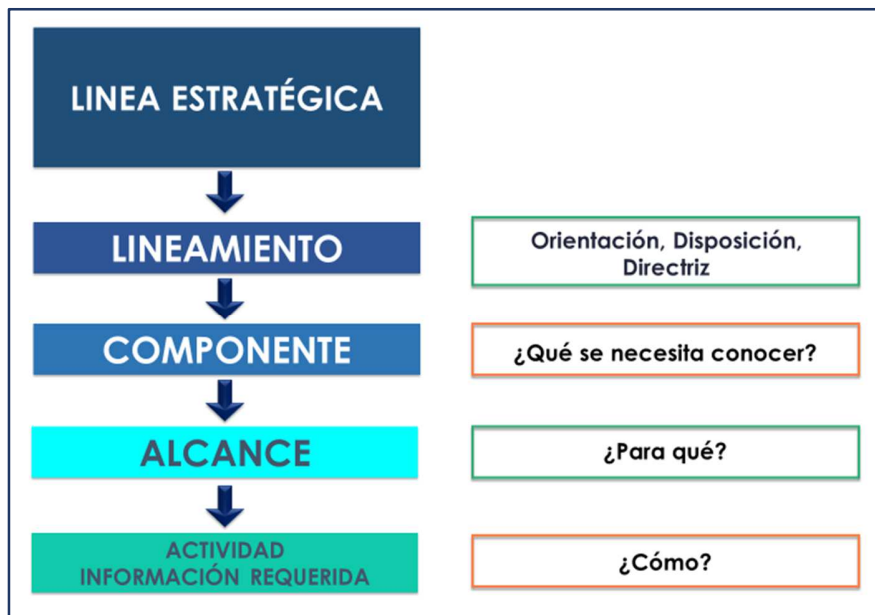


Figura 15. Estructura de Líneas Estratégicas y Lineamientos para drenajes ácidos mineros.
Fuente: ATG Ltda., 2020.

5. LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL DRENAJE ÁCIDO MINERO - DAM

Los lineamientos técnicos en los procesos de drenaje ácido minero, surgen de la necesidad de disponer de elementos de valoración para determinar posibles afectaciones en el desarrollo de un proyecto minero, los cuales deben convertirse en marco de referencia en la estructuración o actualización de los planes de Trabajos y Obras (PTOs) o Planes de Trabajos e Inversiones (PTIs), según el caso.



Estos lineamientos tienen por objetivo establecer medidas específicas que se deberán implementar en las actividades mineras, dentro de una ruta lógica de planeación, que permitan asumir una minería social y ambientalmente responsable.

A continuación, en las tablas 20 a 26, se presentan los Lineamientos técnicos formulados para el Drenaje Ácido Minero-DAM, con sus correspondientes Componentes, Alcances y Actividades, para cada Línea Estratégica establecida.

Tabla 20. Lineamientos de la Línea Estratégica Concepción y Definición del Tipo de Drenaje

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. CATEGORIZAR EL TIPO DE DRENAJE	1. Tipos de drenaje	Determinar el nivel de acidez o solubilidad de un depósito mineral	Recolección selectiva de muestras de la roca mineralizada. Determinación de pH Pruebas estáticas

Tabla 21. Lineamientos de la Línea Estratégica Definición y Modelamiento de la Generación del Potencial Ácido.

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN	1. Caracterización de la roca y del mineral	Determinar las características físicas y mineralógicas que intervienen en la generación del DAM	Recolección selectiva y espacial de muestras <ul style="list-style-type: none"> Núcleos, afloramientos, túneles exploratorios Rocas encajantes o respaldos Análisis físico de mineralizaciones Análisis petrográfico
	2. Caracterización geoquímica inicial	Definir condiciones geoquímicas del estéril e intervalos litológicos	Recolección selectiva y espacial de muestras en: <ul style="list-style-type: none"> Núcleos, afloramientos, túneles exploratorios Rocas encajantes o respaldos, intervalos litológicos Análisis ácido - base descriptivo, que determine potencial de acidez y potencial de neutralización
	3. Caracterización hidrológica y balance hídrico	Determinar los factores hídricos que predominan en el área o zona a intervenir	Desarrollo de modelo hidrográfico conceptual, donde determine efluentes presentes, caudales, cantidad y distribución de recargas de la cuenca. Balance hídrico del área o zona, que incluya registros de precipitación y climatología.
	4. Definir el estado de predicción al finalizar la etapa de exploración	Conocer y determinar el estado de generación del potencial ácido en esta etapa	Resultados de análisis mineralógico Desarrollo del modelo geológico Resultados de pruebas estáticas Modelo geoquímico conceptual Caracterización hidrológica

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
	5. Diseño del Plan de caracterización y predicción	Establecer los planes de caracterización y predicción para las etapas de construcción y montaje, explotación y de cierre y post cierre de la operación minera	Programación para manejo selectivo del material con capacidad de reacción Programa de muestreo en roca y mineral y del agua Programación de las pruebas (estáticas y cinéticas) Evaluación de incertidumbres y riesgos Programación del alcance y frecuencia de monitoreo durante la vida de la mina.
2. DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE	1. Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras de DAM en las obras mineras	Determinar la generación de potencial ácido en la construcción y montaje de obras y facilidades mineras	Manejo selectivo del material con capacidad de reacción En las obras de excavación u otros procesos de movimiento de tierras se debe establecer: Mapeo de zonas mineralizadas y zonas estériles Litología, alteraciones, mineralogía pH Volúmenes de estéril y mineral Información hidrológica e hidrogeológica Pruebas a escala y resultados de análisis
3. DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN	1. Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras del DAM	Determinar la generación de potencial ácido en la explotación a cielo abierto y/o subterránea Determinar la generación del potencial ácido en botaderos	Identificación y manejo selectivo del material con capacidad de reacción, Geología: litología, alteraciones, mineralogía Volúmenes de material y estéril Muestreo de superficies descubiertas, (taludes, bancos, etc.), como en la mina subterránea (galerías, cruzadas, chimeneas, etc) Determinación de minerales capaces de producir ácido y/o neutralizar Pruebas estáticas y cinéticas Método de disposición del material y edad del botadero, volúmenes y secuencia de llenado Análisis Granulométrico

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
			Información geológica, litología, alteración y mineralogía del material Tonelaje y volúmenes Modelo de bloques y modelo de leyes Pruebas estáticas y cinéticas
		Determinar la generación del potencial ácido en depósitos de relave	Variabilidad en el tiempo, volúmenes y secuencia de llenado Disposición del material, según tipo de yacimiento y tipo de depósito Balance metalúrgico, cantidad de mineral presente que pueda ser utilizado Balance hidrológico y manejo de agua (circulación, recirculación, lugar de entrada y salida, etc) Pruebas estáticas de los materiales Pruebas cinéticas del agua circulante en el depósito.
		Determinar la generación del potencial ácido en depósitos de lixiviación	Tipo y distribución de ripio proveniente del yacimiento Variabilidad en el tiempo, volúmenes y secuencia de llenado Tipo y cantidad de material flotable, determinando leyes de recuperación Manejo de agua (circulación, recirculación, información de lavados del depósito o lavado final) Pruebas estáticas de sedimentos y pruebas cinéticas del agua circulante
	2. Definición y determinación de modelos	Definir y desarrollar el o los modelos a utilizar para evaluar la generación del DAM	Modelos conceptuales, empíricos o determinísticos, según el caso. <ul style="list-style-type: none"> • Información Geológica • Información geoquímica • Información hidrológica e hidrogeológica

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
			<ul style="list-style-type: none"> • Información metalúrgica • Resultados de las pruebas cinéticas del depósito mineral
	1. Definición del Plan de Monitoreo durante la etapa de cierre	Ejecutar el Plan de Monitoreo durante el cierre de la operación minera	Muestreo espacial y representativo de fuentes generadoras Muestreo de sedimentos y de agua en la trayectoria de efluentes y receptores Pruebas estáticas y cinéticas Evaluación de resultados
4. DEFINIR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO A PARTIR DE LAS ETAPAS DE CIERRE Y POST CIERRE	2. Definición del Plan de Monitoreo durante la etapa de post-cierre	Ejecutar el Plan de Monitoreo durante la etapa de post-cierre de la operación minera	Plan de post-cierre de la operación minera Consideraciones ambientales y sociales Muestreo en receptores Capacitación de personal para el monitoreo Creación de un fondo post-cierre

Tabla 22. Lineamientos de la Línea Estratégica Alternativas para la Prevención, Control y Tratamiento.

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. EVITAR Y/O LIMITAR LA INTERACCIÓN DE LOS FACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROCESO GENERADOR DE DAM	1. Geoquímica de la fuente potencialmente generadora	Manejar el material con capacidad de reacción de manera directa	Según la geoquímica del yacimiento, realizar el manejo del material mediante el desarrollo de actividades tales como: a) Planificación de la explotación b) Manejo selectivo del material c) Mezcla de materiales d) Microencapsulación/ Pasivación e) Gestión de relaves (colas)
	2. Línea base ambiental del medio físico- Balance hídrico	Minimizar y/o impedir el contacto con agua y/o con el oxígeno/ Evitar la infiltración	Con la información del balance hídrico, implementar las medidas que permitan realizar el manejo de agua para impedir el contacto con el material con potencial de generación de DAM. Las principales medidas son: a) Control del nivel del agua b) Desvío de cuerpos de agua c) Barreras ingenieriles d) Cubiertas

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
	3. Tipo de mineralización y alteración del material de las fuentes potencialmente generadoras	Inhibir la actividad bacteriana involucrada en el proceso de generación de DAM	Uso de bactericidas para el control inmediato del DAM y de ser necesario control microbiano sobre el proceso de oxidación de la pirita (FeS ₂).
2. CONTROLAR EL PROCESO DE GENERACIÓN DEL DAM	1. Análisis, verificación y mejora de alternativas de prevención y/o control del DAM	Controlar el DAM dentro de la instalación minera	Se deben realizar las actividades que permitan: 1. Evaluar cambios en las fuentes potencialmente generadoras de DAM 2. Revisión y mejora de las alternativas de prevención y/o control en la generación de DAM
3. TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DAM	1. Predicción del potencial de generación de metales solubles y drenajes ácidos en aguas del proceso minero	Analizar la calidad del agua asociada a los DAM y establecer parámetros que deban ser tratados para cumplir con la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).	Analizar factores fisicoquímicos y microbiológicos que favorecen la generación de acidez en el agua del proceso minero, así como la movilización, acumulación, lixiviación, toxicidad y disponibilidad de los EPT's
	2. Definición del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM	Seleccionar la tecnología de tratamiento más apropiada para dar cumplimiento a la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible)	Las principales tecnologías de tratamiento de aguas que pueden mejorar la calidad de agua con potencial de generación de DAM: Pasivos (bióticos- abióticos) Activos (bióticos- abióticos)
	3. Desarrollo y ejecución del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM	Garantizar el adecuado tratamiento de los DAM, dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).	Para garantizar el adecuado tratamiento de los DAM, se debe realizar el monitoreo periódico de calidad de agua, la evaluación del sistema de tratamiento y el análisis de la eficiencia del sistema.

Tabla 23. Lineamientos de la Línea Estratégica Monitoreo y Vigilancia

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MONITOREO Y	1. Monitoreo y Seguimiento a fuentes potencialmente generadoras de los DAM	Prevenir y/o controlar la generación de los DAM	Realizar el seguimiento al programa de caracterización, programa de predicción y al programa de prevención y control.

SEGUIMIENTO A LA TRAYECTORIA DEL DAM	2. Monitoreo y Seguimiento a medios de exposición (transporte) de los DAM	Impedir y/o controlar la movilidad de los DAM en el medio	Realizar seguimiento en la etapa de prevención, control y en la etapa de tratamiento.
	3. Monitoreo y Seguimiento a los receptores de los DAM	Prevenir el impacto a posibles receptores de los DAM	Realizar seguimiento periódico a la calidad del agua y sedimento de las fuentes receptoras de drenajes, evaluando los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
2. DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MUESTREO A LA TRAYECTORIA DEL DAM	1. Muestreo en fuentes potencialmente generadoras de los DAM	Determinar las características en las explotaciones y en todo tipo de depósitos	Realizar un programa de muestreo por fases así: Fase 1. Muestreo inicial (se considera como una fase exploratoria, que sirve como levantamiento de la información más relevante de los materiales en estudio (caracterización preliminar) Fase 2. Muestreo detallado (Validar los datos obtenidos en la fase inicial, enfocar el muestreo a definir nuevos parámetros que permitan desarrollar una caracterización más detallada de la fuente) Próximas fases del muestreo (por ejemplo muestreo específico para un programa geoquímico en la fase de operación)
	2. Muestreo en medios de exposición (transporte) de los DAM	Determinar la calidad del medio con potencial de afectación de DAM durante su flujo	Revisión y uso de metodologías, guías, protocolos de muestreo establecidos a nivel nacional, enmarcado con los parámetros establecidos por la Res. 631 de 2015, igualmente instructivos internacionales que puedan dar soporte con relación al desarrollo del muestreo en los medios de exposición.
	3. Muestreo en los receptores de los DAM	Determinar afectaciones a los receptores potenciales de DAM	Revisión y uso de metodologías, guías, protocolos de muestreo establecidos a nivel nacional e internacional.

Tabla 24. Lineamientos de la Línea Estratégica Gestión del Riesgo.

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. GESTIONAR EL RIESGO ASOCIADO AL DAM DURANTE	1. Conocimiento del riesgo	Determinar posibles impactos o afectaciones por generación del DAM	Evaluación de riesgos (en fuentes generadoras, rutas de exposición y receptores) Estimación de la magnitud de contaminantes generados y transportados

TODO EL CICLO MINERO			Definición de la significancia de los riesgos detectados Elaboración de mapa de riesgos
	2. Reducción del riesgo	Establecer opciones preventivas, de control y tratamiento	Acciones para minimizar la contingencia Formulación de planes de emergencia Preparar planes de contingencia Plan de monitoreo y revisión de riesgos
	3. Manejo del riesgo o contingencia	Definir y ejecutar plan de acción para atender y controlar cualquier contingencia relacionada con el DAM	Capacitación de personal Implementación y ejecución de los planes Banco de información para la administración de riesgos

Tabla 25. Lineamientos de la Línea Estratégica Buenas Prácticas.

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. DISMINUIR LA GENERACIÓN DE DAM	1. Limitar el contacto de aguas de escorrentía con aguas asociadas a DAM	Disminuir el caudal de agua que pueda tener contacto con fuentes potencialmente generadoras de DAM	Con base al diseño y planeamiento minero y a las obras desarrolladas para el manejo de aguas, contemplar las siguientes obras para limitar el contacto de aguas de escorrentía con aguas asociadas a DAM: a) Canales perimetrales b) Cunetas y sistemas de drenaje c) Canales de coronación d) Revegetalización de áreas expuestas e) Clasificación de tipos de agua dentro del proyecto minero (aguas de contacto y no contacto)
	2. Reducir el volumen de agua en relaves (colas)	Minimizar el riesgo de generación de DAM en presas de relaves (colas)	Con la información asociada a porcentajes de humedad, potencial de generación de DAM y características generales del depósito de relaves, desarrollar las actividades de: a) Reducción de la humedad de relaves (colas) b) Drenaje de relaves (colas)

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
2. PREVENIR LA GENERACIÓN DE DAM	1. Incluir desde la etapa de exploración la caracterización sistemática de fuentes potencialmente generadoras	Determinar las condiciones mineralógicas y fisicoquímicas de las rocas y el mineral, así como de la calidad del agua durante la vida del proyecto minero	Implementar el programa de seguimiento y monitoreo en fuentes potencialmente generadoras: seguimiento de todas las acciones llevadas a cabo durante la descripción/caracterización, predicción y evaluación de riesgo ambiental.
3. REALIZAR SEGUIMIENTO REGULAR DE LA CALIDAD DE AGUA EN FUENTES POTENCIALMENTE GENERADORAS	1. Mediciones de calidad de agua periódicas en fuentes potencialmente generadoras para detectar anomalías en etapas tempranas	Realizar el seguimiento permanente a las fuentes potencialmente generadoras en caso de detectarse anomalías y aspectos críticos en etapas tempranas que puedan afectar el control y tratamiento de DAM	Se deben realizar entre otras las siguientes actividades para garantizar el seguimiento de calidad de agua en fuentes potencialmente generadoras: a) Establecer estaciones de control y seguimiento de calidad de agua en zonas representativas dentro del proyecto minero. b) Mediciones de parámetros asociados a generación de DAM en el agua del proceso minero (pH, temperatura, sulfatos, OD) c) Instalación de instrumentos para medir en la fuente potencialmente generadora de DAM características fisicoquímicas del agua.

Tabla 26. Lineamientos de la Línea Estratégica Economía Circular

LINEAMIENTO	COMPONENTE	ALCANCE	ACTIVIDAD
1. EVALUAR EL POTENCIAL DESARROLLO DE MINERÍA SECUNDARIA	1. Reactivación de operaciones para extracción de minerales dispuestos en fuentes potencialmente generadoras de DAM	Gestionar el reúso de minerales dispuestos en fuentes potencialmente generadoras con el fin de disminuir el volumen de DAM que puedan generarse en éstas	Con base a la ubicación y descripción detallada de zonas de disposición de materiales en proyectos anteriores realizar entre otras las siguientes actividades para evaluar el potencial desarrollo de minería secundaria: a) Investigación de las características de los minerales dispuestos en operaciones anteriores b) Análisis para determinar características de peligrosidad de los materiales depositados en la fuente potencialmente generadora

			c) Evaluar relación beneficio/costo de la extracción de minerales y de la implementación de medidas para el control o tratamiento de efluentes mineros
2. EVALUAR POSIBLE REÚSO DE AGUA RESIDUAL	1. Definir la viabilidad del reúso o reutilización de agua asociada a DAM dentro del proyecto minero	Disminuir el volumen de agua residual tratada asociada a DAM que deba ser vertida	<p>Determinación de las actividades dentro del proceso minero en las que pueda ser usada agua residual tratada y características mínimas de calidad para su uso. Realizar entre otras las siguientes actividades para evaluar el potencial reúso:</p> <p>a) Análisis para determinar características de peligrosidad del agua</p> <p>b) Reúso dentro del proceso realizado en instalaciones mineras (torres de enfriamiento, riego de vías, entre otros)</p>

A renglón seguido, para cada Línea Estratégica se presentan los lineamientos técnicos, los cuales se estructuran en una ficha por cada componente o alcance, según el caso, donde de manera detallada, se describen las actividades a realizar y se desglosa la información requerida para su ejecución.

5.1. Concepción y definición del tipo de drenaje

Reúne las técnicas que permite definir el tipo de drenaje presente en un depósito mineral y determinar su nivel de acidez o solubilidad.

LINEAMIENTO 1: CATEGORIZAR EL TIPO DE DRENAJE

Componente 1: Tipo de drenaje

I. Alcance

Determinar el nivel de acidez o solubilidad de un depósito mineral.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- pH
- Potencial de acidez
- Potencial alcalino

IV. ¿Cómo determinar el tipo de drenaje?

- Procedimiento de muestreo:** en las áreas o zonas a explorar se deben recoger de manera selectiva unas muestras de la roca mineralizada.
- Análisis:** Realización de prueba de titulación de pH y análisis estático de roca para determinar relación de acidez/alcalinidad.

5.2. Definición y modelamiento de la generación del potencial ácido a partir de las etapas de exploración, construcción y montaje, explotación, cierre y post cierre de las operaciones de mina.

Hace referencia a las técnicas que permiten predecir y caracterizar la generación del Drenaje ácido Minero – DAM y los procedimientos para determinar los factores involucrados en la generación de este potencial, provenientes tanto de las explotaciones como de las diversas fuentes generadoras de drenaje ácido durante las diferentes etapas de un proyecto minero, desde el inicio de la exploración hasta el cierre y post-cierre de la operación minera.

LINEAMIENTO 1: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

Componente 1: Caracterización de la roca y del mineral

I. Alcance

Determinar las características físicas y mineralógicas que intervienen en la generación del DAM.

II. Etapas del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- Tipo de roca
- Tipo de mineral
- Mineralización y alteraciones
- Recolección de muestras.
- Análisis mineralógico

IV. ¿Cómo determinar las características físicas?

- a) **Procedimiento de muestreo:** en las áreas o zonas a explorar se debe recoger de manera selectiva el material, estableciendo un orden de muestreo espacialmente representativo de los diferentes tipos de roca a intervenir.

- b) Manejo selectivo del material:** Toma de muestras provenientes de las rocas encajantes o de los respaldos. Recolección de muestras en núcleos, afloramientos, túneles exploratorios.
- c) Mineralización:** Determinar mediante análisis físico, la litología, todo tipo de mineralización y las alteraciones presentes en la roca estéril.
- d) Análisis mineralógico:** Realización de análisis petrográfico, mediante secciones delgadas, con el fin de determinar minerales presentes.

LINEAMIENTO 1: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

Componente 2: Caracterización geoquímica inicial

I. Alcance

Definir condiciones geoquímicas del estéril e intervalos litológicos.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- Tipos de roca
- pH
- Análisis estáticos
- Potencial de acidez
- Potencial de neutralización
- Relación acidez/alcalinidad
- Tipo de drenaje

IV. ¿Cómo definir las condiciones geoquímicas?

- Procedimiento de muestreo:** En las áreas o zonas a explorar se debe recoger de manera selectiva el material, estableciendo un orden de muestreo espacialmente representativo de los diferentes tipos de suelo y roca a intervenir.
- Manejo selectivo del material:** Toma de muestras provenientes de las rocas encajantes o de los respaldos e intervalos litológicos. Recolección de muestras en núcleos, afloramientos, túneles exploratorios.
- Análisis:** Realización de pruebas estáticas, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, conductividad y disponer de un análisis ácido-base descriptivo de minerales capaces de producir ácido y/o neutralizar, detallando los elementos traza presentes.
- Tipo de pruebas:** Se debe contemplar al menos una de las siguientes pruebas:
Prueba de Balance Acido-Base (ABA)

Prueba Modificada de Balance Acido-Base

NOTA:

Pruebas estáticas, para calcular PA y PN:

Si $PN/PA < 3$, se deben realizar pruebas dinámicas.

Si $PN/PA < 1$, se deben realizar pruebas adicionales de toxicidad

LINEAMIENTO 1: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

Componente 3: Caracterización hidrológica y balance hídrico

I. Alcance

Determinar los factores hídricos que predominan en el área o zona a intervenir.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- Delimitación de la cuenca hidrográfica
- Caudales multianuales
- Registros de la precipitación
- Registro de temperaturas diarias
- Estimación de las recargas de la cuenca hidrográfica
- Estimación de los períodos de sequía, evapotranspiración
- Datos sobre variabilidad climática

IV. ¿Cómo determinar el balance hídrico?

- Información hidrológica:** se tomará y analizará información hídrica del área exploratoria, determinado los efluentes presentes, los caudales multianuales y la estimación de la cantidad y distribución estacional de las recargas de la cuenca hidrográfica.
- Precipitación:** se debe tomar información de la distribución temporal de la precipitación o régimen de lluvias, donde se estime los períodos de sequía y datos sobre evapotranspiración.
- Climatología:** Se adelantará un análisis de la climatología predominante y sobre su variabilidad, teniendo en cuenta algunos escenarios de cambio climático.
- Balance hídrico:** Se establecerá con la recolección y análisis de datos hídricos, meteorológicos, de temperatura y de variabilidad climática presentes en el área de influencia.

LINEAMIENTO 1: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

Componente 4: Definir el estado de predicción al finalizar la etapa de exploración

I. Alcance

Conocer y determinar el estado de generación del potencial ácido en esta etapa.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- Geología del área o zona
- Resultados de los análisis mineralógicos
- Caracterización hidrológica
- Caracterización hidrogeológica preliminar
- Caracterización geoquímica inicial
- Pruebas cinéticas

IV. ¿Cómo definir el estado de predicción?

- a) Desarrollo del modelo geológico:** Compilación datos históricos, resultados de análisis de núcleos de perforación o de roca, litología, mineralizaciones, alteraciones, aspectos estructurales, interpretación geológica.
- b) Resultados de análisis mineralógico:** del análisis petrográfico, mediante secciones delgadas, con el fin de determinar minerales presentes.
- c) Resultados de Análisis:** Resultados de pruebas estáticas, que incluye pH, concentración de sulfuros y minerales capaces de producir ácido y/o neutralizar, detallando los elementos traza o metales y metaloides presentes. Al igual, resultado de las pruebas cinéticas basadas en la reproducción de las condiciones in situ.
- d) Caracterización geoquímica inicial:** Modelo geoquímico conceptual, resultados de análisis de roca y agua, caracterización del agua subterránea y superficial, interpretación de drenaje ácido potencial, modelado y simulación de los procesos ácido generadores.

NOTA: Estos resultados preliminares permitirán a que en la fase de planeamiento de la mina se considere o no el manejo de los drenajes ácidos que podrían generarse en la fase de explotación y cierre de la instalación.

LINEAMIENTO 1: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLORACIÓN

Componente 5: Diseño del Plan de caracterización y predicción

I. Alcance

Establecer los planes de caracterización y predicción para las etapas de construcción y montaje, explotación y de cierre y post cierre de la operación minera.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X			

III. Información requerida

- Modelo geológico
- Volúmenes de roca y mineral
- Manejo de estéril
- Modelo geoquímico conceptual
- Modelamiento de bloques
- Modelo hidrogeológico
- Balance de agua y carga
- Pruebas estáticas y dinámicas
- Evaluación de incertidumbres y riesgos
- Diseño de monitoreo

IV. ¿Cómo establecer el plan de caracterización y predicción?

- a) **Planificación de la explotación:** Para la planificación de la etapa de explotación y cierre, tanto en minas a cielo abierto como subterráneas se deberán tener en cuenta información geológica (litología, alteraciones, mineralogía), modelo geoquímico, información hidrológica y climatología, información hidrogeológica sobre permeabilidad e impermeabilidad del sistema, balance de agua y recargas.

- b) **Programación para manejo selectivo del material:** programación de detalle del tipo y distribución del material con capacidad de reacción, haciendo la clasificación de los diferentes materiales a tener en cuenta para el desarrollo de la explotación.
- c) **Programa de muestreo:** Contempla la distribución espacial del tipo y número de muestras en roca y mineral, tanto de los frentes de explotación como de las diversas fuentes generadoras de drenaje ácido, así como del agua presente.
- d) **Pruebas de material y de agua:** Programación del tipo y número de pruebas a realizar, tanto de pruebas estáticas de los materiales, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales y metaloides presentes, como de pruebas cinéticas de agua.
- e) **Evaluación de incertidumbres y riesgos:** Identificación y cuantificación de incertidumbres relevantes y determinación de impactos o riesgos que puedan presentarse en el tiempo.
- f) **Diseño de monitoreo:** comprende la programación del alcance y frecuencia de monitoreo durante la vida de la mina.

LINEAMIENTO 2: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

Componente 1: Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras de DAM en las obras mineras

I. Alcance

Determinar la generación de potencial ácido en la construcción y montaje de obras y facilidades mineras.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X		

III. Información requerida

- Mapeo de zonas mineralizadas y zonas estériles
- Litología, alteraciones, mineralogía
- pH
- Volúmenes de estéril y mineral
- Información hidrológica e hidrogeológica
- Pruebas a escala y resultados de análisis

IV. ¿Cómo determinar el DAM en la construcción y montaje?

- Planificación de las obras:** En las obras de excavación u otros procesos de movimiento de tierras se debe establecer un orden de operación y coordinar posteriormente su depósito, mediante la clasificación de los materiales y los volúmenes del estéril a remover.
- Manejo selectivo del material:** Separación del material con capacidad de reacción, haciendo una separación del mismo previo a su depósito.
- Información geológica:** Comprende geología de los frentes descubiertos, que incluye litología, alteración y mineralogía y comportamiento estructural: fallas, diaclasas.

- d) **Información hidrogeológica:** Determinación de caudales e información sobre permeabilidad e impermeabilidad del sistema.
- e) **Procedimiento de muestreo:** Incluye muestras en las superficies descubiertas.
- f) **Pruebas de material y de agua:** Realización de pruebas estáticas de los materiales, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales presentes. Realización de pruebas cinéticas en el agua proveniente o circulante en las excavaciones.

LINEAMIENTO 3: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN

A continuación, se presenta la información específica para identificar cada una de las fuentes potencialmente generadoras de DAM. Por tal razón el componente 1 tiene alcances diferenciados para cada tipo de fuente.

Componente 1: Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras del DAM

I. Alcance

Determinar la generación de potencial ácido en la explotación a cielo abierto y/o subterránea.

II. Etapas del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Geología regional y del frente
- Mapeo de frentes
- Modelo estructural
- Volúmenes de estéril y mineral
- Información hidrológica
- Información hidrogeológica
- Pruebas a escala y resultados de análisis

IV. ¿Cómo determinar el DAM en las explotaciones mineras?

- a) Planificación de la explotación:** En las minas a cielo abierto o en mina subterránea, se tendrá en cuenta el sistema de explotación y la clasificación y manejo selectivo del material con capacidad de reacción. La clasificación de los diferentes materiales debe ser constantemente revisada y considerada al menos en los planes anuales.
- b) Información geológica:** Comprende geología regional y geología de los frentes de explotación: litología, alteración y mineralogía, definiendo zonas mineralizadas y zonas estériles y modelo estructural.

- c) **Información hidrogeológica:** Determinación de caudales e información sobre permeabilidad e impermeabilidad del sistema.
- d) **Procedimiento de muestreo:** Incluye muestras las superficies descubiertas, tanto en minería a cielo abierto (taludes, bancos, etc.), como en la mina subterránea (galerías, cruzadas, chimeneas, etc).
- e) **Pruebas de material y de agua:** Realización de pruebas estáticas de los materiales, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales o metaloides presentes. Realización de pruebas cinéticas en el agua proveniente o circulante en el depósito.

LINEAMIENTO 3: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN

Componente 1: Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras del DAM

I. Alcance

Determinar la generación del potencial ácido en botaderos

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	

III. Información requerida

- Historia de la construcción
- Información del plan minero
- Tonelaje y volúmenes
- Granulometría/ distribución del material.
- Geología
- Información del modelo de bloques y modelo de leyes
- Pruebas del material y de agua

IV. ¿Cómo determinar el DAM en botaderos?

- Planificación del depósito:** Diseño del botadero y disposición del material con capacidad de reacción, haciendo una distribución adecuada, según tipo de material proveniente del yacimiento (oro, cobre, hierro, carbón).
- Manejo selectivo del material:** Separación del material con capacidad de reacción, haciendo una separación del mismo previo a su depósito. La clasificación de los diferentes materiales debe ser constantemente revisada y considerada, al menos en los planes anuales.
- Historia del depósito:** Información histórica del depósito, método de disposición del material y edad del botadero, los volúmenes depositados, la secuencia de llenado y los volúmenes de material a depositar, granulometría y distribución del material.

- d) **Información geológica:** Incluye litología, alteración y mineralogía del material en deposición.
- e) **Modelo de bloques y de leyes:** se refiere a los sectores que contienen cuerpo mineralizado. Se debe disponer de información sobre coordenadas, nivel, mineral total, mineral soluble, mineralizaciones, densidad, leyes.
- f) **Pruebas de material y de agua:** Realización de pruebas estáticas de los materiales, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales y metaloides presentes. Realización de pruebas cinéticas en el agua presente o circulante en el depósito.

LINEAMIENTO 3: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN

Componente 1: Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras del DAM

I. Alcance

Determinar la generación del potencial ácido en depósitos de relave

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Tipo de yacimiento
- Tipo de depósito
- Historia de su construcción
- Balance metalúrgico
- Balance hidrológico
- Pruebas de material y de agua

IV. ¿Cómo determinar el DAM en depósitos de relave?

- Diseño del depósito de relave:** Comprende la clasificación y disposición del material con capacidad de reacción, haciendo una distribución adecuada, según tipo de yacimiento (oro, cobre, hierro) y tipo de depósito (embalse, tranque, espesado, filtrado, etc.).
- Historia de la construcción:** Que incluya etapa en que se encuentra el proyecto, análisis de la información histórica del depósito y su variabilidad en el tiempo, los volúmenes depositados, la secuencia de llenado y los volúmenes de material a depositar.
- Balance metalúrgico:** Se realiza., con el fin de determinar cantidad de mineral presente en el depósito, que pueda ser utilizado o despreciado. De ser necesario, realizar modelos matemáticos considerando la fracción flotable.
- Balance hidrológico:** Considerando el clima y su variabilidad y manejo de agua (circulación, recirculación, lugar de entrada y salida, etc.).

- f) **Pruebas de material estéril y de agua:** Realización de pruebas estáticas de los sedimentos, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales y metaloides presentes. Realización de pruebas cinéticas en el agua presente o circulante en el depósito.

LINEAMIENTO 3: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN

Componente 1: Identificación y caracterización de las fuentes potencialmente generadoras del DAM

I. Alcance

Determinar la generación del potencial ácido en depósitos de lixiviación

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Diseño de la pila o ripio
- Geología y mineralogía
- Tonelaje y volumen
- Información hidrogeológica del sistema
- Modelo hidrogeoquímico
- Información metalúrgica
- Pruebas de material y de agua

IV. ¿Cómo determinar el DAM en depósitos de lixiviación?

- Diseño de la pila:** Que contenga la clasificación y disposición del material con capacidad de reacción, según tipo de ripio proveniente del yacimiento (oro, cobre, hierro, carbón).
- Historia del depósito:** que incluya análisis de la información histórica del depósito y su variabilidad en el tiempo, los volúmenes depositados, la secuencia de llenado y los volúmenes de material a depositar
- Información metalúrgica:** con el fin de evaluar cantidad de mineral presente en el depósito y tipo y cantidad de material flotable, determinando leyes de recuperación y estimación de leyes remanentes.
- Balance hidrogeoquímico:** comprende la relación de calidad de agua y geoquímica del material, que incluye el manejo de agua (circulación,

recirculación, lugar de entrada y salida, Información de lavados del depósito o lavado final)

- e) **Pruebas de material y de agua:** Realización de pruebas estáticas de los sedimentos, que permitan determinar pH, concentración de sulfuros y minerales, detallando los metales y metaloides presentes. Realización de pruebas cinéticas en el agua proveniente o circulante en el depósito.

LINEAMIENTO 3: DEFINIR, CARACTERIZAR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE EXPLOTACIÓN

Componente 2: Definición y determinación de modelos

I. Alcance

Definir y desarrollar el o los modelos a utilizar para evaluar la generación del DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Modelo Geológico
- Modelo geoquímico
- Modelo hidrológico e hidrogeológico
- Balance metalúrgico
- Clasificación de drenaje ácido minero (DAM)
- Resultados de las pruebas cinéticas del depósito mineral

IV. ¿Cómo definir el o los modelos?

Se adelantarán modelos conceptuales, empíricos o determinísticos, según el caso.

LINEAMIENTO 4: DEFINIR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE CIERRE Y POST CIERRE

Componente 1: Definición del Plan de Monitoreo durante la etapa de cierre

I. Alcance

Ejecutar el plan monitoreo durante el cierre de la operación minera

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
			X

III. Información requerida

- Plan de cierre de la mina
- Generación de DAM en los frentes mineros
- Generación de DAM en las fuentes generadoras (botaderos, depósitos de relaves, depósitos de lixiviación)
- Generación de DAM en la trayectoria de efluentes

IV. ¿Cómo ejecutar el plan de monitoreo?

- a) **Análisis de generación del DAM:** Comprende el mapeo y análisis de la generación de DAM durante la etapa de explotación, tanto en frentes de explotación y en fuentes generadoras como en la trayectoria de efluentes, determinando puntos críticos y posibles impactos.
- b) **Plan de monitoreo:** Se deberá revisar y actualizar el plan de monitoreo al término de la explotación, determinando el alcance de muestreo tanto de las fuentes generadoras como de efluentes y receptores.
- c) **Ejecución del monitoreo:** Se hará una selección de muestreo representativo en los frentes de explotación y en los depósitos (botaderos, relaves, lixiviación) y se procederá a realizar las pruebas estáticas y cinéticas respectivas.
- d) **Evaluación de resultados:** Se adelantará una evaluación sobre resultado del monitoreo, definiendo posibles anomalías.

LINEAMIENTO 4: DEFINIR Y MODELAR LA GENERACIÓN DEL POTENCIAL ÁCIDO DURANTE LA ETAPA DE CIERRE Y POST CIERRE

Componente 1: Definición del Plan de Monitoreo durante la etapa de post-cierre

I. Alcance

Ejecutar el plan monitoreo durante el post-cierre de la operación minera

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
			X

III. Información requerida

- Plan de post-cierre de la operación minera
- Generación de DAM durante el monitoreo del cierre
- Evaluación de resultados
- Consideraciones ambientales y sociales

IV. ¿Cómo ejecutar el plan de monitoreo?

- Análisis de generación del DAM:** Comprende el mapeo y análisis de la generación de DAM durante la etapa de cierre, tanto en frentes de explotación y en fuentes generadoras desmanteladas, como en la trayectoria de efluentes, determinando puntos críticos y posibles impactos.
- Ejecución del monitoreo:** Se hará una selección de muestreo representativo en los frentes de explotación y en los depósitos desmantelados (botaderos, relaves, lixiviación) y en receptores y se procederá a realizar las pruebas estáticas y cinéticas respectivas.
- Evaluación de resultados:** Se adelantará una evaluación de resultados del monitoreo, definiendo posibles anomalías.
- Administración:** Desarrollo de un plan de capacitación para realizar el monitoreo y creación de un fondo post-cierre

5.3. Alternativas para la prevención, control y tratamiento del DAM

Reúne las técnicas que permiten prevenir el DAM limitando la interacción entre los diferentes factores involucrados (material con capacidad de reacción, agua, oxígeno atmosférico y/o microorganismos), y aquellas técnicas y sistemas de tratamiento que, una vez generado el DAM, permiten controlar y minimizar sus potenciales impactos.

LINEAMIENTO 1: EVITAR Y/O LIMITAR LA INTERACCIÓN DE LOS FACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROCESO GENERADOR DE DAM

Componente 1: Geoquímica de la fuente potencialmente generadora

I. Alcance

Manejar el material con capacidad de reacción de manera directa.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

a) Geoquímica del yacimiento

- Tipo de roca
- Mineralización y alteración
- Minerales capaces de producir ácido y/o neutralizar
- Metales susceptibles para lixiviarse
- Caracterización, ubicación y dimensiones de zonas oxidadas y no oxidadas
- Caracterización geoquímica de unidades geoquímicas
- Caracterización de volúmenes de cada tipo de material a ser generados y su distribución
- Pruebas a escala
- Clasificación de drenaje ácido minero (DAM)
- Resultados de las pruebas cinéticas del depósito mineral

IV. ¿Cómo manejar el material?

- a) **Planificación de la explotación:** en las minas a cielo abierto y subterráneas se puede explotar de manera selectiva el material, estableciendo un orden de explotación y coordinando posteriormente su depósito. La clasificación de los diferentes materiales debe ser constantemente revisada y considerada en las diferentes actualizaciones del plan minero.
- b) **Manejo selectivo del material:** separación del material con capacidad de reacción, haciendo una separación del mismo previo a su depósito. Esta separación reduce los costos asociados al tratamiento del efluente generado.
- c) **Mezcla de materiales:** mezcla de material potencialmente generador de ácido (PAF) y el considerado como consumidor o no formador de ácido (NAF). Se debe seleccionar el tipo de mezcla más adecuado, así como la proporción y el grado de la mezcla. En botaderos y depósitos de colas de beneficio (relaves) se usan frecuentemente las enmiendas alcalinas que consisten en la adición de material NAF para controlar su carga de acidez.
- d) **Microencapsulación/ Pasivación:** consiste en crear un revestimiento (capa) inerte sobre la superficie de los sulfuros con capacidad de producir DM, mediante la adición de productos químicos inorgánicos u orgánicos, que inhiben su oxidación, limitando la disponibilidad de oxígeno y de hierro férrico en la superficie, además de favorecer esta condición en el tiempo.
- e) **Gestión de relaves (colas):**
- **Espesados- filtrados- en pasta:** en primer lugar, se disminuye el volumen del depósito final, minimizando de ese modo su huella en el medio ambiente; se disminuye su potencial para producir DAM porque hay menor cantidad de agua disponible, del mismo modo que se disminuye la permeabilidad del sustrato (mezcla viscosa), relacionada con la capacidad de infiltración de agua y la difusión del oxígeno desde la superficie; los riesgos de derrame serán menores; y se puede recuperar el agua y otros reactivos durante el proceso.
 - **Desulfuración:** consiste en la separación selectiva mediante flotación de los sulfuros de un relave, generando por un lado un concentrado o pulpa de sulfuros de hierro y otros elementos y, por el otro, el relave cuyo contenido en pirita (FeS_2) sea lo suficientemente bajo como para no ser generador de DM, conocido como “relave despiritizado”.
 - **Drenaje de colas de beneficio:** esta medida, a diferencia del muro de los depósitos convencionales, incluye una presa permeable, conocida como “dique de arranque o muro de partida”, y un sistema de drenes basales conectados a dicho muro, que recogen el agua contenida en los poros del material. Este sistema hace que se produzca un drenaje en profundidad y no se genere una laguna de aguas claras en la superficie del depósito.

LINEAMIENTO 1: EVITAR Y/O LIMITAR LA INTERACCIÓN DE FACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROCESO GENERADOR DE DAM

Componente 2: Línea base ambiental del medio físico- Balance hídrico

I. Alcance

Minimizar y/o impedir el contacto con agua y/o con el oxígeno/ Evitar la infiltración.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X	X	X	X

III. Información requerida

a) Balance hídrico

- Delimitación de la cuenca hidrográfica
- Caudales multianuales
- Tipo, cantidad y distribución temporal de la precipitación
- Registro de temperaturas diarias
- Estimación de la cantidad y distribución estacional de las recargas de la cuenca hidrográfica
- Estimación de los periodos de sequía, evapotranspiración, condiciones eólicas.

IV. ¿Cómo minimizar y/o impedir el contacto con el agua y/o oxígeno?

- Control del nivel del agua (botaderos, minas a cielo abierto y subterráneas):** el control del nivel se debe hacer de manera permanente, aspecto a considerar en la planificación del plan de cierre y post cierre minero.
- Desvío de cuerpos de agua:** esta medida permite limitar el contacto de cuerpos de agua con el material potencialmente generador de DAM, mediante la desviación directa de un curso fluvial, o el uso de barreras o canales de contorno.
- Barreras ingenieriles:** estas barreras se construyen con materiales artificiales, y cubren o encapsulan la instalación. La selección del tipo de barrera a utilizar, así como su diseño depende del lugar donde se quiera instalar y de las características sitio-específicas de la instalación.

Principalmente, se describen dos tipos de barreras artificiales, *sellos* y *geotextiles*.

- **Sellos (minas a cielo abierto y subterráneas):** son barreras impermeables que se aplican con el objetivo, por un lado, de limitar la circulación de gases (oxígeno) y, por el otro, la infiltración de agua, previniendo de este modo la reactividad del material y la generación de lixiviado.
- **Geotextiles (botaderos, depósitos de relaves (colas), depósitos de lixiviación):** supone la separación física y química del material potencialmente generador de DAM con el medio.

d) **Cubiertas:** las cubiertas o cobertores, se diferencian de las barreras ingenieriles en que están formadas a partir de material natural, con el objetivo de minimizar, evitar y/o derivar el flujo de agua y la percolación de oxígeno.

- **Cubiertas de suelo (botaderos, depósitos relaves (colas), depósitos de lixiviación):** pueden ser construidas con materiales del entorno (origen local), y en su defecto, se construyen con sustratos importados o una mezcla de ambos.
- **Cubiertas de agua en depósitos de relaves (colas):** el material con capacidad de reacción se sumerge, evitando su contacto con la atmósfera, y por tanto su reacción química y potencial generación de DAM.
- **Cubiertas de materia orgánica (botaderos y depósitos de relaves (colas)):** se minimiza la disponibilidad de oxígeno en botaderos y depósitos de relaves (colas), pero también se favorece la reducción de los sulfatos (catalizada por bacterias sulfato-reductoras), y/o la precipitación de metales en forma de sulfuros y/o oxihidróxidos.
- **Cubiertas electroquímicas (botaderos, depósitos relaves (colas) y pilas de lixiviación):** configuración de un elemento galvánico con un cátodo (es decir, malla de acero), un ánodo (por ejemplo, magnesio) y un electrolito (en este caso la mezcla de suelo en la cubierta) para la conductancia eléctrica. La intención de este tipo de cubierta es evitar la oxidación del material mediante la limitación de la infiltración y difusión de oxígeno.

LINEAMIENTO 1: EVITAR Y/O LIMITAR LA INTERACCIÓN DE FACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROCESO GENERADOR DE DAM

Componente 3: Tipo de mineralización y alteración del material de las fuentes potencialmente generadoras

I. Alcance

Inhibir la actividad bacteriana involucrada en el proceso de generación de DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X	X	X	X

III. Información requerida

Las bacterias actúan por contacto directo con el material y mientras más fino sea éste, mayor es el número de sitios en donde la bacteria puede fijarse. La velocidad de oxidación bacteriana depende de factores tales como la temperatura, pH, disponibilidad de O₂ y de CO₂ para la reproducción de las células, cantidad de nutrientes (N, P) y el área superficial del mineral. A continuación, se establecen los requerimientos de información para predecir la actividad bacteriana asociada a los aspectos mineralógicos del material.

- Composición mineralógica
- Tamaño de grano de los minerales
- Cristalinidad
- Tipo de alteración

IV. ¿Cómo inhibir la actividad bacteriana involucrada en el proceso de generación de DAM?

- Bactericidas:** es frecuente su uso como una medida de control inmediata una vez detectado el DAM, ya que se aplica fácilmente sobre el material.
- Control microbiano sobre el proceso de oxidación de la pirita (FeS₂):** adición de carbono para proporcionar la energía necesaria para facilitar el crecimiento de las bacterias heterótrofas sulfato-reductoras, transformando el entorno de condiciones oxidantes a condiciones reductoras, donde la reducción de hierro y sulfatos pasa a dominar el sistema.

LINEAMIENTO 2: CONTROLAR EL PROCESO DE GENERACIÓN DEL DAM

Componente 1: Análisis, verificación y mejora de alternativas de prevención y/o control del DAM

I. Alcance

Controlar el DAM dentro de la instalación minera.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

La etapa de control busca minimizar o controlar la generación del DAM, siguiendo una estrategia reactiva mediante la gestión del drenaje en la propia instalación. La información requerida corresponde a los resultados del programa de seguimiento y monitoreo a las medidas establecidas en el lineamiento 1: **EVITAR Y/O LIMITAR LA INTERACCIÓN DE FACTORES INVOLUCRADOS EN EL PROCESO GENERADOR DE DAM.**

IV. ¿Cómo controlar el DAM dentro de la instalación minera?

- a) **Evaluar cambios en las fuentes potencialmente generadoras de DAM:** diseño, dimensiones, distribución del material, secuencia de llenado, tipo de depósito, interacción con otras fuentes, entre otros.
- b) **Revisión y mejora de las alternativas de prevención y/o control en la generación de DAM:** eficiencia de las medidas, riesgos asociados, costos, etapa del proyecto, entre otros.

LINEAMIENTO 3: TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DAM

Componente 1: Predicción del potencial de generación de metales solubles y drenajes ácidos en aguas del proceso minero

I. Alcance

Analizar la calidad del agua asociada a los DAM y establecer parámetros que deban ser tratados para cumplir con la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X	X	X	X

III. Información requerida

- Modelo de calidad de agua
- Análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas del proceso minero

IV. ¿Qué parámetros de calidad de agua están asociados al DAM?

Analizar factores fisicoquímicos y microbiológicos que favorecen la generación de acidez en el agua del proceso minero, así como la movilización, acumulación, lixiviación, toxicidad y disponibilidad de los EPT's. Los parámetros mínimos que deben monitorearse son:

- pH
- DQO
- DBO5
- Sólidos Suspendidos Totales SST
- Sólidos Sedimentables SSED
- Sólidos Totales
- Turbiedad
- Iones (Cianuro Total, Cloruros, Sulfatos, Sulfuros)
- Metales y metaloides- EPT (Arsénico, Cadmio, Zinc, Cobre, Cromo Total, Hierro total, Mercurio, Níquel, Plomo, entre otros)
- Acidez
- Oxígeno Disuelto



- Caudal
- Temperatura
- Potencial Redox (Eh)
- Conductividad Eléctrica

LINEAMIENTO 3: TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DAM

Componente 2: Definición del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM

I. Alcance

Seleccionar la tecnología de tratamiento más apropiada para dar cumplimiento a la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

II. Etapas del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

Los criterios mínimos para la selección del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM son:

- Particularidades de la zona (tipo y características de la fuente, geoquímica del material, potencial para producir DAM)
- Calidad requerida del efluente
- Volumen y caudal a tratar
- Condiciones del medio (clima, altitud, entre otros)
- Riesgos asociados
- Disponibilidad de insumos
- Costos
- Medidas para su desarrollo y mantenimiento

Cabe resaltar que la variedad de opciones de tratamiento es siempre más amplia en las etapas tempranas del ciclo de vida de un proyecto. Así mismo el nivel de complejidad de las medidas y los costos de tratamiento en las fases iniciales del proyecto (planificación y diseño, construcción y montaje) son mucho menores que en las fases más avanzadas (explotación, beneficio, cierre, post cierre).

IV. ¿Qué tecnologías de tratamientos pueden mejorar la calidad de agua con potencial de generación de DAM?

a) Clasificación de tecnologías de tratamiento

Tratamientos pasivos: se caracterizan por no requerir el uso de insumos químicos ni energía para operar, utilizando fuentes de energía disponibles en la naturaleza, como, por ejemplo, la gravedad a través del gradiente topográfico o la energía metabólica microbiana. Esto tiene un impacto positivo sobre los costos operacionales. Los procesos que se dan en estos tratamientos pueden ser de tipo físico, químico o biológico, pudiéndose combinar, siendo el más común el uso conjunto de procesos biológicos y químicos. Pueden ser de tipo biótico (el principio del tratamiento se basa en un proceso biológico) y abiótico (el principio del tratamiento se basa en un proceso químico, físico o fisicoquímico). Entre los principales se encuentran:

- Humedal artificial (aeróbico; anaeróbico)
- Lagunas de sedimentación (facultativas; anaeróbicas; aeróbicas)
- Extracción pasiva de sulfatos
- Drenes de caliza (anóxicos; óxicos)
- Sistemas reductores y productores de alcalinidad (lechos alcalinos; camas oxidantes de manganeso; sistemas de pirolusita (MnO_2))
- Barreras reactivas permeables
- Pozos de desviación de piedra caliza (muros rellenos; cilindros rellenos; muros de caliza)
- Lecho de escoria lixiviante
- Cobertores productores de alcalinidad (polvo de horno de cemento, polvo de horno de cal, carbonato de calcio precipitado, cenizas volantes de óxidos e hidróxidos de Ca y Mg, entre otros)
- Reactores SCOOFI (saturados; reactores insaturados)

Tratamientos activos: se caracterizan por ser procesos que necesitan de energía externa para su funcionamiento además de un aporte constante de reactivos y el uso de mano de obra, lo que implica mayores costos operacionales que en los sistemas de tratamiento de tipo pasivo. Además, este tipo de tratamientos normalmente llevan asociado la generación de residuos (lodos), que necesitan de una gestión posterior para su manejo y disposición final. En general, la inversión del capital es alta y los costos del proceso son mayores, lo que supone una dificultad para una aplicación durante un período de tiempo prolongado. Sin embargo, las eficiencias y rangos de operación son superiores a las obtenidas con tratamientos pasivos. Pueden ser de tipo biótico (el principio del tratamiento se basa en un proceso biológico) y abiótico (el principio del tratamiento se basa en un proceso químico, físico o fisicoquímico). Entre los principales se encuentran:

- Sistemas de aireación
- Neutralización/Hidrólisis (cal; caliza)
- Precipitación de sulfuros
- Precipitación fraccionada con extracción selectiva
- Precipitación de sales en agua en condiciones supercríticas
- Precipitación química de sulfatos (sal de Bario; Etringita)
- Tratamiento de membranas (Osmosis Inversa; Ultrafiltración; Nanofiltración; Microfiltración)
- Electrofloculación
- Electrocoagulación
- Electroflotación
- Electrodiálisis reversible
- Intercambio iónico con resinas selectivas (proceso GYPCIX®; zeolitas)
- Remoción biológica de sulfatos (precipitación biológica de sulfuros; bioreactores sulfidogénicos THIOFAG; biosulfuro)
- Adsorción con distintos materiales (carbón modificado con ZnCl₂; médula de fibra de coco; zeolitas modificadas)
- Cristalización (dilución-enfriamiento; calentamiento-enfriamiento)
- Extracción por solvente

b) Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento

Tabla 27. Ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento.

TIPO DE TRATAMIENTO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
PASIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos de construcción y operación (para descargas pequeñas o medianas). • Bajos costos de mantenimiento. • Es posible operar durante períodos de tiempo largos sin necesidad de atención (medio y largo plazo). • Se pueden integrar directamente en el medio circundante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor eficiencia (Tecnología en desarrollo). • Difícil control exacto del proceso. • Ocupan grandes superficies.
ACTIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología conocida, con experiencia en multitud de proyectos. • Rendimiento más predecible y más fácilmente controlable. • Eliminación efectiva de metales (se alcanzan concentraciones residuales bajas). 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos en su construcción, operación y/o mantención (inversiones muy elevadas). • Requiere del suministro continuo de energía • Requiere almacenamiento de reactivos • Generación de lodos

Fuente: Modificado de la Guía metodológica para la estabilización de faenas e instalaciones mineras, Chile (2015).

c) Definición del tipo de tratamiento

La elección de la tecnología más apropiada entre todas las alternativas disponibles, requiere de un análisis profundo de la situación particular del efluente generado a

partir de las particularidades de cada una de las instalaciones. Es necesario contar con la caracterización completa del DAM, lo que implica determinar:

- La calidad del efluente
- Volumen y caudal a tratar
- Características requeridas para el efluente
- Características del drenaje
- Objetivos del tratamiento

Otros de los aspectos críticos que se deben considerar son:

- Dimensiones de la infraestructura necesaria para su aplicación
- Sistemas de recolección y de transporte necesarios
- Disponibilidad de suministro de energía
- Relación costo/eficiencia

LINEAMIENTO 3: TRATAR LAS AGUAS RESIDUALES MINERAS CON POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DAM

Componente 3: Desarrollo y ejecución del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM

I. Alcance

Garantizar el adecuado tratamiento de los DAM, dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente (resolución 631 del 2015-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Revisión del plan de caracterización detallado sobre el material previo a su disposición en las fuentes potencialmente generadoras
- Revisión del plan de caracterización inicial y detallada sobre el material dispuesto en las fuentes potencialmente generadoras
- Revisión de los modelos de predicción
- Revisión de la información de la Evaluación de riesgos
- Evaluación de la efectividad e idoneidad del proceso de caracterización y del plan de monitoreo post cierre
- Detección de comportamientos inesperados, para iniciar las acciones correctivas adecuadas

IV. ¿Cómo garantizo el adecuado tratamiento de los DAM?

- a) Monitoreo periódico de calidad de agua
- b) Evaluación de eficiencia del sistema de tratamiento
- c) Análisis de riesgos
- d) Evaluar, durante la operación, la factibilidad técnica-económica de su implementación, de manera de asegurar el éxito de su funcionamiento.
- e) Verificar el comportamiento esperado
- f) Medir el cumplimiento de los objetivos establecidos en cada una de las etapas y estimar la idoneidad de cada una de las medidas implementadas
- g) Modificación de las medidas en el caso de que las expectativas no hayan sido cubiertas

5.4. Monitoreo y vigilancia

El objetivo principal de esta línea estratégica es realizar el seguimiento de las condiciones tanto de las fuentes potencialmente generadoras, los medios de exposición y de los potenciales receptores durante el desarrollo de todas las fases del proyecto minero. El monitoreo incluye además las acciones que permiten evaluar, validar y realizar seguimiento de las medidas implementadas en las etapas de cierre y post cierre.

Cabe destacar que cuando se hace referencia a la trayectoria del DAM, se refiere a la ruta o curso de las aguas con contaminantes, desde cualquier fuente originaria (frentes de explotación, botaderos, depósitos de relave o de lixiviación) hasta el receptor.

Las características físicas y geoquímicas propias de cada una de las fuentes potencialmente generadoras, hacen necesaria una caracterización específica para cada una de ellas e independiente para cada proyecto, considerándolas como unidades únicas. En este sentido hay que destacar la importancia de diseñar y ejecutar un programa de muestreo en la caracterización de cada una de las fuentes potencialmente generadoras de drenaje ácido minero.

LINEAMIENTO 1: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 1: Monitoreo y Seguimiento a fuentes potencialmente generadoras de los DAM

I. Alcance

Prevenir y/o controlar la generación de los DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

a) Etapa de caracterización

- Resultados del levantamiento de línea base (geología, climatología, hidrología e hidrogeología)
- Resultados de la identificación y caracterización de las Fuentes Potencialmente Generadoras de DAM

b) Etapa de predicción

- Resultados del reconocimiento del terreno para la caracterización del material
- Resultados de los análisis con técnicas instrumentales para la determinación de las fases y análisis de la calidad del efluente
- Resultados de los análisis con técnicas de predicción en campo y laboratorio para determinar la producción y el tipo de DAM (test estáticos y test cinéticos)
- Resultados de la modelación de los procesos para predecir comportamientos futuros.

c) Etapa de prevención y control

- Condiciones específicas de cada una de las instalaciones donde se prevé su aplicación
- Resultados de los factores que influyen en la dinámica del DAM

IV. ¿Cómo realizar seguimiento y monitoreo para prevenir y/o controlar la generación de DAM?

a) Seguimiento al programa de caracterización:

- Seguimiento a los factores físico-químicos y mineralógicos que intervienen en la generación del DAM
- Seguimiento a las condiciones geoquímicas del estéril e intervalos litológicos
- Seguimiento a las condiciones de línea base ambiental del medio físico-balance hídrico
- Seguimiento a las condiciones físicas y geoquímicas propias de cada una de las fuentes potencialmente generadoras.

b) Seguimiento al programa de predicción:

- Seguimiento a las condiciones y características del entorno donde se ubica la fuente potencialmente generadora de DAM en el proyecto minero,

mediante indicadores in situ y la descripción preliminar de muestras de campo

- Seguimiento a las condiciones fisicoquímicas tanto en el material que forma o formara parte de una fuente potencialmente generadora como en el efluente generado
- Seguimiento a la caracterización geoquímica del yacimiento, mediante la interpretación de los resultados de análisis con técnicas de predicción de laboratorio y en campo
- Seguimiento al desarrollo de modelación de los procesos para predecir comportamientos futuros.

c) Seguimiento al programa de prevención y control:

- Seguimiento a los resultados de análisis de la calidad del agua, verificando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente (Resolución 631 del 2015-Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible)
- Seguimiento a los resultados de análisis de la calidad del sedimento, verificando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente (Resolución 631 del 2015-Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible)
- Seguimiento a la evaluación hidrogeoquímica: en caso de que las rocas del área y/o el mineral a explotar contengan azufre pirítico y otros sulfuros, se debe efectuar una evaluación del potencial de generación de DMA a partir de la formación y neutralización natural de ácido.

LINEAMIENTO 1: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 2: Monitoreo y Seguimiento a medios de exposición (transporte) de los DAM

I. Alcance

Impedir y/o controlar la movilidad de los DAM en el medio.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

a) Etapa de prevención y control

- La selección de la medida de prevención y/o control asociado al DAM

b) Etapa de tratamiento

- Resultados del análisis de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas y sedimento del proceso minero
- La selección del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM

IV. ¿Cómo realizar seguimiento y monitoreo para impedir y/o controlar la movilidad del DAM en el medio?

a) Etapa de prevención, control

- Seguimiento a los posibles cambios en las fuentes potencialmente generadoras de DAM (diseño, dimensiones, distribución del material, secuencia de llenado, tipo de depósito, interacción con otras fuentes, entre otros).
- Seguimiento a la medida de prevención y/o control seleccionada (eficiencia de las medidas, riesgos asociados, costos, etapa del proyecto, entre otros).

b) Etapa de tratamiento

- Con base a los resultados del análisis de la calidad del agua, compararlos con los límites máximos permisibles para cada uno de los parámetros asociados al DAM, cumpliendo con la normatividad ambiental vigente (Resolución 631 del 2015-Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible)
- Seguimiento a los criterios mínimos para la selección del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM
- De acuerdo con los resultados de eficiencia del sistema de tratamiento de aguas con potencial de generación de DAM, garantizar el adecuado tratamiento de estos drenajes, dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente resolución 631 del 2015-Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

LINEAMIENTO 1: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MONITOREO Y SEGUIMIENTO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 3: Monitoreo y Seguimiento a los receptores de DAM

I. Alcance

Prevenir el impacto a posibles receptores de DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Identificar las áreas potencialmente afectadas
- Identificación de receptores en áreas potencialmente afectadas
- Caracterización del hábitat y de los posibles receptores

IV. ¿Cómo realizar seguimiento y monitoreo para prevenir el impacto a posibles receptores de DAM?

- Realizar un seguimiento periódico a la calidad del agua y sedimento de las fuentes receptoras de drenajes, evaluando los análisis fisicoquímicos y microbiológicos, dando cumplimiento a la normatividad ambiental vigente resolución 631 del 2015-Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible.

LINEAMIENTO 2: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MUESTREO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 1: Muestreo en fuentes potencialmente generadoras de los DAM

I. Alcance

Determinar las condiciones físicas y geoquímicas en las explotaciones y en todo tipo de depósitos.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

En fuentes existentes

- Programa de muestreo previo
- Información disponible (antecedentes, metodología de muestreo, historia de las fuentes, número de muestras, etc.)

En fuentes nuevas

- Caracterización de los materiales antes de su disposición en la instalación

IV. Principales aspectos a considerar en el programa de muestreo en fuentes potencialmente generadoras de DAM

- **Fase 1. Muestreo inicial.** Se considera como una fase exploratoria, que sirve como levantamiento de la información más relevante de los materiales en estudio (**caracterización preliminar**)

En fuentes existentes

- Diseñar un plan de muestreo a largo plazo
- Caracterización geológica y mineralógica inicial de los materiales
- Determinar el volumen del material (estimación de las dimensiones)

En fuentes nuevas

- Diseñar un plan de muestreo a largo plazo
- Caracterización geológica y mineralógica inicial de los materiales
- Definir cómo se va a disponer el material con base a las unidades discretas definidas previo a la formación de la instalación
- **Fase 2. Muestreo detallado.** Validar los datos obtenidos en la fase inicial, enfocar el muestreo a definir nuevos parámetros que permitan desarrollar una caracterización más detallada de la fuente

En fuentes existentes

- Determinar el volumen del material dispuesto en las potenciales fuentes
- Determinar el volumen de las unidades discretas definidas en la fase 1
- Caracterización geológica y mineralógica detallada de los materiales
- Recolectar más muestras de las unidades discretas con mayor variabilidad
- Determinar la variabilidad de las muestras

En fuentes nuevas

- Determinar el volumen de las unidades discretas definidas en la fase 1
- Caracterización geológica y mineralógica detallada de los materiales
- Recolectar más muestras de las unidades discretas con mayor variabilidad
- Establecer una secuencia de disposición
- Determinar la variabilidad de las muestras
- **Próximas fases de muestreo más concreto.**
- Muestreo específico para un programa geoquímico en la fase de operación

LINEAMIENTO 2: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MUESTREO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 2: Muestreo en los medios de exposición (transporte) de los DAM

I. Alcance

Determinar la calidad del medio con potencial de afectación de DAM durante su flujo.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Metodologías, guías, protocolos de muestreo establecidos a nivel nacional, enmarcado con los parámetros establecidos por la Res. 631 de 2015, igualmente instructivos internacionales que puedan dar soporte con relación al desarrollo del muestreo en los medios de exposición.

IV. Metodologías aplicadas al desarrollo de muestreo en los medios de exposición de DAM

- **Metodologías establecidas a nivel nacional**
 - Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento del Agua. IDEAM 2007.
 - Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. IDEAM 2002.
 - Instructivo para la toma de muestras de aguas residuales. IDEAM 2007
- **Metodologías establecidas a nivel internacional**
 - Protocolo de monitoreo de calidad de agua. Ministerio de Minas y Energía de Perú 2010.
 - Monitoring Acid Mine Drainage (MEND, 1990)

LINEAMIENTO 2: DISEÑAR Y EJECUTAR UN PROGRAMA DE MUESTREO A LA TRAYECTORIA DEL DAM

Componente 3: Muestreo en los receptores de DAM

I. Alcance

Determinar la calidad del medio con potencial de afectación de DAM durante su flujo.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Las condiciones del sitio, los receptores de posible preocupación y los criterios de valoración de la evaluación determinarán los protocolos de recolección de muestras para este componente.

IV. Metodologías aplicadas al desarrollo de muestreo en los receptores de DAM

- **Metodologías establecidas a nivel nacional**
 - Manual de métodos para el desarrollo de inventarios de biodiversidad. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt 2004.
- **Metodologías establecidas a nivel internacional**
 - Las pautas generales para el monitoreo de peces y macro invertebrados bentónicos incluyen MEND (1997), Environment Canadá (2002) y USEPA (2003).

5.5. Gestión del Riesgo

Hace referencia a las técnicas a emplear con el riesgo asociado a la generación del drenaje ácido minero, para lo cual los lineamientos y componentes se abordan dentro del decreto 2157 de 2017.

LINEAMIENTO 1: GESTIONAR EL RIESGO ASOCIADO AL DAM DURANTE TODO EL CICLO MINERO

Componente 1: Conocimiento del riesgo

I. Alcance

Determinar posibles impactos o afectaciones por generación del DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Propiedades físicas del material
- Propiedades químicas del material
- Propiedades físicas del agua
- Propiedades químicas del agua
- Caracterización del hábitat y receptores

IV. ¿Cómo se determinan los impactos o afectaciones?

- a) Evaluación de riesgos (en fuentes generadoras, rutas de exposición y receptores)
- b) Estimación de la magnitud de contaminantes generados y transportados
- c) Definición de la significancia de los riesgos detectados
- d) Elaboración de mapa de riesgos

LINEAMIENTO 1: GESTIONAR EL RIESGO ASOCIADO AL DAM DURANTE TODO EL CICLO MINERO

Componente 2: Reducción del riesgo

I. Alcance

Establecer opciones preventivas, de control y tratamiento.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Mapa de riesgos
- Impactos ambientales, sociales y de salud

IV. ¿Cómo se determinan los impactos o afectaciones?

- a) Acciones para minimizar la contingencia
- b) Formulación de planes de emergencia
- c) Preparar planes de contingencia
- d) Plan de monitoreo y revisión de riesgos

LINEAMIENTO 1: GESTIONAR EL RIESGO ASOCIADO AL DAM DURANTE TODO EL CICLO MINERO

Componente 3: Manejo del riesgo o contingencia

I. Alcance

Definir y ejecutar plan de acción para atender y controlar cualquier contingencia relacionada con el DAM

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Plan de emergencia
- Plan de contingencia
- Procesos de consulta
- Recursos y apoyo interinstitucional

IV. ¿Cómo ejecutar el plan de acción?

- a) Capacitación de personal
- b) Implementación y ejecución de los planes
- c) Banco de información para la administración de riesgos

5.6. Buenas prácticas

Las buenas prácticas relacionadas con el manejo del DAM se asocian principalmente con las medidas que se pueden implementar para prevenir y disminuir la generación del DAM y con el seguimiento permanente a la calidad del agua de las fuentes potencialmente generadoras de DAM. Las mejores prácticas disponibles están asociadas a la gestión preventiva del DAM.

LINEAMIENTO 1: DISMINUIR LA GENERACIÓN DE DAM

Componente 1: Limitar el contacto de aguas de escorrentía con aguas asociadas a DAM

I. Alcance

Disminuir el caudal de agua que pueda tener contacto con fuentes potencialmente generadoras de DAM.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Análisis de calidad de agua para su posterior caracterización como aguas con potencial de generación de DAM
- Diseño y planeamiento minero para conocer el avance de la explotación, así como el manejo de material sobrante
- Diseño de obras para el manejo de aguas
- Zonas liberadas para revegetalización y reconfiguración

IV. ¿Cómo garantizo la disminución del caudal de agua potencialmente generadora de DAM?

- a) Canales perimetrales
- b) Cunetas y sistemas de drenaje
- c) Canales de coronación
- d) Revegetalización de áreas expuestas
- e) Clasificación de tipos de agua dentro del proyecto minero (aguas no contacto-aguas contacto)

LINEAMIENTO 1: DISMINUIR LA GENERACIÓN DE DAM

Componente 2: Reducir el volumen de agua en relaves (colas)

I. Alcance

Minimizar el riesgo de generación de DAM en presas de relaves (colas).

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Porcentajes de humedad de los relaves (colas)
- Potencial de generación de DAM en los relaves (colas)
- Dimensiones del depósito de relaves (colas)
- Diseño del depósito de relaves (colas)

IV. ¿Cómo garantizo minimizar el riesgo de generación de DAM?

- a) **Reducción de la humedad de Relaves (colas):** espesamiento de relaves; filtración de relaves; relaves en pasta.
- b) **Drenaje de relaves (colas):** drenes que permitan recoger el agua contenida en los poros del material, generando un drenaje en profundidad y limitando la generación de acumulación de agua en la superficie del depósito.

LINEAMIENTO 2: PREVENIR LA GENERACIÓN DE DAM

Componente 1: Incluir desde la etapa de exploración la caracterización sistemática de fuentes potencialmente generadoras

I. Alcance

Determinar las condiciones mineralógicas y fisicoquímicas de las rocas y el mineral, así como de la calidad del agua durante la vida del proyecto minero.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
X	X	X	X

III. Información requerida

- Revisión de los modelos de predicción
- Clasificación de drenaje ácido minero (DAM)
- Resultados de las pruebas cinéticas del depósito mineral
- Diseño y planeamiento minero para conocer el avance de la explotación, así como el manejo de material sobrante
- Resultados análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas del proceso minero
- Eficiencia de las medidas de prevención, control y/o tratamiento de DAM implementadas

IV. ¿Cómo realizo la caracterización sistemática de fuentes potencialmente generadoras?

- a) **Implementar el programa de seguimiento y monitoreo en fuentes potencialmente generadoras:** seguimiento de todas las acciones llevadas a cabo durante la descripción/ caracterización, predicción y evaluación de riesgo ambiental.

LINEAMIENTO 3: REALIZAR SEGUIMIENTO REGULAR DE LA CALIDAD DE AGUA EN FUENTES POTENCIALMENTE GENERADORAS

Componente 1: Mediciones de calidad de agua periódicas en fuentes potencialmente generadoras para detectar anomalías en etapas tempranas

I. Alcance

Realizar el seguimiento permanente a las fuentes potencialmente generadoras en caso de detectarse anomalías y aspectos críticos en etapas tempranas que puedan afectar el control y tratamiento de DAM.

II. Etapas del ciclo minero

Exploración	Construcción y Montaje	Explotación	Cierre y post cierre
	X	X	X

III. Información requerida

- Revisión de la información de la evaluación de riesgos
- Detección de comportamientos inesperados, para iniciar las acciones correctivas adecuadas
- Resultados análisis de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en aguas del proceso minero
- Eficiencia de las medidas de prevención, control y/o tratamiento de DAM implementadas

IV. ¿Cómo realizo el seguimiento permanente en fuentes potencialmente generadoras?

- a) Establecer estaciones de control y seguimiento de calidad de agua en zonas representativas dentro del proyecto minero
- b) Mediciones de parámetros asociados a generación de DAM en el agua del proceso minero (pH, temperatura, sulfatos, OD)
- c) Instalación de instrumentos para medir en la fuente potencialmente generadora de DAM características fisicoquímicas del agua
- d) Análisis de calidad de agua en cuerpos de agua receptores
- e) Inspección visual para verificar color del agua y precipitados, vegetación dañada o muerta, biota o peces muertos

5.7. Economía circular

La línea estratégica de economía circular contempla las acciones que permiten evaluar el potencial desarrollo de minería secundaria para el material que fue dispuesto en fuentes potencialmente generadoras de DAM (botaderos, depósitos de relave, minas a cielo abierto y subterráneas); al retirar el material de las fuentes se disminuye el potencial de generación de DAM. Así mismo se contempla el reúso o reutilización de agua residual tratada asociada a DAM en las actividades desarrolladas dentro del proceso minero.

LINEAMIENTO 1: EVALUAR EL POTENCIAL DESARROLLO DE MINERÍA SECUNDARIA

Componente 1: Reactivación de operaciones para extracción de minerales dispuestos en fuentes potencialmente generadoras de DAM

I. Alcance

Gestionar el reúso de minerales dispuestos en fuentes potencialmente generadoras con el fin de disminuir el volumen de DAM que puedan generarse en éstas.

II. Etapas del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Revisión del planeamiento minero desarrollado en operaciones anteriores
- Ubicación y descripción detallada de zonas de disposición de materiales en proyectos anteriores
- Tipo de material dispuesto
- Características de la fuente potencialmente generadora (diseño, dimensiones, distribución del material, secuencia de llenado, tipo de depósito, interacción con otras fuentes, entre otros)
- Particularidades de la zona
- Resultados de pruebas de DAM realizados al material depositado en fuentes potencialmente generadoras
- Tipos de medidas de prevención, control y/o tratamiento de DAM implementadas en proyectos anteriores

IV. ¿Cómo puedo gestionar el reuso minerales dispuestos en fuentes potencialmente generadoras de DAM?

- a) Investigación de las características de los minerales dispuestos en operaciones anteriores
- b) Análisis para determinar características de peligrosidad de los materiales depositados en la fuente potencialmente generadora
- c) Evaluar relación beneficio/costo de la extracción de minerales y de la implementación de medidas para el control o tratamiento de efluentes mineros

LINEAMIENTO 2: EVALUAR POSIBLE REÚSO DE AGUA RESIDUAL

Componente 1: Definir la viabilidad del reúso o reutilización de agua asociada a DAM dentro del proyecto minero

I. Alcance

Disminuir el volumen de agua residual tratada asociada a DAM que deba ser vertida.

II. Etapa del ciclo minero

Exploración	Construcción y montaje	Explotación	Cierre y post cierre
		X	X

III. Información requerida

- Volumen y calidad del agua residual generada
- Determinación de las actividades dentro del proceso minero en las que pueda ser usada agua residual tratada y características mínimas de calidad para su uso

IV. ¿Cómo puedo disminuir el volumen de agua residual asociada a DAM que deba ser tratada y vertida?

- a) Análisis para determinar características de peligrosidad del agua
- b) Reúso dentro del proceso realizado en instalaciones mineras (torres de enfriamiento, entre otros)
- c) Riego de vías

6. CONCLUSIONES

Las medidas que deben implementarse para determinar la potencial generación de drenaje ácido, se deben tener en cuenta desde el inicio de la exploración de un área minera, para lo cual se debe realizar la caracterización fisicoquímica de las rocas predominantes y del yacimiento, con el fin de establecer la mineralogía predominante, tipo de metales y metaloides presentes y los niveles de acidez y solubilidad.

De acuerdo con los resultados de predicción durante la etapa de exploración, cobra importancia en el planeamiento minero o elaboración del PTO, lo relacionado con el manejo del potencial generador de drenaje ácido, a lo largo del ciclo de vida del proyecto minero. De ahí que la programación para la predicción y manejo del DAM desde el inicio de explotación hasta el cierre y post-cierre de las operaciones mineras, además de contemplar las características geológicas y fisicoquímicas de los materiales, así como el comportamiento hidrológico e hidrogeológico del área para un adecuado manejo, debe asegurar la evaluación de incertidumbres y riesgos y un diseño riguroso de monitoreo.

Para la generación del DAM se requiere la interacción de los siguientes factores: material potencialmente generador, agua y/o, oxígeno y microorganismos que incrementan las reacciones generadoras de DAM.

Las medidas que deben ser implementadas para el manejo y control del DAM a lo largo del ciclo de vida del proyecto minero son en primera instancia la predicción en la generación del DAM en las fuentes potencialmente generadoras, la cual permite determinar el potencial de generación de DAM y establecer las características fisicoquímicas del DAM.

Con los resultados de la predicción, se deben implementar todas las medidas que permitan la prevención en la generación del DAM. Las principales medidas para la prevención del DAM están relacionadas con el manejo de material con capacidad de reacción, aislamiento de los materiales con potencial generación de DAM minimizando o impidiendo el contacto con el agua y/o con el oxígeno, evitando la infiltración, entre otras. Las medidas preventivas tales como: planificación de la explotación, manejo selectivo del material, mezcla de materiales, microencapsulación/ Pasivación y gestión de relaves (colas), permiten aislar el material e impedir la interacción con el agua y/o, oxígeno.

Si el DAM se ha generado, éste se debe controlar dentro del proyecto minero y es necesario implementar todas las medidas para impedir que el DAM afecte a las áreas externas del proyecto, es decir se debe garantizar el tratamiento de estas aguas dentro del proyecto dando cumplimiento a la normatividad ambiental en materia de vertimientos lo cual garantiza la calidad de ésta y así evitar el transporte

de contaminantes a través de rutas de exposición tales como: agua superficial, agua subterránea, sedimentos y/o suelos y la posible afectación de receptores tales como vida acuática, vida terrestre, vegetación y/o personas.

Las medidas de tratamiento que deben implementarse para mejorar la calidad del DAM y garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente pueden clasificarse según su tipo como activas y pasivas y dentro de esta clasificación se pueden encontrar sistemas de tratamiento abiótico, biótico y de tipo convencional, no convencional y emergente.

Los sistemas de tratamiento deben diseñarse para las condiciones específicas del proyecto y se debe buscar la mejor opción en términos de costos, ubicación, eficiencia, tipo y frecuencia de mantenimiento, área disponible, calidad requerido para el efluente y caudal, entre otros.

Para el caso del DAM se deben implementar todas las medidas necesarias que permitan prevenir la generación de este, ya que una vez inicia el DAM es muy difícil detener las reacciones generadoras de este drenaje, la única forma de finalizarlo es que mínimo uno de los factores generadores del DAM se agoten (material con potencial generación de DAM, agua y/o, oxígeno).

La oferta de medidas que pueden implementarse en la etapa de prevención en la generación de DAM es muy variada y sus costos son bajos, una vez generado el DAM disminuyen la posibilidad de medidas ya que estas se relacionan con sistemas de tratamiento de aguas y los costos son notablemente más altos que haber implementado medidas de prevención.

Deben contemplarse en caso de ser posible y si las condiciones del entorno, cercanía con otros proyectos y las características físico químicas del agua lo permiten, diseñar e implementar sistemas de tratamiento colectivos para que los costos de tratamiento disminuyan y sean más accesibles para pequeños y medianos mineros.

En relación con el monitoreo del DAM, se debe realizar el seguimiento de las condiciones tanto de las fuentes potencialmente generadoras, los medios de exposición y de los potenciales receptores durante el desarrollo de todas las fases del proyecto minero. El monitoreo incluye además las acciones que permiten evaluar, validar y realizar seguimiento de las medidas implementadas en las etapas de cierre y post cierre.

Las características físicas y geoquímicas propias de cada una de las fuentes potencialmente generadoras, hacen necesaria una caracterización específica para cada una de ellas e independiente para cada proyecto, considerándolas como unidades únicas. En este sentido hay que destacar la importancia de diseñar y

ejecutar un programa de muestreo en la caracterización de cada una de las fuentes potencialmente generadoras de drenaje ácido minero.

Cabe resaltar que cada programa de monitoreo tiene un programa de muestreo asociado. Sin embargo, para el desarrollo de la propuesta de lineamientos de esta línea estratégica, se priorizó el programa de muestreo en las fuentes potencialmente generadoras de DAM tanto por su importancia como por la falta de información y unificación de criterios en este aspecto, debido a que los medios de exposición y los receptores establecen y definen varias metodologías, guías y protocolos aplicados en el territorio nacional que se deben desarrollar durante el muestreo. Igualmente se debe tener en cuenta que todos los análisis y resultados de las actividades durante el muestreo deben ser ejecutados y avalados por laboratorios certificados en estas técnicas de prevención, control y tratamiento.

Sobre la gestión del riesgo, es importante contemplarlo en el planeamiento minero o PTO, desde el inicio de la explotación hasta el cierre y post cierre de la operación minera. Una de las prioridades en la gestión de riesgos es la identificación del riesgo, para lo cual se deben evaluar de manera regular las afectaciones que puedan generarse con miras a reducirlas y controlar cualquier contingencia. Igualmente, se debe mantener permanente comunicación con las comunidades, con el fin de estar atentos de cualquier situación de afectación que vaya dirigida hacia los derrames, o situaciones de mal manejo de drenajes con respecto a las aguas superficiales que se salgan de los ductos de transporte de los DAM hacia los sitios de disposición. De ahí, la necesidad de monitoreo permanente de la trayectoria hacia las áreas de disposición para evitar posibles riesgos ambientales y desarrollar procesos de consulta y de apoyo institucional, para la aplicación de acciones eficaces.

Los lineamientos aquí planteados permiten fortalecer y articular los requerimientos que ya se encuentran establecidos por la Autoridad Ambiental relacionados con DAM y que es necesario que se incluyan en la normatividad minera, ya que desde el componente minero no se han abordado y son un requisito fundamental para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental necesario para iniciar las actividades de construcción y montaje del proyecto minero.

El alcance de los lineamientos elaborados permite dar cumplimiento a la normatividad ambiental y garantiza que toda la información requerida y que debe ser recolectada desde las fases iniciales del proyecto, se realice con el nivel de detalle adecuado, permitiendo conocer tanto el estado de generación actual de DAR, como la predicción del potencial de generación de DAM durante el desarrollo del proyecto minero.

Recolectar en las fases iniciales del proyecto toda la información que se requiere para dar cumplimiento a los requerimientos normativos establecidos por la autoridad ambiental, permite que no se presenten solicitudes adicionales de información asociada a la predicción, prevención, control y tratamiento de DAM que no fue considerada desde las fases del proyecto, lo que se ve reflejado en disminución de costos y tiempos para la obtención del instrumento ambiental.

Se deben establecer todas las medidas necesarias para fortalecer el cumplimiento normativo del sector minero y que permitan desarrollar una minería bien hecha, con sentido de responsabilidad social, ambiental y económica.

7. BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA (ANM) *Términos de referencia trabajo de exploración, programa mínimo exploratorio y programa de trabajos y obras (PTO) para materiales y minerales distintos del espacio y fondo marino.* Acogidos Mediante Resolución No. 299 del 13 de junio de 2018. Bogotá. Obtenido en: [https://www.anm.gov.co/sites/default/files/terminos de referencia pme pto res olucion299 junio 13 2018.pdf](https://www.anm.gov.co/sites/default/files/terminos%20de%20referencia%20pme%20pto%20resolucion299%20junio%2013%202018.pdf)
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE- Minambiente. *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental global o definitiva para proyectos de explotación de pequeña minería.* Bogotá D.C. enero de 2020. Obtenido en: <https://acmineria.com.co/acm/wp-content/uploads/2020/01/2.-Tdr-EIA-Licencia-Ambiental-peque%C3%B1a-mineria.pdf>
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE – Minambiente, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2016) *Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA proyectos de explotación minera.* Bogotá D.C. Obtenido en: [https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/TdR_MINERIA %2029 9 2016%20VF Final%20final%20final%20final-81.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/TdR_MINERIA_%2029_9_2016%20VF_Final%20final%20final%20final-81.pdf)
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (2002) *Guía minero ambiental 1. Exploración.* Bogotá. Obtenido en: [https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/1/01%20Gu%C3%ADa%20minero o%20ambiental%20-%20Exploraci%C3%B3n.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/1/01%20Gu%C3%ADa%20minero%20ambiental%20-%20Exploraci%C3%B3n.pdf)
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (2002) *Guía minero ambiental 2. Explotación.* Bogotá. Obtenido en: [https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/2/2%20Gu%C3%ADa%20minero %20ambiental%20-%20Explotaci%C3%B3n.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/2/2%20Gu%C3%ADa%20minero%20ambiental%20-%20Explotaci%C3%B3n.pdf)
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. (2002) *Guía minero ambiental 3. Beneficio y Transformación.* Bogotá. Obtenido en: [https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/3/3%20Gu%C3%ADa%20minero %20ambiental%20-%20Beneficio%20y%20transformaci%C3%B3n.pdf](https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/865/3/3%20Gu%C3%ADa%20minero%20ambiental%20-%20Beneficio%20y%20transformaci%C3%B3n.pdf)
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE (MADS) (2015), Resolución 631 de 2015, “Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”

- FUNDACIÓN CHILE, SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA Y MINISTERIO DE MINERÍA (2015). Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.
- Arquitectura TI Colombia. (n.d.). *MinTic*. Retrieved from Preguntas frecuentes: <https://www.mintic.gov.co/arquitecturati/630/w3-article-9471.html>
- Güiza, L., Salazar, J., Chaparra, E., & Al, E. (2020). *Mitos y realidades de la minería aurífera en Colombia*. Universidad del Rosario.
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. (2018). Guía metodológica para evaluación de la estabilidad física de instalaciones mineras remanentes. Departamento de Seguridad Minera. Universidad Católica de Valparaíso. Chile. Obtenido en: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2019/06/GUIA-METODOLOGICA.pdf>
- Minero, C. Ministerio de Minería. (2002). *Guía Metodológica sobre Drenaje Ácido en la Industria Minera: Chile*. Santiago: Biblioteca Sernageomin, 11058.
- Summers, L., & BONELLI, J. (1995). Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Acido de Minas. *Dirección de Asuntos Ambientales. Sub-Sector Minería. Ministerio de Energía y Minas. Lima-Peru*.
- Guía global de drenaje ácido de rocas, The International Network for Acid Prevention, 2014. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/362559215/2014-Resumen-Guia-Global-de-Drenaje-Acido-de-Roca-1>
- Gascon, R., Soto, M., Oblasser, A., Calderón Rosa, C., Hoppe, J., Salazar, N., & Bastidas, M. (2015). Guía Metodológica para la Estabilidad Química de Faenas e Instalaciones Mineras.
- Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina, generación y tratamiento. *Instituto Geológico y Minero de España, Dirección de Recursos Minerales y Geoambiente*.
- Normativos, A., & de Precipitación Sintética, P. D. L. Norma oficial mexicana nom-157-semarnat-2009, que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros índice.
- Plumlee, GS y Logsdon, MJ (1999). Un conjunto de herramientas científicas del sistema terrestre para el desarrollo de recursos minerales respetuoso con el medio ambiente. *Reseñas en Economic Geology* , 6 , 1-27.

- Valenzuela, I. M. V. (2015). *Estimación de costos de cierre de pasivos ambientales mineros identificados en Chile de acuerdo a los requerimientos de la ley 20.551*. Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Consejo Nacional de Investigaciones (EE. UU.). Comité de Minería y Recuperación de Carbón de Alaska. (1980). *Minería de carbón a cielo abierto en Alaska: una investigación de la Ley de control y recuperación de la minería a cielo abierto de 1977 en relación con las condiciones de Alaska: un informe* (No. 3225). Academias nacionales.
- Ospina Betancur Esteban, Molina Jorge Martín, *Legislación colombiana de cierre de minas, es realmente necesaria? Facultad de Ingeniería de Minas, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, diciembre de 2013*.