



PERÚ

Ministerio  
del Ambiente



Organismo  
de Evaluación  
y Fiscalización  
Ambiental



# SUPERVISIÓN AMBIENTAL ENFOCADA EN LA ESTABILIDAD QUÍMICA EN EL CIERRE DE MINAS

Documento técnico

# **SUPERVISIÓN AMBIENTAL ENFOCADA EN LA ESTABILIDAD QUÍMICA EN EL CIERRE DE MINAS.**

## **Documento técnico**

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental – OEFA  
Dirección: Av. Faustino Sánchez Carrión N.º 603  
Jesús María, Lima-Perú.  
Teléfono: 204-9900  
www.gob.pe/oefa

### **Consejo Directivo**

Presidente: Juan Edgardo Narciso Chávez  
Consejera: Gloria Cadillo Ángeles  
Consejero: César Ortiz Jahn  
Consejero: John Ortiz Sánchez  
Consejero: Alberto Pinto Cáceres

### **Gerencia General**

Gerenta General: Miriam Alegría Zevallos  
Coordinación y revisión: Patricia Izquierdo Quispe y Roxana Paz Cárdenas

### **Elaboración de contenidos:**

Ana Luisa Morales (consultora externa contratada por la GIZ y el BGR)

### **Equipo revisor / asesor**

#### **Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas**

Alex Santiago Uriarte Ortiz  
Richard Johnson Tipula Mamani  
José Carlos Farfán Meza  
Christian Enrique Diaz Alvarez  
Sahra Viviana Paucar Bejarano  
Karen Quintana Cerón  
Homero Edwin Mejía Cruz

#### **Equipo revisor de la Dirección de Supervisión Ambiental en Energía y Minas**

Alex Santiago Uriarte Ortiz  
Sahra Viviana Paucar Bejarano

#### **Cooperación alemana para el desarrollo, implementada por la GIZ**

Lisbeth Díaz Vargas

### **Colaboración**

Erick Hicks Peralta  
Constanza Gómez

### **Oficina de Relaciones Institucionales y Atención a la Ciudadanía (ORI)**

Jefa de la ORI: Irene Del Rosario Saldaña Cortez  
Coordinación editorial: Jorge Ramírez González Del Riego  
Corrección de textos y revisión de estilo: Roxana Villalba Garcés  
Diseño y diagramación: José Mendiola, Carla Ochoa Quisel  
Fotografías: Fredy Gonzalez Oré, Archivo del OEFA

Primera edición  
Marzo 2025

Hecho en el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú N.º 2025-02499

El presente documento técnico ha sido elaborado con el apoyo de la cooperación alemana para el desarrollo, implementada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, a través del Proyecto de Cooperación Triangular entre Chile, Perú y Alemania en fiscalización y cumplimiento ambiental y el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales de Alemania (BGR).

Con el apoyo de:



Implementada por  
**giz**  
Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

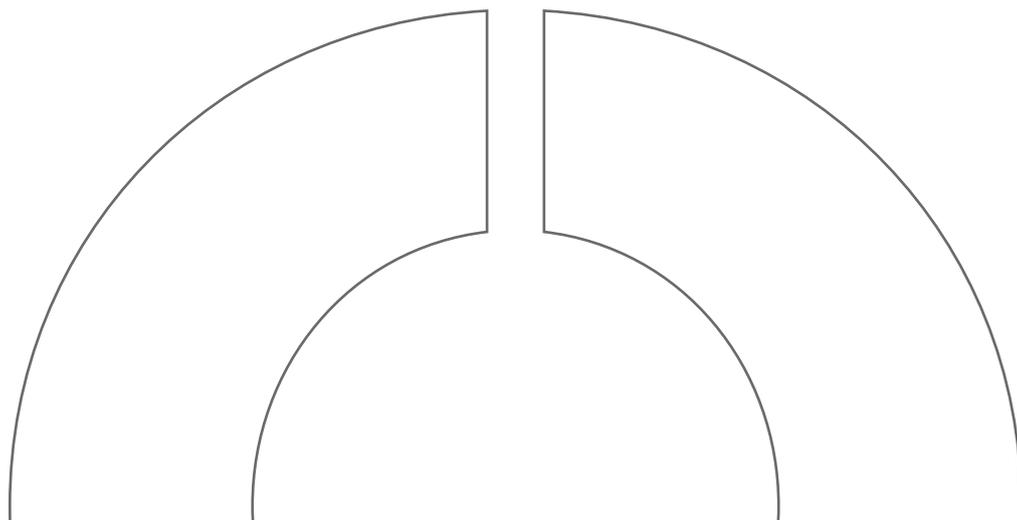


Reservados todos los derechos.

Queda autorizada su reproducción y distribución con previa autorización y citando la fuente.

# **SUPERVISIÓN AMBIENTAL ENFOCADA EN LA ESTABILIDAD QUÍMICA EN EL CIERRE DE MINAS**

Documento técnico



# ÍNDICE

<b>I. MARCO GENERAL</b>	8
<b>1.1. Introducción</b>	8
<b>1.2. Objetivos</b>	9
<b>1.3. Alcance y aplicación</b>	9
<b>1.4. Marco legal</b>	10
<b>II. CONCEPTOS DE CIERRE DE MINAS</b>	14
<b>2.1. Conceptos claves de planificación del cierre de minas de acuerdo con la experiencia internacional</b>	15
<b>2.2. Conceptos de planificación del cierre de minas en el Perú</b>	23
<b>2.3. Condiciones para el cierre de minas en Perú</b>	30
<b>2.4. Actividades de cierre de minas</b>	31
<b>2.5. Actividades poscierre</b>	48
<b>III. SUPERVISIÓN AMBIENTAL</b>	49
<b>3.1. Finalidad</b>	51
<b>3.2. Planificación de la supervisión</b>	52
<b>3.3. Ejecución de la supervisión</b>	55
<b>3.4. Resultados de la supervisión</b>	57
<b>IV. SUPERVISIÓN DE ACTIVIDADES DE ESTABILIDAD GEOQUÍMICA EN LAS ETAPAS DE CIERRE TEMPORAL, CIERRE PROGRESIVO Y CIERRE FINAL</b>	59
<b>4.1. Algunas definiciones relevantes de las infraestructuras que contribuyen a la generación del drenaje de minas</b>	59
<b>4.2. Explotación y beneficio</b>	77
<b>4.3. Cierre</b>	78
<b>4.4. Actividades de verificación durante la supervisión para unidades en etapas de explotación, exploración y cierre</b>	78
<b>4.5. Actividades de monitoreo durante la supervisión</b>	94
<b>V. MANTENIMIENTO Y MONITOREO POSCIERRE, Y VERIFICACIÓN EN UNIDADES EN POSCIERRE</b>	108
<b>5.1. Conceptos generales</b>	108
<b>5.2. Para las actividades de supervisión</b>	110
<b>VI. CONTROL DE CALIDAD</b>	114
<b>6.1. Objetivos del control de calidad en el cierre de minas</b>	115
<b>6.2. Procesos de control de calidad en el cierre de instalaciones mineras</b>	116
<b>6.3. Importancia del control de calidad en el cierre de minas</b>	117
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	118

# FIGURAS

<b>Figura 1:</b>	Ciclo de vida de la mina y el cierre	15
<b>Figura 2:</b>	Relación entre las etapas de un programa de estabilidad química (PEQ) y el ciclo de vida de una mina	20
<b>Figura 3:</b>	Importancia de la evaluación de riesgos en el plan de cierre de minas	22
<b>Figura 4:</b>	Información relevante para la evaluación de impactos y riesgos asociados	60
<b>Figura 5:</b>	Proceso de evaluación de riesgos	61
<b>Figura 6:</b>	Modelo conceptual simplificado	62
<b>Figura 7:</b>	Muestreos de puntos críticos	75
<b>Figura 8:</b>	Sistema de cobertura	87
<b>Figura 9:</b>	Mecanismos potenciales de control de la erosión para el diseño del sistema de cubierta	88
<b>Figura 10:</b>	Efecto de recarga y descarga de anillos	96
<b>Figura 11:</b>	Cálculos de permeabilidad	101

# TABLAS

<b>Tabla 1:</b>	Principales variables y herramientas para la descripción del medio físico	65
<b>Tabla 2:</b>	Regla de modificado de Price y Errington	67
<b>Tabla 3:</b>	Principales variables y herramientas para la descripción del medio físico	71
<b>Tabla 4:</b>	Parámetros para muestreo de calidad de aguas superficiales	72
<b>Tabla 5:</b>	Aspectos clave a tener en cuenta de las fuentes que podrían generar DM	77
<b>Tabla 6:</b>	Actividades que deben ser verificadas por el comité técnico de supervisión en las diferentes etapas de la mina	79
<b>Tabla 7:</b>	Etapas de la auditoría	85
<b>Tabla 8:</b>	Impactos, riesgos y medidas de mitigación por infraestructura	90
<b>Tabla 9:</b>	Controles y monitoreos recomendados por instalación	92
<b>Tabla 10:</b>	Determinación de puntos de muestreo	102

# GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b>	Número de muestras en base a la masa de cada unidad geológica	66
<b>Gráfico 2:</b>	Resultados de infiltración	97
<b>Gráfico 3:</b>	Variación de conductividad hidráulica en profundidad	101
<b>Gráfico 4:</b>	Resultados del análisis pH pasta	106
<b>Gráfico 5:</b>	Resultados del análisis pH pasta	106

# IMÁGENES

<b>Imagen 1:</b>	Medición de pH	94
<b>Imagen 2:</b>	Recarga y descarga de anillos terreno	96
<b>Imagen 3:</b>	Cálculos de permeabilidad	101
<b>Imagen 4:</b>	Área de evaluación de la camada filtrante de una pila dinámica de lixiviación de óxidos usando el permeámetro de Guelph	103
<b>Imagen 5:</b>	Área de evaluación de la camada filtrante de una pila dinámica de lixiviación de óxidos usando el permeámetro de Guelph	103
<b>Imagen 6:</b>	Procedimiento de pH y CE	105
<b>Imagen 7:</b>	Verificación de cierre de minas con drones	112
<b>Imagen 8:</b>	Verificación de cierre de minas con drones	112
<b>Imagen 9:</b>	Control de calidad cobertura, revegetación y canal de contorno botadero de estériles	114
<b>Imagen 10:</b>	Control de calidad cobertura, revegetación y canal de contorno botadero de estériles	114
<b>Imagen 11:</b>	Control de calidad soldadura geomembrana	115



Oefa

# I. MARCO GENERAL

## 1.1. Introducción

El Perú es un importante productor de minerales a nivel global y cuenta con un sector minero diverso y altamente desarrollado. En nuestro país, la legislación minera y ambiental incluye leyes y reglamentos aplicables al cierre de las operaciones mineras después del cese de las operaciones. Un factor clave para la implementación de la normativa vigente es la supervisión del cierre adecuado de los componentes mineros en campo por parte de las instituciones públicas.

En el caso de Perú, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) es la institución competente para esta tarea. El OEFA identificó la necesidad de profundizar los conocimientos del personal técnico en materia de la estabilidad química de componentes mineros en cierre, y de contar con un documento que apoye a los funcionarios del OEFA a realizar las respectivas evaluaciones en gabinete y campo, a fin de comprobar el cierre adecuado de los componentes mineros, de acuerdo con las funciones y competencias transferidas al OEFA por ley.

El proyecto de cooperación triangular denominado “Desarrollo de herramientas técnicas y metodologías para la fiscalización y cumplimiento de la normativa ambiental” —implementado por la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA) de Chile, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) de Perú y la Cooperación Alemana al Desarrollo implementada por la GIZ—, como resultado del intercambio técnico de los equipos de supervisión y fiscalización minera, identificó la necesidad de fortalecer las acciones de supervisión de los funcionarios de ambas instituciones a través de la capacitación en temas específicos relacionados el cierre de minas.

Por ese motivo, se desarrollaron —en el marco del proyecto Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MinSus), ejecutado por el Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) y el Proyecto de Cooperación Triangular de la GIZ— dos cursos de capacitación dirigidos al personal del OEFA y SMA. El primer curso tuvo lugar del 4 a 7 de octubre del 2022 y abordó como tema central la identificación de efectos y peligros, y la evaluación de riesgos de los componentes mineros en cierre. La segunda capacitación se realizó del 15 a 19 de noviembre del 2022 y se enfocó en temas vinculados a las buenas prácticas en la planificación y supervisión del cierre de instalaciones mineras.

En base a estas capacitaciones, se identificó la necesidad de desarrollar documentos técnicos a fin de apoyar a los supervisores y fiscalizadores a contar con criterios para deter-

minar el cierre adecuado de un componente minero. En ese contexto, se reconoció que la supervisión ambiental de la estabilidad química en el cierre de minas es un tema prioritario.

Para la elaboración de este documento, fue necesario el desarrollo de un trabajo previo, el cual incluye la revisión de normas ambientales vigentes nacionales y sectoriales relacionadas con las actividades mineras, guías ambientales elaboradas y publicadas por la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) del Ministerio de Energía y Minas (Minem) de Perú, lineamientos de otras instituciones internacionales, protocolos de monitoreo ambiental y bibliografía. Además, se analizó planes de cierre e informes de supervisión y se entrevistó a supervisores vinculados al cierre de minas.

## 1.2. Objetivos

Elaboración de un documento con orientaciones técnicas que puedan ser consideradas por el equipo de profesionales del OEFA en la supervisión ambiental de la estabilidad química de componentes mineros en cierre

## 1.3. Alcance y aplicación

El documento técnico contiene un análisis del marco legal existente en el Perú relacionado con el cierre de minas, el cual incluye aspectos de actividades de cierre temporal, cierre progresivo, cierre final y poscierre, en las etapas de exploración, explotación y beneficio de minerales, en atención a los principales riesgos que se deberían considerar en la evaluación de la estabilidad química de los componentes mineros en cierre.



## 1.4. Marco legal

### Normas ambientales

- 1 Ley Orgánica para el Aprovechamiento Sostenible de los Recursos Naturales, Ley N.º 26821 (1997)
- 2 Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, Ley N.º 27446 (2001)
- 3 Ley del Sistema Nacional de Evaluación y Fiscalización Ambiental, Ley N.º 29325
- 4 Resolución del Consejo Directivo N.º 003-2010-OEFA/CD
- 5 Resolución de Consejo Directivo N.º 027-2017-OEFA/CD

### Normas específicas del sector energía y minas

- 1 Modelo de Contrato de Estabilidad Administrativa Ambiental en base al PAMA de las Actividades Minero-Metalúrgicas (Resolución Ministerial N.º 292-97-EM/VMM).
- 2 Modificación del Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades Minero-Metalúrgicas aprobado por Decreto Supremo N.º 058-99-EM.
- 3 Resolución Ministerial N.º 011-96-EM/VMM
- 4 Resolución Ministerial N.º 315-96-EM/VMM
- 5 Resolución Directoral N.º 016-95-EM/DGAA
- 6 Ley que Regula los Pasivos Ambientales de la Actividad Minera, Ley N.º 28271.
- 7 Resolución Directoral N.º 440-2004-MEM/AAM
- 8 Decreto Supremo N.º 046-2004-EM
- 9 Decreto Supremo N.º 039-2005-EM
- 10 Decreto Supremo N.º 052-2003-EM, modificado por el Decreto Supremo N.º 052-2010-EM
- 11 Ley que Regula el Cierre de Minas, Ley N.º 28090 (2003)
- 12 Decreto Supremo N.º 033-2005-EM (2005)
- 13 Guía para la elaboración de planes de cierre de minas, aprobada por la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM).

## Normas específicas del sector energía y minas

- 14** Decreto Supremo N.º 028-2008-MEM
- 15** Resolución Ministerial N.º 304-2008-MEM/DM
- 16** Decreto Supremo N.º 007-2012-MINAM
- 17** Resolución Ministerial N.º 262-2012-MEM/DM
- 18** Decreto Supremo N.º 040-2014-EM
- 19** Resolución de Consejo Directivo N.º 043-2015-OEFA/CD
- 20** Resolución Ministerial N.º 251-2016-MEM/DM
- 21** Decreto Supremo N.º 036-2016-EM
- 22** Decreto Supremo N.º 042-2017-EM
- 23** Decreto Supremo N.º 037-2017-EM
- 24** Decreto Supremo N.º 013-2019-EM
- 25** Resolución Ministerial N.º 195-2019-MINEM/DM
- 26** Decreto Supremo N.º 005-2020-MEM
- 27** Decreto Supremo N.º 012-2017-MINAM
- 28** Ley N.º 31347 a través de la cual se modifica la Ley que Regula el Cierre de Minas  
Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM
- 29** Decreto Supremo N.º 074-2001-PCM
- 30** Decreto Supremo N.º 014-2007-EM
- 31** Resolución Directoral N.º 280-2007-EM/AAM
- 32** Resolución Directoral N.º 281-2007-EM/AAM
- 33** Resolución Directoral N.º 282-2007-EM/AAM
- 34** Resolución Directoral N.º 284-2007-EM/AAM
- 35** Resolución Directoral N.º 283-2007-EM/AAM
- 36** Resolución Ministerial N.º 471-2007-MEM/DM
  - Fe de Erratas. Resolución Ministerial N.º 471-2007-MEM/DM.

## Normas específicas del sector energía y minas

- 37 Decreto Supremo N.º 020-2008-EM
- 38 Resolución Ministerial N.º 167-2008-MEM/DM
- 39 Decreto Supremo N.º 078-2009-EM
- 40 Decreto Supremo N.º 422-2009-MEM-AAM
- 41 Anexo I. Contenido del Plan Ambiental Detallado.

Adicionalmente, existe normativa específica sobre calidad para suelo (Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM) y sobre gestión de sitios contaminados (Decreto Supremo N.º 012-2018-MINAM), las cuales también son aplicables al cierre de minas. Es destacable que la mayoría de las operaciones mineras pueden considerarse como actividades potencialmente contaminantes para el suelo, de acuerdo con la definición contenida en la misma norma:

**Artículo 3.-** Actividades potencialmente contaminantes para el suelo se consideran actividades potencialmente contaminantes para el suelo aquellos proyectos o actividades antrópicas, cuyo desarrollo implica el uso, manejo, almacenamiento, transporte, producción, emisión o disposición de sustancias químicas, materiales o residuos peligrosos, que son capaces de generar la contaminación del suelo y de los componentes ambientales asociados a este, por su toxicidad, movilidad, persistencia, biodegradabilidad, entre otras características de peligrosidad establecidas en las guías técnicas aprobadas por el Ministerio del Ambiente.

## Guías ambientales para la minería

- 1 Guía de Relaciones Comunitarias (2001)
- 2 Guía para Estandarizar la Elaboración y Revisión de Estudios de Impacto Ambiental de Proyectos Mineros (2002)
- 3 Criterios para la Disposición Subacuática de Relaves Mineros (2002, borrador disponible solo en versión electrónica)
- 4 Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aire y Emisiones
- 5 Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua
- 6 Guía Ambiental para el Manejo de Agua en Operaciones Minero-Metalúrgicas
- 7 Guía Ambiental para el Manejo de Drenaje Ácido de Minas

## Guías ambientales para la minería

- 8 Guía para Elaborar Estudios de Impacto Ambiental
- 9 Guía para Elaborar Programa de Adecuación y Manejo Ambiental
- 10 Guía para el Manejo de Relaves Mineros
- 11 Guía Ambiental para Vegetación de Áreas Disturbadas por la Industria Minero-Metalúrgica
- 12 Guía Ambiental para el Cierre y Abandono de Minas (no vigente)
- 13 Guía Ambiental para Proyectos de Lixiviación en Pilas
- 14 Guía Ambiental para Actividades de Exploración de Yacimientos Minerales en el Perú (no vigente)
- 15 Guía Ambiental para la Perforación y Voladura en Operaciones Mineras
- 16 Guía Ambiental para el Manejo de Cianuro
- 17 Guía para el Manejo de Reactivos y Productos Químicos
- 18 Guía Ambiental para el Manejo de Problemas de Ruido en la Industria Minera
- 19 Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Residuos Sólidos provenientes de Actividades Mineras
- 20 Guía de Manejo Ambiental para Minería No Metálica
- 21 Guía Ambiental de Manejo y Transporte de Concentrados Minerales
- 22 Guía de Fiscalización Ambiental
- 23 Guía de Cierre de Minas
- 24 Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad del Aire por Actividades Minero-Metalúrgicas
- 25 Guía para la Evaluación de Impactos en la Calidad de las Aguas Superficiales por Actividades Minero-Metalúrgicas
- 26 Guía para el Diseño de Coberturas de Depósitos de Residuos Mineros
- 27 Guía para el Diseño de Tapones para el Cierre de Labores Mineras
- 28 Guía para la Evaluación de la Estabilidad de los Pilares Corona
- 29 Guía para elaboración de Planes de Cierre de Pasivos Ambientales Mineros
- 30 Guía para la Protección del Trabajador y el Ambiente durante la Exploración de Uranio

## II. CONCEPTOS DE CIERRE DE MINAS

El cierre de minas es un proceso complejo que involucra una serie de conceptos y consideraciones clave para asegurar que la ejecución del cierre de la actividad minera se realice de manera segura, ambientalmente sostenible, eficiente y eficaz en el largo plazo.

Es relevante aclarar que el proceso de cierre de una mina y su historia son fundamentales al realizar un análisis, evaluar riesgos, y determinar la medida y su posterior fiscalización. El cierre de una mina no se puede separar del proceso de construcción u operación, pues el seguimiento en detalle de la historia de la instalación permitirá determinar, al momento de la fiscalización o supervisión, si la medida ejecutada cumple con los requisitos de mantenerse estable a largo del tiempo.

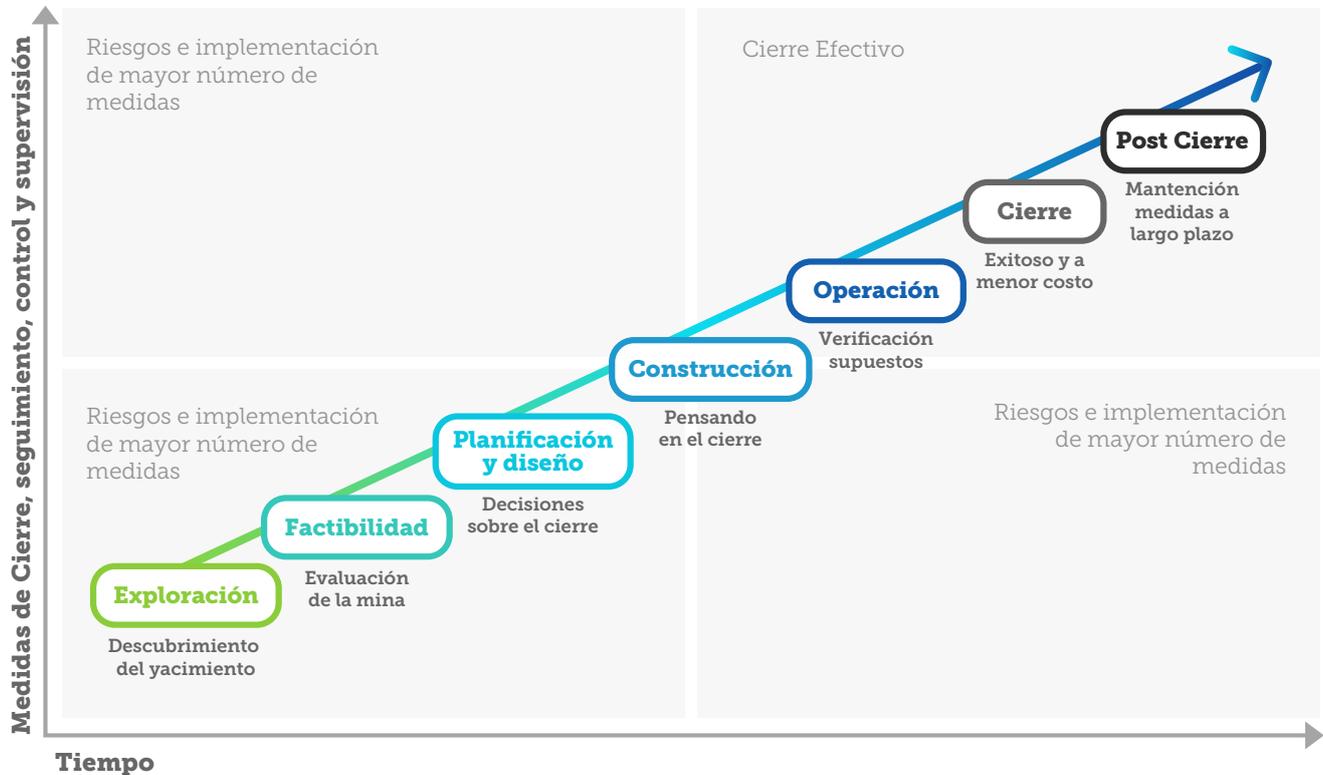
La mina o el conjunto de instalaciones funciona como un todo. Por ejemplo, los residuos generados por la extracción son los que se disponen en el botadero de estériles, en la pila o en el depósito de relaves, por lo que es imposible analizar cada instalación por separado. Un análisis detallado del yacimiento permitirá determinar si es potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR); si el yacimiento tiene esta potencialidad, es indudable que el material dispuesto en el botadero, la pila o el depósito tendrán la característica de generar DAR y que existe un mayor riesgo al implementar la medida. Si durante la construcción no se cumplen los criterios de diseño aprobados, los riesgos de estabilidad química aumentarán, por lo que se ocasionarán lixiviados, infiltraciones o derrames de esta instalación.

Esto implica incorporar un mayor número de medidas o la modificación de las medidas por otras más eficientes, que logren que la instalación se mantenga estable químicamente a lo largo del tiempo. Esta información es clave al momento de supervisar, pues permitirá determinar en los puntos que debe incorporarse un mayor esfuerzo en la visita a terreno.



La historia de una mina abarca una serie de aspectos interconectados, desde su apertura hasta su operación y eventual clausura. Ignorar esta perspectiva integral podría llevar a decisiones incompletas o desinformadas durante la supervisión o fiscalización.

Figura 1. Ciclo de vida de la mina y el cierre



Nota. Elaboración propia

A continuación, se presentan algunos de los principales conceptos que se manejan a nivel internacional para considerar en el cierre de minas:

## 2.1. Conceptos clave de planificación del cierre de acuerdo con la experiencia internacional

Para considerar un plan de cierre exitoso, se analizó la experiencia internacional de diferentes países en materia de cierre de minas (Australia, Argentina, Canadá y Chile). De acuerdo con el análisis realizado, un cierre de minas debe considerar al menos los siguientes aspectos técnicos:

- ◆ **Recopilación de información ambiental de referencia:** La recopilación de información ambiental histórica de referencia es esencial, porque proporciona una línea base para comprender el impacto ambiental de las instalaciones mineras al entorno.
- ◆ **Estabilidad química (EQ):** Se refiere a la capacidad de los materiales presentes en el sitio minero para resistir procesos químicos que podrían causar impactos negativos en el ambiente, como la generación de DM u otros problemas de contaminación. Se entenderá que una instalación minera se encuentra estable químicamente cuando su relación con el entorno no origina impactos que provoquen un efecto significativo a la salud de las personas o el ambiente.
- ◆ **Drenaje minero (DM):** Se refiere al efluente que se encuentra en o cerca de una o varias instalaciones mineras que han sido afectadas por la actividad minera. Este efluente puede contener una variedad de sustancias químicas, incluidas metales pesados y compuestos ácidos que pueden ser dañinos para el ambiente y la salud humana. El drenaje minero puede tener graves consecuencias ambientales, como la contaminación de cuerpos de agua subterráneos o superficiales, la degradación de hábitats acuáticos y terrestres, y la afectación de la calidad del agua potable. Además, puede tener impactos económicos, sociales y de salud significativos en las comunidades locales.
- ◆ **Fuentes generadoras de drenaje minero:** Es cualquier instalación minera constituida por materiales que, posterior al proceso físico o químico de carácter antrópico, quedan expuestos al ambiente con la capacidad de reacción y la generación de DM. Estas fuentes pueden variar según el tipo de operación minera, pero algunas de las más comunes incluyen botaderos, depósitos de relaves, depósitos de lixiviación, mina a tajo y subterránea. Por lo general, estas instalaciones corresponden a una instalación remanente, es decir, a cualquier estructura o instalación que queda después de del cierre de una mina, dado que frecuentemente este tipo de instalaciones no pueden ser removidas, debido a sus dimensiones.

**Instalaciones complementarias o auxiliares:** Corresponden a instalaciones que

- ◆ pueden ser desmanteladas y retiradas de la mina, por lo que no presentan un riesgo para la salud, la vida de las personas y el ambiente. Principalmente son instalaciones necesarias para el procesamiento de mineral y el funcionamiento de la mina. Algunas de las instalaciones complementarias y auxiliares de una mina incluyen:
  - ◆ **Instalaciones de almacenamiento:** Son las instalaciones encargadas de almacenar el mineral y otros materiales dentro de la mina. Pueden incluir silos, estanques, bodegas y otros sistemas de almacenamiento.

- ◇ **Instalaciones de procesamiento:** Son las instalaciones encargadas de procesar el mineral extraído. Pueden incluir plantas de trituración, molienda, flotación, separación magnética y otros procesos.
- ◇ **Instalaciones de transporte:** Son las instalaciones encargadas de transportar el mineral y otros materiales dentro y fuera de la mina. Pueden incluir sistemas de transporte por cinta transportadora, camiones, ferrocarril, tuberías, entre otros.
- ◇ **Instalaciones de alojamiento:** Para alojar al personal de la mina, se pueden requerir instalaciones como campamentos, dormitorios, casas o apartamentos.
- ◇ **Instalaciones de alimentación:** Para proporcionar comida y bebida al personal de la mina, se pueden requerir cocinas, comedores, cafeterías o tiendas de conveniencia.
- ◇ **Instalaciones sanitarias:** Para el bienestar y la higiene del personal, se pueden requerir instalaciones como baños, duchas, lavanderías y clínicas médicas.
- ◇ **Instalaciones de energía:** Para suministrar energía eléctrica a la mina, se pueden requerir instalaciones como subestaciones eléctricas, líneas de transmisión y generadores.
- ◇ **Instalaciones de seguridad:** Para garantizar la seguridad de los trabajadores y la propiedad, se pueden requerir instalaciones como sistemas de vigilancia, control de acceso, señalización y dispositivos de protección personal.

Las instalaciones complementarias y auxiliares varían según la ubicación geográfica de la mina, el tamaño de la operación y el tipo de mineral extraído. Este tipo de instalaciones no contempla medidas de poscierre, dado que se desmantelan y no quedan en el lugar. Sin embargo, el suelo debe ser tratado o dispuesto en un lugar autorizado. Cabe resaltar que estos espacios podrían causar algún tipo de contaminación; por ejemplo, la filtración de un estanque de combustible.



- ◆ **Identificación de las instalaciones mineras:** Permite una evaluación precisa de los riesgos ambientales y de seguridad asociados con el cierre.
- ◆ **Identificación de los riesgos:** La identificación se debe realizar en etapas iniciales desde el diseño del proyecto minero y a lo largo de todo el proceso de operación. En general, los riesgos de una mina cambian y aumentan a medida que la mina madura.
- ◆ **Riesgos de estabilidad química:** En el cierre de una mina, existen varios riesgos asociados a la estabilidad química que deben ser considerados y gestionados adecuadamente. A continuación, se mencionan algunos de los principales riesgos:
  - ◇ **Drenaje ácido de mina (DAM):** La exposición de minerales sulfurados a la atmósfera y el agua puede generar drenaje ácido, un proceso químico que libera ácidos y metales pesados tóxicos al entorno acuático y al suelo.
  - ◇ **Contaminación de aguas subterráneas o superficiales:** La infiltración de aguas de lluvia o de cuerpos de agua contaminados puede llevar a la contaminación de los acuíferos subterráneos o cuerpos de agua superficiales cercanos, lo que compromete la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos.
  - ◇ **Liberación de gases y polvos tóxicos:** Algunos minerales y residuos mineros pueden contener sustancias tóxicas o volátiles que, en condiciones inadecuadas de manejo o almacenamiento, pueden liberarse al aire y representar riesgos para la salud humana y el ambiente.
  - ◇ **Movilización de contaminantes:** Durante el cierre de la mina, existe el riesgo de que los contaminantes almacenados en las pilas de desechos, relaves u otros residuos sean movilizados por procesos erosivos o infiltración de agua, lo que genera contaminación en áreas cercanas.
- ◆ **Evaluación de los riesgos:** Una vez identificados los riesgos, es necesario evaluar su probabilidad de ocurrencia y su impacto en el entorno y la salud y seguridad de las personas que trabajan en la mina y de la comunidad cercana. Se pueden utilizar herramientas como matrices de riesgos o análisis de escenarios para determinar la gravedad y la probabilidad de los riesgos. Si durante el proceso de operación existen cambios en la identificación de los riesgos, la evaluación de riesgos se debe actualizar.

- ◆ **Determinación de medidas preventivas y de mitigación:** Una vez evaluados los riesgos, se deben determinar las medidas preventivas y de mitigación adecuadas para minimizar el impacto de los riesgos. Esto puede incluir medidas como la realización de estudios complementarios, la implementación de sistemas de gestión ambiental y de seguridad, el monitoreo ambiental y de salud ocupacional, la capacitación y la sensibilización de los trabajadores y de la comunidad, entre otros.
- ◆ **Programa de Estabilidad Química (PEQ):** Las empresas deberán establecer un programa de estabilidad química durante la operación de la mina, que defina compromisos de estudios por parte del titular, los cuales deberán cumplirse durante las actualizaciones periódicas. El programa constituirá una herramienta para el titular minero y la hoja de ruta para el supervisor, ya que le permitirá determinar la historia de los diferentes estudios y respaldos para cada instalación minera con el objeto de determinar si no existen desviaciones que podrían generar algún riesgo en la medida de cierre final. En términos generales, se sugiere aumentar progresivamente el nivel de información recopilada sobre la EQ a lo largo del tiempo. Esto permitirá validar los datos obtenidos en las etapas iniciales del ciclo de vida de la operación minera y complementarlos para reducir la incertidumbre asociada con las medidas de prevención, control y tratamiento que se implementarán en etapas posteriores. Además, es importante evaluar la viabilidad, eficacia y rendimiento de las medidas adoptadas para garantizar la EQ de las instalaciones mineras (ya sea mediante prevención, control o tratamiento) a través de monitoreo continuo, recopilación de información, pruebas de laboratorio, ensayos en terreno, entre otros métodos.

Por último, en cuanto a la etapa de evaluación del riesgo ambiental, es crucial tener en cuenta que estas evaluaciones deben actualizarse de manera constante, ya que las condiciones proyectadas pueden cambiar en respuesta a eventos o modificaciones en la operación de la mina. Esto también puede ocurrir si el nivel de riesgo que se considera aceptable en la actualidad no lo es en el futuro.



Figura 2. Relación entre las etapas de un programa de estabilidad química (PEQ) y el ciclo de vida de una mina



Nota. Tomada de Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [Sernageomin] (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras*. Sernageomin.

- ◆ **Estimación de costos:** Una vez identificadas las actividades y medidas necesarias para ejecutar el cierre, se determinan los costos asociados con cada una de ellas. Es necesario considerar los precios de mercado para contratar servicios y obtener equipos y materiales. Además, se debe incluir el costo de mano de obra y cualquier

otro gasto relacionado. Las estimaciones de costos iniciales pueden considerar estudios de ingeniería conceptuales o de perfil, pero, a medida que la vida útil disminuya, las empresas mineras deben profundizar en ingenierías básicas. Cabe resaltar que, en los últimos cinco años de vida útil, las minas deben contar con ingenierías de detalle que le permitan al Estado contar con costos de cierre reales y con un buen respaldo de las cubicaciones de las medidas.

- ◆ **Implementación de las medidas preventivas y de mitigación:** Después de determinar las medidas preventivas y de mitigación, es necesario implementarlas adecuadamente y asegurarse de que sean efectivas a lo largo del tiempo.
- ◆ **Monitoreo y evaluación:** Es importante llevar a cabo un seguimiento y evaluación constante de estudios de estabilidad química y física orientados al cierre de la mina, y realizar revisiones de las medidas propuestas y las medidas implementadas (por ejemplo, cierres progresivos), con el objeto de garantizar que se estén logrando los resultados deseados y realizar ajustes necesarios, en caso de que se requiera.
- ◆ **Garantías financieras:** Se debe considerar un monto para implementar todas las actividades necesarias para lograr la estabilidad física y química y la rehabilitación ambiental de un sitio posterior al cese de las operaciones. Estas garantías pueden tomar la forma de depósitos en efectivo, cartas de crédito, seguros de garantía u otros instrumentos financieros aceptados por la autoridad reguladora.
- ◆ **Auditorías:** Implementación de diferentes tipos de auditorías durante la operación de la mina (periódicas, extraordinarias, voluntarias y cierre final), con el objetivo de evaluar y verificar que las actividades comprometidas por el titular minero se realicen de acuerdo con los requisitos legales, regulatorios y ambientales aplicables.
- ◆ **Fiscalizaciones o supervisiones:** Con el objeto de verificar la condición de las instalaciones, el número de estas y el estado de los cierres progresivos o cierres temporales, es necesario que se realicen fiscalizaciones o supervisiones periódicas a las diferentes minas o instalaciones mineras, para comprobar que el plan de cierre se está realizando de acuerdo con lo planificado. Las autoridades correspondientes deberán establecer calendarios anuales de supervisión para dar seguimiento a los planes de cierre de las diferentes minas.
- ◆ **Actualizaciones de planes de cierre:** Durante la operación minera, se debe establecer actualizaciones periódicas o voluntarias, las cuales permitirán incorporar el avance de las distintas ingenierías durante el avance de la vida útil, considerar cambios en los procesos o de tecnología e incorporar de nuevos riesgos —identificados como resultado del avance de los estudios o resultados de las fiscalizaciones o auditorías— que pueden afectar al cierre o poscierre de la mina.
- ◆ **Poscierre:** Debe considerar la mantención, la reparación y el control de las medidas de cierre implementadas por la empresa minera en el largo plazo y según la pla-

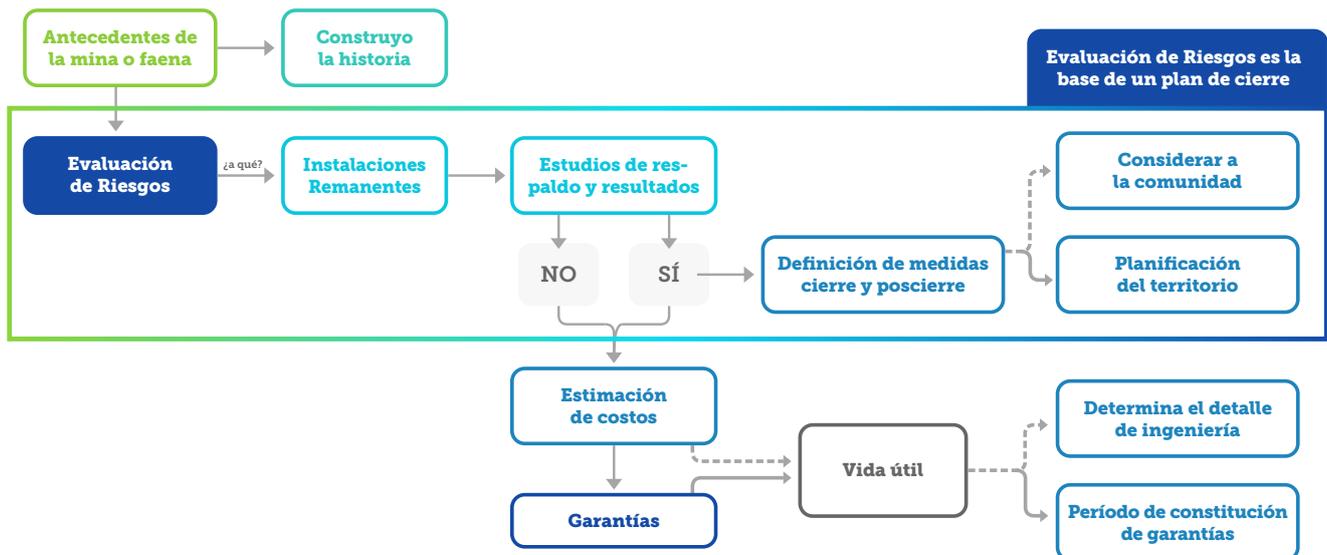
nificación territorial existente para el sector donde se encuentra ubicada la mina. De acuerdo con lo anterior, las garantías financieras son dispuestas a perpetuidad.

- ◆ **Sociales:** Esto implica que la comunidad y otros actores relevantes tienen el derecho de informarse sobre el proyecto, expresar sus opiniones, realizar observaciones y participar en las decisiones relacionadas con el cierre de la mina. La ley de cierre debería garantizar la participación de la comunidad en el proceso, así como medidas para mitigar los impactos socioeconómicos en la zona afectada.
- ◆ **Permisos:** Obtención de permisos y autorizaciones necesarios para llevar a cabo el cierre de manera legal y ética.

El manejo adecuado de estos conceptos es esencial para garantizar que el cierre de minas se realice de manera responsable y sostenible, protegiendo el ambiente y los intereses de las comunidades locales.

Es importante establecer que la evaluación de riesgos es fundamental en el proceso de cierre de minas, ya que permitirá identificar, analizar y gestionar los posibles riesgos asociados con esta actividad, y, en base a estos resultados, determinar las medidas de cierre y poscierre de una mina.

Figura 3. Importancia de la evaluación de riesgos en el plan de cierre de minas



Nota. Elaboración propia

## 2.2. Conceptos de planificación del cierre en el Perú

En el siguiente acápite se identifican los conceptos de planificación de cierre de minas considerados en el Perú.

### 2.2.1. Cierre de minas<sup>1</sup>

El cierre de minas puede definirse como el conjunto de actividades a ser implementadas a lo largo del ciclo de vida de la mina a fin de cumplir con los criterios ambientales específicos y alcanzar los objetivos sociales deseados después de la etapa de minado. El cierre de minas es un proceso progresivo que empieza en la primera etapa del proyecto con el diseño conceptual y termina solo cuando se han alcanzado de manera permanente los objetivos específicos de cierre.

Las actividades incluyen la elaboración del plan de cierre conceptual al inicio del proyecto, la realización de las actividades de cierre progresivo durante la operación, las investigaciones durante la operación de la mina para determinar las mejores técnicas que formarán parte del plan de cierre, las actualizaciones periódicas del plan de cierre, la ejecución de las actividades de cierre final y las actividades poscierre identificadas en el plan.

El cierre de minas normalmente incluye el diseño y la implementación de diferentes medidas como desmantelamiento, estabilización física, hidrológica y química, tratamiento de drenaje ácido de mina y lixiviación de metales, recuperación o rehabilitación de terrenos, revegetación y rehabilitación de hábitats acuáticos, etc. Además, incluye programas sociales dirigidos a los trabajadores de la mina y la población del área de influencia.

### 2.2.2. Planes de cierre de minas

El plan de cierre de minas es un instrumento de gestión ambiental conformado por acciones técnicas y legales, efectuadas por los titulares mineros, destinado a establecer medidas que se deben adoptar a fin de rehabilitar el área utilizada o perturbada por la actividad minera para que este alcance características de ecosistema compatible con un ambiente saludable y adecuado para el desarrollo de la vida y la preservación paisajista.

Según el Consejo Internacional de Minería y Metales (2008), el proceso de planificación del cierre se define como un

proceso que se extiende a lo largo del ciclo de vida de la mina y que, generalmente, culmina con el abandono de la concesión. Incluye el desmantelamiento y la rehabilitación. El término 'cierre' individualmente puede utilizarse a veces para indicar el momento en el cual cesan las operaciones, se retira la infraestructura, y la administración del emplazamiento se limita en gran medida al seguimiento.

<sup>1</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). Guía para la elaboración de planes de cierre de minas. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 5. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

La rehabilitación se llevará a cabo mediante la ejecución de medidas que sean necesarias antes, durante y después del cierre de operaciones. De ese modo, se cumplirán las normas técnicas establecidas que permitirán eliminar, mitigar y controlar los efectos adversos al ambiente generados o que se pudieran generar por los residuos sólidos, líquidos o gaseosos producto de la actividad minera.

El plan de cierre de minas deberá describir las medidas de rehabilitación, su costo, la oportunidad y los métodos de control y verificación para las etapas de operación, cierre final y poscierre. Además, deberá indicar el monto y plan de constitución de garantías ambientales exigibles. Es importante que este plan se realice progresivamente durante la vida útil de la operación minera, de acuerdo con el cronograma aprobado por la autoridad competente. Al término de las actividades se procederá al cierre del resto de áreas o instalaciones que, por razones operativas, no pudieron cerrarse durante la etapa productiva o comercial.

El planeamiento del cierre de minas es una actividad permanente que comienza durante los estudios de prefactibilidad. Además, es parte del estudio de impacto ambiental (EIA) y la etapa de ingeniería de detalle, y continúa a lo largo del ciclo de vida de la mina hasta la etapa poscierre.

Por lo tanto, el plan de cierre es un “documento vivo” que es reevaluado y preparado en las siguientes etapas del proyecto minero, según lo dispone el reglamento (Decreto Supremo N.º 033-2005-EM, Reglamento para el Cierre de Minas y sus respectivas modificaciones):

- ◆ Plan de cierre de minas a nivel conceptual preparado como parte del EIA (artículo 9).
- ◆ Plan de cierre de minas detallado presentado y aprobado antes del inicio de la fase de operación (artículo 17).
- ◆ Actualizaciones del plan de cierre detallado a lo largo de la vida operativa de la mina, el primero a los tres años de aprobado el plan de cierre y luego cada cinco años (artículo 20 numeral 1) o a requerimiento de la Dirección General de Minería del Minem (artículo 20 numeral 2).
- ◆ A dos años antes del cese de operaciones, el titular de actividad minera debe presentar, a la Dirección General de Minería para su aprobación, el cronograma detallado de ejecución de las medidas contenidas en el plan de cierre de minas para las actividades de cierre final y poscierre (artículo 30).
- ◆ Se requiere informes de avance sobre las actividades de cierre de la mina cada seis meses (artículo 29).

### 2.2.3. Plan de cierre conceptual

El artículo 9 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM establece que el plan de cierre de minas que se incluye en el EIA debe ser presentado a la DGAAM para su aprobación. Cabe resaltar que el plan de cierre conceptual no requiere un estimado de costos del cierre.

El plan de cierre conceptual deberá incluir la siguiente información:<sup>2</sup>

- ◆ Los principales componentes del proyecto minero
- ◆ Un cronograma de las áreas disturbadas por la mina a lo largo su ciclo de vida y la extensión espacial de dichas áreas
- ◆ El programa de manejo de los residuos mineros para predecir, prevenir, o tratar y controlar la lixiviación de metales y el drenaje ácido de roca
- ◆ Los componentes que permanecerán en el sitio después de concluir las operaciones mineras, es decir, luego de la desactivación de las instalaciones productivas
- ◆ Los objetivos específicos de cierre para cada componente de la mina, según lo establecido en el artículo 10 del reglamento
- ◆ Las actividades específicas de cierre de mina que serán implementadas durante los periodos de construcción, operaciones y cierre final para lograr los objetivos
- ◆ Los escenarios de cierre de minas para el cierre temporal (artículos del 33 a 36), cierre progresivo (artículo 25), y poscierre (artículo 31); y los componentes de la mina para cada uno de estos escenarios, y actividades de cuidado y mantenimiento que puedan ser necesarias para el logro de criterios ambientales y de uso de las tierras
- ◆ Los problemas socioeconómicos previstos que deberán ser evaluados para los diferentes escenarios de cierre de mina, incluyendo las actividades de consulta realizadas durante la elaboración del plan de cierre de mina

### 2.2.4. Plan de cierre detallado<sup>3</sup>

Se debe preparar un plan de cierre de minas detallado para ser presentado a la DGAAM un año después de la aprobación del EIA y antes del inicio de la etapa de producción. El plan de cierre detallado es una actualización del plan de cierre conceptual, pero incluye los resultados de todos los estudios realizados durante el planeamiento final y las etapas de diseño del proyecto.

Este documento debe incluir estimados de costos para las actividades de rehabilitación propuestas durante la vida de operación de la mina, cierre de la mina, actividades de desmantelamiento, y actividades de cuidado, y mantenimiento poscierre.

El plan de cierre detallado de la mina debe incluir los escenarios de cierre progresivo, temporal y final.

<sup>2</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 7. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

<sup>3</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 7. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

### 2.2.5. Actualizaciones del plan de cierre

El artículo 20 numeral 1 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM indica que el plan de cierre de minas deberá ser actualizado tres años después de su primera aprobación y luego cada cinco años durante la vida de la mina.<sup>4</sup> Estas actualizaciones al plan de cierre considerarán todos los cambios ocurridos en las actividades operativas, rehabilitación progresiva, cambios en la estabilidad física o química de los componentes de la mina, evolución de las relaciones comunitarias, nuevos escenarios de riesgos potenciales no identificados anteriormente y las variaciones en el presupuesto y el monto de la garantía, lo cual contribuirá a mantener la consistencia entre el plan de cierre y la realidad.

El artículo 20 numeral 2 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM indica que

la Dirección General de Minería del MEM, en ejercicio de sus funciones de fiscalización, por haberse evidenciado un desfase significativo entre el presupuesto del Plan de Cierre de Minas aprobado y los montos que efectivamente se estén registrando en la ejecución o se prevea ejecutar; cuando se produzcan mejoras tecnológicas o cualquier otro cambio que varíe significativamente las circunstancias en virtud de las cuales se aprobó el Plan de Cierre de Minas o su última modificación o actualización.

### 2.2.6. Cierre temporal<sup>5</sup>

Como resultado de las circunstancias económicas u operacionales, es posible que las actividades mineras o de procesamiento sean temporalmente suspendidas. Por ejemplo, pueden ser suspendidas mientras se recuperan del precio de los metales (condición conocida como suspensión), esperando su reinicio en el futuro próximo. Por otro lado, la autoridad podría ordenar la paralización de uno o más componentes o de la totalidad de la operación si es que esta representa un riesgo inminente a la salud, la seguridad o el ambiente; a esta condición se le conoce como paralización. En el caso de una paralización también se espera que las actividades se reinicien en el corto plazo, una vez que los factores de riesgo se hayan eliminado.

En ambos casos, se requiere desarrollar un plan de cuidado y mantenimiento detallado, considerando la posibilidad de futuras operaciones en el sitio. Además, se evaluarán los impactos sociales relacionados con el cierre temporal, así como las medidas implementadas para mitigar estos impactos.

Los objetivos de cierre temporal difieren de los objetivos de cierre final porque, por definición, el cierre temporal no es una condición permanente y se espera que la mina vuelva a su condición de operación en un periodo no mayor a tres años. En caso contrario, se entiende que se trata de un escenario de cierre final, por lo que las medidas de cierre final deberán ser implementadas (artículo 34 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM). Normal-

<sup>4</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 7. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

<sup>5</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 9. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

mente, los objetivos de cierre temporal priorizan los problemas de salud y seguridad, así como la estabilidad física y química en el corto plazo. En el caso de que las circunstancias sean adversas para el reinicio de la operación, será necesaria la revisión del plan de cierre y su posterior implementación.

### **2.2.7. Cierre progresivo<sup>6</sup>**

El cierre progresivo es un escenario que ocurre de manera simultánea a la etapa de operación de una mina, cuando un componente o parte de un componente de la actividad minera deja de ser útil. Por esa razón, deberá ser sometido a actividades de cierre como el desmantelamiento, la demolición, el restablecimiento de la forma del terreno o la revegetación.

Las actividades de cierre progresivo han sido diseñadas para lograr los objetivos ambientales y sociales específicos, y deberán describirse en los planes de cierre desde su formulación hasta sus futuras actualizaciones. Cabe destacar que el cierre progresivo es beneficioso tanto para el ambiente como para el titular minero. Favorece al ambiente al permitir una recuperación rápida del terreno y controlar la futura degradación ambiental; por ejemplo, la generación de drenaje ácido, la erosión, entre otros, y beneficia al titular reduciendo los costos de las actividades del cierre final, debido a la disponibilidad de personal y equipos en el sitio. Esto genera experiencia para la etapa de cierre final y mejora la imagen pública del titular. Asimismo, de acuerdo con el reglamento, en principio, salvo casos de incumplimiento, no se tiene la obligación de establecer garantías de cierre progresivo descontándolo del monto de la garantía financiera (artículo 48).

### **2.2.8. Actualización del plan de cierre presentada antes del cierre definitivo de las operaciones mineras**

La actualización del plan de cierre de minas definirá las actividades que serán definitivamente ejecutadas para el desmantelamiento y cierre del sitio. La última actualización es preparada con una anticipación no mayor a cinco años del cierre definitivo de las operaciones mineras. Esta es la actualización final del plan de cierre de acuerdo con las condiciones técnicas, económicas, sociales y ambientales previas al cese de las operaciones.

En este plan de cierre final, el titular minero deberá evaluar los riesgos relacionados con los componentes que, por razones operativas, no hayan sido sometidos a cierre progresivo. Para este efecto, se deberán establecer las especificaciones detalladas de las tareas de cierre, realizar procesos de consulta en relación con el cierre de la mina, y evaluar cualquier cambio en el plan de operaciones ocurrido durante la vida de la mina.

---

<sup>6</sup> De acuerdo con Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros, p. 10. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

La versión final del plan de cierre de la mina presentará:

- ◆ Los objetivos ambientales de uso de tierras y socioeconómicos para cada componente de las actividades mineras
- ◆ Las actividades específicas por implementarse durante el periodo de cierre para el logro de los objetivos
- ◆ Las condiciones de monitoreo, cuidado y mantenimiento poscierre requeridos para cada componente a fin de lograr los objetivos de cierre
- ◆ El cronograma de cierre detallado
- ◆ Los costos estimados para las actividades de cierre, y programas de cuidado y mantenimiento poscierre (artículo 31 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM)

Por otro lado, según se señala en el artículo 30 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM, dos años antes del cese de las operaciones mineras, el titular minero deberá presentar a la Dirección General de Minería un cronograma detallado del cierre e informar al respecto a los gobiernos locales y regionales.

Cabe precisar que la facultad del OEFA de disponer la actualización o modificación de un plan de cierre de mina persiste aún después del cese de operaciones mineras y se ordena, entre otros supuestos, cuando la DGAAM o el OEFA adviertan cambios que varíen significativamente las circunstancias en virtud de las cuales se aprobó el plan de cierre de minas o su última modificación o actualización aprobada, de conformidad con el numeral 20.2 del artículo 20 del Reglamento de Cierre de Minas.

### **2.2.9. Informes semestrales (avance)**

El artículo 29 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM establece la presentación de informes semestrales de avance de las labores de rehabilitación. Estos informes mostrarán las actividades de rehabilitación propuestas en el último plan de cierre aprobado y las actividades realizadas, así como las actividades propuestas para el siguiente semestre. Además, los informes semestrales incluirán los resultados del programa de monitoreo de las áreas ya rehabilitadas. Es importante destacar que los informes de avance semestrales deben continuar aún después de la conclusión de los trabajos de cierre final hasta la emisión del certificado de cierre por parte de la autoridad.

El Minem aprobó la *Guía para la elaboración de planes de cierre*, en la cual estipuló el contenido mínimo que deben tener los informes semestrales:

- ◆ Resumen ejecutivo
- ◆ Introducción
- ◆ Resumen de actividades de cierre progresivo programados
- ◆ Actividades de cierre progresivo realizadas (descripción de las actividades implementadas durante el semestre)
- ◆ Monitoreo de las actividades de cierre progresivo
- ◆ Actividades de cierre progresivo propuestas (resumen de las actividades programadas para el próximo semestre y los siguientes)

Al respecto, se debe precisar que en la experiencia se ha identificado que los informes semestrales pueden ser una herramienta importante para la autoridad de fiscalización. Sin embargo, no se remiten con un detalle adecuado que permita acreditar el cumplimiento de las actividades de cierre en base a ellos.

Recientemente, el artículo 6 de la ley, pendiente de reglamentación, establece que los informes semestrales deberán ser presentados a nivel de ingeniería de detalle. Es un pendiente del Minem establecer su contenido mínimo. Al respecto, sin perjuicio de las competencias asignadas al Minem, se identifica una oportunidad de mejora respecto al contenido de los informes semestrales, los cuales están vinculados a la liberación parcial de garantías mineras (artículo 62 del Decreto Supremo N.º 033-2005-EM). En ese sentido, para considerar que se cuentan con los elementos de juicio necesario para determinar el cumplimiento de las medidas de cierre, en la experiencia del fiscalizador, se requiere de los titulares mineros la siguiente información:

- ◆ Planos a nivel de detalle de ingeniería, informes dossier de la ejecución del cierre de los componentes mineros y sus planos *as built*.
- ◆ Avance de las actividades de cierre (estabilidad física, geoquímica, hidrológica y revegetación) en porcentajes y con la evidencia respectiva (llámase fotografías, videos, entre otros) que permitan a la autoridad fiscalizadora contrastar dicha información con lo verificado in situ o en gabinete. Las actividades deben ser sistematizadas y enlistadas en correspondencia con el cronograma físico aprobado en el plan de cierre de minas y sus modificaciones o actualizaciones.
- ◆ El sustento o evidencia de las actividades al que se refiere el punto 2 debe dar cuenta del proceso de cumplimiento de cierre, evidenciando la ejecución en cada etapa (antes, durante y el estado actual).
- ◆ Las fotografías deben ser capturadas desde varias perspectivas (frontal, panorámica, perfil y otras), fechadas, georreferenciadas, y en su formato nativo.
- ◆ Uso de equipos tecnológicos (por ejemplo, GPS diferenciales, drones) a fin de que se puedan obtener imágenes con georreferenciación y fotogrametría.
- ◆ Anexar el dossier de control de calidad por cada componente implementado y — para el caso de construcción con concreto armado— la información debe contener muestreos de concreto, porcentaje de humedad de materiales, ensayos de laboratorio que sustenten el diseño de la fuerza de concreto establecido; además, el uso de materiales debe ser sustentado con comprobantes de la adquisición.
- ◆ Presentar información del cronograma y el presupuesto de las actividades de cierre programadas y ejecutadas (progresivo, final y poscierre), relacionándolas con las respectivas partidas presupuestales aprobadas en el instrumento de gestión ambiental (IGA), el plan de cierre de minas (PCM) y la actualización plan de cierre de minas (APCM), etc.
- ◆ Presentar los montos de inversión ejecutados en cada uno de los componentes señalando la descripción, unidad de medida, metrado, precio unitario y precio parcial, para las actividades de estabilidad física, estabilidad geoquímica, estabilidad hidrológica, entre otras.

- ◆ Reporte de gestión social dentro de la etapa de cierre de minas del proyecto, en correspondencia con el compromiso establecido en el IGA.
- ◆ Adjuntar la ficha u hoja de verificación del componente cerrado referido al mantenimiento y monitoreo físico, geoquímico e hidrológico.

## 2.3. Condiciones de cierre de minas en Perú

De acuerdo con la normativa vigente, la condición de un determinado componente de una mina, después de la ejecución de las actividades de cierre, puede ser:

- ◆ **Condición de ningún cuidado:** Cuando no se requieren actividades de cuidado o mantenimiento adicionales después del término de las actividades de cierre. Casi nunca se presenta este caso para la totalidad de una operación minera.
- ◆ **Condición de cuidado pasivo:** Ocurre cuando existe una mínima necesidad de programas de cuidado y mantenimiento continuo en la etapa poscierre. El nivel de esfuerzo requerido para el cuidado y mantenimiento puede variar ampliamente. El trabajo puede incluir programas de monitoreo permanente, inspección anual de las instalaciones de almacenamiento de residuos y mantenimiento de vegetación, pero en general no se requiere personal permanente en el sitio.
- ◆ **Condición de cuidado activo:** Esta condición requiere programas de cuidado y mantenimiento poscierre a largo plazo. El caso típico de cuidado activo es cuando existe una necesidad de tratamiento continuo de efluentes para cumplir con los objetivos ambientales. El cuidado activo frecuentemente necesita la presencia de personal permanente en el sitio.

### 2.3.1 Consideraciones

Con respecto a los puntos de la segunda y tercera viñeta, de acuerdo con la experiencia existen las siguientes consideraciones, que significan un alto riesgo y que se debieran modificar de la guía:

- ◆ Se entenderá que el cierre de una o más instalaciones mineras se encuentra ejecutado solo una vez que la instalación se encuentre estable física y químicamente.
- ◆ Si la instalación continua con tratamientos, monitoreos o estudios, se entenderá que la instalación aun no ejecuta la totalidad del cierre y esta etapa debe ser considerada como parte del cierre final. De lo contrario, el Estado se encuentra en un potencial riesgo de transformarse en un pasivo minero, dado que los cinco años de poscierre, establecidos por la normativa vigente, no serán suficientes para establecer la condición de estabilidad de la instalación.

## 2.4. Actividades de cierre

El objetivo principal de esta sección es describir las actividades que tendrán lugar durante el periodo final de desmantelamiento y cierre de la mina, así como todas las actividades de cierre progresivo y los escenarios temporales de cierre. De manera preferente las actividades de cierre se deberán describir por componentes del proyecto, considerando los diferentes aspectos como desmantelamiento, demolición, recuperación y disposición, estabilidad física, estabilidad geoquímica, manejo de agua, establecimiento de la forma del terreno y rehabilitación de hábitats, revegetación, rehabilitación de hábitats acuáticos, programas sociales.

El cronograma propuesto en el plan de cierre debe identificar las fechas en que se realizarán las actividades de cierre progresivo y las actividades finales de desmantelamiento y cierre. Este cronograma está basado en el plan de operación de la mina.

Esta sección del documento se refiere específicamente al apartado de la tabla de contenidos del plan de cierre de minas, tal como lo establece el anexo I del reglamento, es decir, a las actividades requeridas para el periodo de cierre final. No obstante, algunas de las actividades aquí mencionadas podrían ser aplicadas a la sección de la tabla de contenidos referida a las actividades de cierre progresivo, según sea la programación de las actividades de cierre progresivo y cierre final en cada caso particular.

El cierre temporal constituye un evento no programado causado por diversas circunstancias (artículos del 33 al 35 del reglamento). En caso de que la operación se suspenda o paralice por cualquier razón, el titular deberá desarrollar las actividades de carácter ambiental y social señaladas en el plan de manejo ambiental del EIA o del PAMA. Si la mina paralizara sus operaciones por más de tres años, la unidad minera tendrá que ser desmantelada y cerrada de acuerdo con el plan de cierre aprobado.

En determinados casos podría ser necesario —además de la información requerida en los párrafos siguientes— la evaluación de las alternativas para aquellos componentes que representen mayor riesgo para la seguridad, la salud o el ambiente, de modo que se garantice que la alternativa elegida es la mejor desde el punto de vista técnico, económico, ambiental y social.

El titular minero tendrá la responsabilidad de proporcionar los estudios, informes, muestras y respaldos necesarios a la autoridad para verificar que se implementó la totalidad de las actividades de cierre.

## 2.4.1. Desmantelamiento

Para las actividades de desmantelamiento, durante la inspección o supervisión, el supervisor deberá solicitar la totalidad de los respaldos necesarios a fin de comprobar que la actividad se ejecutó de acuerdo con lo programado y que no existen desviaciones con respecto a lo aprobado. El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas.

### 2.4.1.1. Minas subterráneas

Entre otros aspectos, el desmantelamiento debe considerar:

- ◆ Retiro de equipos móviles y fijos
- ◆ Retiro de la infraestructura de la mina; por ejemplo, ductos de ventilación y ventiladores
- ◆ Líneas eléctricas
- ◆ Líneas de agua
- ◆ Rieles
- ◆ Sistemas de izaje subterráneos
- ◆ Polvorines
- ◆ Chancadoras

En el caso de los equipos o infraestructura que no serán retirados o no puedan serlo, se deberá proporcionar la justificación apropiada y los detalles de las medidas para evitar la contaminación o el modo en que se protegerá el agua de la contaminación. Además, se tiene que considerar un procedimiento para evitar la contaminación de áreas subterráneas (por ejemplo, los talleres de servicio) y medidas para la protección permanente (cubiertas, rellenos) de las aperturas a superficie (por ejemplo, piques, chimeneas, echaderos y portales de galerías subterráneas).

### 2.4.1.2. Tajos abiertos

Se debe proporcionar información adicional acerca de la protección de las paredes del tajo y la eliminación de accesos, considerando el relleno de taludes, las inundaciones, la voladura de muros inestables e instalación de bermas o cercado perimétrico en las crestas del tajo.

### 2.4.1.3. Instalaciones de procesamiento

Entre los detalles del cierre de las instalaciones de procesamiento, se debe considerar:

- ◆ El retiro o disposición de pilas de concentrados, minerales y residuos
- ◆ La limpieza y purificación de circuitos de procesos
- ◆ El vaciado
- ◆ La limpieza y purificación de tanques y depósitos de almacenamiento de productos químicos y de combustibles, y la desactivación de sistemas de electricidad, gas y agua que no serán necesarios para otras actividades de cierre activo
- ◆ El tratamiento y disposición final de los efluentes generados por las actividades anteriores

### 2.4.1.4. Instalaciones de manejo de residuos

Entre los detalles del cierre de instalaciones de manejo de residuos se debe considerar:

- ◆ El método del cierre final de las áreas de disposición de residuos peligrosos y no peligrosos; por ejemplo, suelos sometidos a estudios técnicos de ingeniería/ coberturas de geomembrana y revegetación
- ◆ Los métodos de cierre de áreas de manejo de relaves; por ejemplo, suelos sometidos a estudios técnicos de ingeniería, coberturas de geomembrana, coberturas de agua, coberturas simples, estabilización química/física, revegetación
- ◆ Los métodos de cierre de botaderos de desmonte; por ejemplo, relleno, renivelación, formación de taludes, suelos sometidos a estudios técnicos de ingeniería/ coberturas de geomembrana, coberturas de agua, revegetación
- ◆ Los métodos para el tratamiento de otros residuos que puedan requerir manejo especial; por ejemplo, el tratamiento de lodos, residuos domésticos, residuos industriales, residuos peligrosos, entre otros

### 2.4.1.5. Instalaciones de manejo de aguas

Entre los detalles del cierre de las instalaciones de manejo de aguas, se debe considerar:

- ◆ Detalles del cese de operaciones y retiro de las bombas y sistemas de tuberías de agua de mina
- ◆ Detalles del manejo de agua en tajos abiertos, subterráneos, depósitos de desmonte, depósitos de material estéril y canteras y subterráneos, incluyendo las descargas de agua de mina subterránea o superficial que se esperan después del cierre

Entre los detalles del manejo de aguas en áreas de manejo de relaves se debe considerar lo siguiente:

- ◆ El retiro de estructuras de decantación, estabilización de aliviaderos y pozas, balances de agua al cierre
- ◆ Detalles de manejo de agua de lluvias, incluyendo la reestructuración o instalación de nuevas obras de drenaje superficial
- ◆ Detalles de restauración o reestructuración de cursos o sistemas naturales de agua que hayan sido alterados

#### **2.4.1.6. Áreas de materiales de préstamo**

El cierre debe considerar el retiro de todo el equipo móvil y fijo, y la estabilización de taludes, drenaje superficial y actividades de revegetación.

#### **2.4.1.7. Otras infraestructuras relacionadas con el proyecto**

El cierre debe considerar:

- ◆ La desactivación de redes eléctricas del área
- ◆ La desactivación, limpieza y purificación de tuberías de agua, combustible y gas
- ◆ El vaciado, limpieza y purificación de tanques de productos químicos y de combustible
- ◆ La rehabilitación o determinación de uso futuro de caminos innecesarios en el área, pistas de aterrizaje y líneas de tren

#### **2.4.1.8. Servicios de alojamiento y otras infraestructuras para uso de los trabajadores**

Entre los detalles del cierre de las instalaciones de alojamiento y otros servicios para los trabajadores, se debe considerar la desactivación de los sistemas de energía, y la desactivación del abastecimiento de agua, desagüe y sistemas de gas si los hubiera.

### **2.4.2. Demolición, recuperación y disposición**

Para las actividades de demolición, recuperación y disposición, durante la inspección o supervisión, el supervisor deberá solicitar la totalidad de los respaldos necesarios para comprobar que la actividad se ejecutó de acuerdo con lo programado y no existen desviaciones con respecto a lo aprobado. El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas.

#### **2.4.2.1. Labores mineras**

Para las actividades de demolición, recuperación y disposición, durante la inspección o supervisión, el supervisor deberá solicitar la totalidad de los respaldos necesarios para comprobar que la actividad se ejecutó de acuerdo con lo programado y no existen desviaciones con respecto a lo aprobado. El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas.

#### **2.4.2.2. Instalaciones de procesamiento**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación de las instalaciones de procesamiento, se debe considerar la inspección y el inventario de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la preparación y el retiro de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la inspección y el inventario de materiales reciclables; y la demolición de estructuras para la utilización máxima de los materiales reciclables. Cabe resaltar que se deben describir los volúmenes, métodos y lugares de disposición de los residuos de demolición, y especificar el tipo de residuos (peligrosos o no peligrosos, con asbestos, etc.).

#### **2.4.2.3. Instalaciones de manejo de residuos**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación de las instalaciones de manejo de residuos se debe considerar la inspección y el inventario de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la preparación y el retiro de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la inspección y el inventario de materiales reciclables; y la demolición de estructuras para la utilización máxima de los materiales reciclables. Cabe resaltar que se debe describir los volúmenes, métodos y lugares de disposición de los residuos de demolición, y especificar el tipo de residuos (peligrosos o no peligrosos).

#### **2.4.2.4. Instalaciones de manejo de aguas**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación de las instalaciones de manejo de aguas, se debe considerar el inventario y la inspección de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la preparación y el retiro de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la inspección y el inventario de materiales reciclables; y la demolición de estructuras para la utilización máxima de los materiales reciclables.

#### **2.4.2.5. Áreas de materiales de préstamo**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación, se debe considerar la reutilización, recuperación y disposición de los equipos móviles y fijos, y las estructuras auxiliares.

#### **2.4.2.6. Otras infraestructuras relacionadas con el proyecto**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación de otras infraestructuras relacionadas con el proyecto, se deben considerar la inspección y el inventario de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la preparación y el retiro de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la inspección y el inventario de materiales reciclables; y la demolición de estructuras para el uso máximo de los materiales reciclables. Además, se deben describir los volúmenes, métodos y lugares de disposición de los residuos de demolición, y especificar el tipo de residuos (peligrosos o no peligrosos).

#### **2.4.2.7. Servicios de alojamiento y otras infraestructuras para uso de los trabajadores**

Entre los detalles de las operaciones de demolición y recuperación del alojamiento y otras infraestructuras para uso de los trabajadores, se debe considerar la inspección y el inventario de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la preparación y el retiro de equipos y estructuras que puedan ser vendidas; la inspección y el inventario de materiales reciclables; y la demolición de estructuras para la utilización máxima de los materiales reciclables. Además, se debe describir los volúmenes, métodos y lugares de disposición de los residuos de demolición, y especificar el tipo de residuos (peligrosos o no peligrosos).

### **2.4.3. Estabilidad física**

Durante la supervisión o inspección, el supervisor deberá solicitar la totalidad de los respaldos necesarios para verificar que las instalaciones se encuentran estable físicamente. En la inspección en terreno, se deberá comprobar que la actividad se ejecutó de acuerdo con lo programado y que no existen desviaciones o hallazgos con respecto a lo aprobado. El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas.

El titular minero deberá proporcionar un levantamiento topográfico y un plano general del proyecto (con coordenadas UTM) que muestre la distribución final de cada uno de los componentes y las medidas implementadas una vez que el plan de estabilización física se ha ejecutado; por ejemplo, pozas, bermas, estructuras de transporte y recolección de agua, entre otras. El plano debe considerar todos los componentes del proyecto y la totalidad de las medidas ejecutadas para cada componente.

### **2.4.3.1. Labores mineras subterráneas**

- ◆ Entrega de métodos propuestos (por ejemplo, sellados o rellenos) para el cierre y la clausura de las aperturas a superficie
- ◆ Localización y naturaleza de las cercas, bermas o muros de piedra propuestos, diseñados para evitar el acceso del público a zonas colapsables o potencialmente colapsables
- ◆ Descripción de todas las medidas propuestas para estabilizar los pilares corona (por ejemplo, relleno, voladura, cubierta de concreto, entre otras), señalando métodos de análisis de estabilidad, prueba y caracterización de materiales

### **2.4.3.2. Tajos abiertos**

- ◆ Localización y naturaleza de las cercas, bermas o muros de piedra propuestos, diseñados para evitar el acceso del público al tajo abierto
- ◆ Describir todas las medidas propuestas para estabilizar los taludes del tajo (por ejemplo, el rebajado de taludes, drenaje o protección contra erosión), señalando los métodos de análisis de estabilidad, ensayos y caracterización de materiales

## **2.4.4. Instalaciones de procesamiento**

### **2.4.4.1. Pilas y botaderos de lixiviación**

- ◆ Medidas de cierre ejecutadas o propuestas; por ejemplo, el lavado de las pilas de mineral, el retiro de mineral lixiviado, la cobertura de la pila o botadero, la instalación de un sistema de drenaje, y la apertura de brechas en represas de pozas, revegetación, restauración

## **2.4.5. Instalaciones de manejo de residuos**

### **2.4.5.1. Depósitos de relaves**

- ◆ Descripción de todas las medidas ejecutadas o propuestas para incrementar la estabilidad de las represas; por ejemplo, el rebajado de taludes, la colocación de bermas de pie, la mejora de la protección contra la erosión
- ◆ Descripción de todas las medidas propuestas para estabilizar las superficies de relave expuestas; por ejemplo, la reubicación de relaves, las cubiertas de agua, las cubiertas granulares, la colocación de cobertura de suelo, la revegetación directa, entre otras
- ◆ Descripción de las medidas propuestas, en caso de existir alguna, para evitar el acceso del público a los relaves, así como su posible retiro

#### **2.4.5.2. Botaderos de desmonte**

- ◆ Descripción de todas las medidas ejecutadas o propuestas para estabilizar los taludes del botadero de desmonte (por ejemplo, rebajado de taludes, bermas de pie, cobertura, revegetación, restauración, entre otras), señalando los métodos de análisis de estabilidad, ensayos y caracterización de materiales

#### **2.4.5.3. Pilas de material de desbroce**

- ◆ Descripción de todas las medidas ejecutadas o propuestas para estabilizar los taludes; por ejemplo, rebajado de taludes, colocación de bermas de pie, entre otras
- ◆ Descripción de todas las medidas propuestas para la revegetación de las pilas de material de desbroce

#### **2.4.5.4. Instalaciones de manejo de aguas**

- ◆ Descripción de todas las medidas necesarias para garantizar la estabilidad a largo plazo de las pozas de almacenamiento de agua y las estructuras de descarga de agua relacionadas
- ◆ Descripción de las medidas para proporcionar una adecuada capacidad de flujo para las zanjas, y prevenir obstrucciones, erosión y desbordes

#### **2.4.5.5. Áreas de materiales de préstamo**

- ◆ Descripción de las medidas necesarias para la estabilización de taludes, drenaje superficial y revegetación

#### **2.4.5.6. Otras infraestructuras relacionadas con el proyecto**

- ◆ Descripción del método propuesto y el alcance de la demolición propuesta para todas las edificaciones e infraestructuras
- ◆ El método propuesto (por ejemplo, cercado, seguridad, entre otros) para evitar el acceso del público a cualquier peligro que podría subsistir luego de la clausura del área de la mina
- ◆ Lista de instalaciones (por ejemplo, campamentos, suministros de agua, caminos), que serán devueltos al Gobierno, autoridades locales o a la comunidad para uso público

## 2.4.6. Estabilidad geoquímica

Durante la supervisión o inspección, el supervisor deberá solicitar la totalidad de los respaldos necesarios para verificar que las instalaciones se encuentran estable químicamente. En la inspección en terreno se deberá comprobar que las actividades de cierre se ejecutaron de acuerdo con lo programado y que no existen desviaciones o hallazgos con respecto a lo aprobado. El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas:

- ◆ Entrega de un plano general del proyecto (con coordenadas UTM) que muestre la distribución final de cada uno de los componentes y las medidas implementadas una vez que el plan de estabilización química se ha ejecutado; por ejemplo, que, una vez que se hayan preparado las cubiertas secas o húmedas, se hayan construido los canales de derivación de agua superficial. El plano debe considerar todos los componentes del proyecto y la totalidad de las medidas ejecutadas para cada componente.
- ◆ Entrega de una estimación de los volúmenes y tonelajes de los diferentes tipos de residuos generados durante la vida de la mina y la estrategia de deposición.
- ◆ Entrega de una caracterización geoquímica para todos los tipos diferentes de mineral, desmonte, relaves, subproductos de procesamiento, escorias, lodos de tratamiento de agua, y otros residuos industriales sólidos que se generen durante la vida de la mina. Esta caracterización debe considerar:
  - ◆ Mineralogía
  - ◆ Contenido de metales
  - ◆ Balance ácido base (ABA)
  - ◆ Monitoreo de la calidad del agua intersticial o el drenaje de las pilas de mineral, desmonte y relaves provenientes de las operaciones
  - ◆ Datos de la calidad del agua de la mina
  - ◆ Calidad de agua superficial y subterránea gradiente arriba y gradiente abajo de la zona de disposición de mineral, desmonte, relaves, subproductos de procesamiento, escoria, áreas de almacenamiento de lodos de tratamiento de agua
- ◆ Entrega de la caracterización geoquímica de las paredes del tajo abierto y el potencial de generación de drenaje ácido.
- ◆ Entrega de los resultados de las pruebas cinética de lixiviación de las formaciones de roca o residuos que se espera que generen drenaje ácido de roca de acuerdo con los resultados de las pruebas de laboratorio previas y los datos del monitoreo recogidos durante las operaciones.
- ◆ Entrega de la descripción del programa aseguramiento y control de calidad (QA/QC) que se completará con todas las pruebas necesarias para garantizar la validez de los datos recogidos.

- ◆ Descripción de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas del proyecto en la fase de cierre, incluyendo la descripción del sistema de manejo de aguas superficiales y subterráneas (filtración) de la mina, los botaderos de desmonte, depósitos de relave y rellenos, y fuentes receptoras de aguas subterráneas y superficiales gradiente abajo.
- ◆ Entrega de una descripción de los procedimientos que se utilizarán para enjuagar las soluciones residuales (por ejemplo, cianuro, ácido, entre otros) en los depósitos de lixiviación.
- ◆ Entrega de datos sobre los sistemas de tratamiento utilizados durante las operaciones o propuestos para su uso después del cierre.
- ◆ Descripción de las actividades que se realizarán para inhibir la generación de drenaje ácido. La descripción debe considerar también la metodología, los materiales o estructuras que serán necesarios y el diseño de las obras; y la calidad de agua esperada aguas abajo de las instalaciones y los impactos potenciales en los usuarios de dichas aguas después del cierre.
- ◆ Descripción de las actividades que se ejecutarán para tratar el drenaje ácido de mina o cualquier otro lixiviado generado que requiera tratamiento. La descripción también deberá indicar la metodología, los materiales, equipos y estructuras; y el diseño de los procesos, así como la calidad de agua antes y después del tratamiento y el manejo de los residuos generados por el tratamiento (por ejemplo, lodos).
- ◆ Descripción de los programas de monitoreo (incluyendo la ubicación, los parámetros y la frecuencia de monitoreo) que serán implementados para evaluar la eficacia de la rehabilitación/remediación y del tratamiento.
- ◆ Descripción de las instalaciones de tratamiento, teniendo en cuenta:
  - ◇ Descripción de los procesos de tratamiento de aguas residuales, incluyendo un diagrama de flujo del proceso y las ubicaciones de las instalaciones de tratamiento de agua (por ejemplo, instalaciones de control de sedimentos, humedales, áreas de mezcla, entre otras)
  - ◇ Estándares de diseño y tiempo esperado de vida de diseño
  - ◇ Balance hídrico general
  - ◇ Requerimientos operacionales y de mantenimiento
  - ◇ Capacidad de tratamiento (diario o anual) y periodo de utilización
  - ◇ Calidad real y esperada del efluente

- ◆ Instalaciones de manejo de lodos o residuos, teniendo en cuenta:
  - ◇ Índice de producción de lodos o residuos
  - ◇ Características físicas del lodo o residuos (tamaño de partícula, porcentaje de sólidos, entre otras) y características químicas (composición, complejos, estabilidad a largo plazo, entre otras), teniendo en cuenta los requerimientos normativos aplicables; por ejemplo, las pruebas de lixiviación
  - ◇ Certificados de aprobación u otros permisos si estuvieran disponibles o fueran aplicables
  - ◇ Métodos de tratamientos de lodos o residuos en el sitio; por ejemplo, métodos de disposición (dragado, transporte, pozas de contención, pozas de relaves, pozas de arcillas, entre otros) y una descripción de la naturaleza y ubicación de las pozas de sedimentación (tamaño, capacidad, tiempo promedio de retención, tipo de terraplenes).
- ◆ Si los sistemas de tratamiento pasivo (como humedales, cunetas alcalinas o pozas de retención) forman parte del proceso de tratamiento, se debe incluir información sobre los sistemas con una descripción de lo siguiente:
  - ◇ Flujo de diseño, profundidad del agua, tiempo de retención y vida proyectada
  - ◇ Calidad actual/esperada del efluente
  - ◇ Mantenimiento de la cubierta de agua durante periodos de sequía
  - ◇ Un plan de contingencias para garantizar la calidad del efluente en caso de que el desarrollo del sistema de tratamiento pasivo se desvíe de lo esperado

### 2.4.7. Manejo de agua

El titular minero tendrá la obligación de entregar la totalidad de antecedentes que respalden la ejecución de las actividades de cierre comprometidas:

- ◆ Se deben entregar los planos de diseño de las instalaciones del proyecto (con coordenadas UTM) que muestren la disposición final de cada componente una vez que se implemente el plan de estabilización hidrológica, es decir, bermas, estructuras de recolección y transporte de agua, etc. Los planos deben incluir todos los componentes del proyecto.
- ◆ Se deberá realizar el balance de aguas para las instalaciones que tienen el potencial de generar drenaje para determinar la cantidad de años que estarán generando drenaje y con esto establecer el plazo de cierre de la instalación.
- ◆ Para las labores subterráneas, es necesario proporcionar:
  - ◇ Los métodos propuestos (por ejemplo, cubiertas, rellenos, entre otros) para el manejo de agua de mina (por ejemplo, cierre hermético, cierre con drenaje, inundación de galerías subterráneas)

- ◆ Para los tajos abiertos, es necesario proporcionar:
  - ◆ Una descripción de las medidas propuestas para el manejo del drenaje y la protección contra la erosión; por ejemplo, métodos de análisis, ensayos y caracterización de materiales
  
- ◆ Para las instalaciones de manejo de relaves, es necesario proporcionar:
  - ◆ El rediseño o las mejoras propuestas en las instalaciones de transporte de agua para el manejo de flujos de agua de lluvias con periodos de retorno de largo plazo
  - ◆ La naturaleza y el fundamento del diseño (por ejemplo, la altura de las olas o velocidad de flujo) para la protección frente a la erosión en los taludes de los depósitos o en las instalaciones de transporte de agua
  
- ◆ Para los botaderos de desmonte, es necesario proporcionar:
  - ◆ La descripción de las medidas adoptadas o propuestas para prevenir la erosión por drenaje de agua de los botaderos de desmonte, como la construcción de aliviaderos
  
- ◆ Para las pilas de sobrecapa, es necesario proporcionar:
  - ◆ La descripción de las medidas adoptadas o propuestas para prevenir la erosión de las pilas de sobrecapa, como la construcción de vertederos
  
- ◆ Para las plataformas de lixiviación, es necesario proporcionar:
  - ◆ La descripción de medidas adoptadas o propuestas para prevenir la erosión proveniente de las pilas de lixiviación de mineral, como la construcción de aliviaderos
  
- ◆ Para otras instalaciones de manejo de agua (por ejemplo, canales, túneles, canales de derivación, aliviaderos), es necesario proporcionar:
  - ◆ La descripción de las medidas adoptadas para garantizar que estas obras resistirán la tormenta de diseño en el escenario de cierre



## 2.4.8. Establecimiento de la forma del terreno y rehabilitación de hábitats

- ◆ Entrega de planos detallados (a escala 1:5000 o mayor, con coordenadas UTM) del cierre de la mina, que muestren:
  - ◆ Tipos de relieve (después de la rehabilitación)
  - ◆ Plan de drenaje
  - ◆ Clasificación de la vegetación
  - ◆ Detalles de las secciones transversales de cada tipo de relieve
  
- ◆ Planos que muestren todas las instalaciones relacionadas con la mina; por ejemplo, tajos abiertos, tajos rellenados, galerías subterráneas y bocaminas, áreas de almacenamiento de desmonte y relaves, áreas de relleno sanitario y humedales construidos
  
- ◆ Proporcionar información detallada sobre:
  - ◆ Usos de la tierra deseados después del cierre
  - ◆ Restricciones referentes al uso de las tierras
  - ◆ Caracterización geotécnica o geomecánica de los materiales
  - ◆ Composición y caracterización química de los materiales de utilizados para el recontorneo
  - ◆ Actividades mineras y fechas de trabajos para cada tipo de relieve
  - ◆ Propiedades de los materiales de cada tipo de relieve
  - ◆ Actividades y fechas de rehabilitación/recuperación
  - ◆ Métodos nuevos o propuestos de rehabilitación/recuperación a ser utilizados
  - ◆ Propiedades físicas de los relieves esperados; por ejemplo, dimensiones o topografía
  - ◆ Medida en que estas propiedades físicas representan relieves naturales análogos
  - ◆ Medidas para conservar la estabilidad de estos relieves
  - ◆ Medidas para garantizar la salud y seguridad públicas
  - ◆ Medidas para prevenir las descargas catastróficas, por ejemplo, de relaves
  - ◆ Medidas para crear los relieves finales como parte de la secuencia minera; por ejemplo, evitar la excesiva manipulación de los materiales
  - ◆ Requerimientos de corte y relleno
  - ◆ Desbroce y manejo del suelo, almacenamiento y sustitución final de la cobertura de suelo
  - ◆ Capacidad de uso de los suelos luego de la rehabilitación
  - ◆ Medidas para prevenir la erosión
  - ◆ Medidas para controlar la descarga de agua superficial y las filtraciones; por ejemplo, la reconstitución de drenajes, construcción de pozas/humedales de atenuación

- ◆ Composición química y volúmenes esperados de descarga de agua superficial
- ◆ Evaluación del rendimiento del plan
- ◆ Identificación de las actividades de investigación que se requerirán para obtener información sobre los procedimientos que no se conocen o que no han sido probados

### 2.4.9. Revegetación

- ◆ Entre los detalles de los programas de revegetación en la mina, se deben considerar el área de superficie total que requiere revegetación; los requerimientos de cobertura de suelo; los requerimientos del suelo como materia orgánica, fertilizantes y micronutrientes; la selección de especies para revegetación; la densidad de siembra y plantación; y el monitoreo y mantenimiento. Se deberán establecer estos programas para las instalaciones de procesamiento, instalaciones de manejo de residuos, instalaciones de manejo de agua, áreas de alojamiento de los trabajadores y otras instalaciones relacionadas con la mina.
- ◆ Entrega de planos detallados de clasificación de la vegetación (a escala 1:5000 o mayor, con coordenadas UTM) de la mina al cierre.
- ◆ Proporcionar información detallada sobre:
  - ◆ Ecosistemas que serán restablecidos para cada tipo de relieve
  - ◆ Especies vegetales que se utilizarán durante la rehabilitación/recuperación, priorizando el uso de especies nativas
  - ◆ Métodos de reserva y recolección de semillas en el área de desarrollo antes de la alteración del terreno
  - ◆ Pruebas de crecimiento de las especies potenciales; por ejemplo, las diferentes técnicas de mantenimiento, los diferentes sustratos, los pendientes, entre otros
  - ◆ Uso de invernaderos locales o invernaderos especialmente construidos para abastecer al proyecto
  - ◆ Cantidad de plántones o semilla (por especie) que se requieren para abastecer el proyecto
  - ◆ Manera en que los ecosistemas rehabilitados simulan a los ecosistemas naturales existentes previos a la alteración del terreno
  - ◆ Productividad esperada de estos ecosistemas
  - ◆ Diseño de ecosistemas de modo que no requieran mantenimiento y sean autosostenibles
  - ◆ Evaluación del desarrollo del plan
  - ◆ Identificación de las actividades de investigación que se requerirán para obtener información o evaluar procedimientos poco conocidos o que no hayan sido probados anteriormente

La revegetación deberá estar basada en estudios que sustenten el adecuado desarrollo y permanencia de las medidas de revegetación en el largo plazo.

### 2.4.10. Rehabilitación de hábitats acuáticos

Entre los detalles de los programas de rehabilitación de hábitats acuáticos para cuerpos de agua, se debe considerar el área de superficie total que requiere rehabilitación de hábitats acuáticos, los requerimientos de limpieza de sedimentos o dragado, y la selección de especies de flora (vegetación ribereña) y fauna acuática (peces y vertebrados acuáticos) que serán restauradas en el hábitat acuático identificado, poniendo énfasis en especies nativas. El sedimento de fondo se debe caracterizar para restablecer las condiciones previas. En caso de que se necesite retirar grandes cantidades de sedimentos de fondo (es necesario considerar previamente las técnicas de limpieza de sedimentos), este programa incluirá el manejo y la disposición de residuos.

Se deben establecer los siguientes programas y técnicas relacionadas con ambientes acuáticos:

- ◆ Programa de revegetación ribereña: A continuación, se presentan algunas pautas generales para el manejo de áreas ribereñas a fin de minimizar los impactos de degradación de especies y ecosistemas acuáticos nativos:
  - ◆ El manejo de áreas ribereñas para conservar la salud de la vegetación nativa existente, la promoción de la recuperación de árboles y arbustos jóvenes, y el manejo de las hierbas malas.
  - ◆ Las áreas con poca vegetación o sin vegetación deberán ser rehabilitadas por regeneración natural o replantación.
  - ◆ El control del acceso constituye probablemente el aspecto más importante para el manejo de la vegetación ribereña en las áreas rurales. Esto puede involucrar limitar el acceso a ciertas áreas o proporcionar puntos alternos de riego.
  - ◆ De preferencia la vegetación a ser utilizada debe ser nativa.
- ◆ Restauración de las estructuras de hábitats previamente encontrados en el área afectada por las actividades mineras:
  - ◆ Adición de estructuras de hábitats (por ejemplo, troncos, cantos rodados, vertederos) en los arroyos
  - ◆ Restauración de humedales y flujos
  - ◆ Restauración del régimen de crecida natural
  - ◆ Reconexión de hábitats aislados como humedales, lagunas, retiro de diques
  - ◆ Rehabilitación de llanuras inundables; por ejemplo, retiro de diques, restauración de las trayectorias de los flujos que hayan sido alterados

- ◆ Rehabilitación de caminos (como aquellos que cruzan o están cerca de los cuerpos de agua):
  - ◆ Retiro o abandono
  - ◆ Reparación de la superficie
  - ◆ Estabilización
  - ◆ Adición o retiro de alcantarillas
  
- ◆ Mejoramiento de hábitats lacustres:
  - ◆ Ubicación de troncos y arbustos
  - ◆ Arrecifes artificiales
  - ◆ Adición de gravas para el desove de peces
  
- ◆ Enriquecimiento de nutrientes y otras técnicas:
  - ◆ Adición de nutrientes orgánicos e inorgánicos
  - ◆ Retiro de arbustos
  - ◆ Protección de riberas

### **2.4.11. Programas sociales**

- ◆ Definir el nivel en el que los objetivos de los componentes sociales del plan de cierre serán alcanzados mediante medidas de mitigación social o desarrollo de la comunidad, y de qué manera incorporan los temas de cierre.
  
- ◆ Describir los impactos sociales y económicos relacionados con el cierre en base al análisis de las condiciones actuales del área del proyecto.
  
- ◆ Incluir una descripción de todas las tendencias sociales y económicas importantes, como los índices de crecimiento económico, los cambios en las tasas de empleo, la inflación, los desplazamientos demográficos o cambios en los índices de pobreza, la educación o salud que hayan ocurrido desde el desarrollo inicial del proyecto y que pueden ser revertidos al momento del cierre.
  
- ◆ Cuantificar la dependencia económica y social de las comunidades directamente afectadas por la mina, incluyendo el sustento y los porcentajes de actividad económica total derivados directa o indirectamente de la mina, el uso de infraestructura física y social y los servicios que la mina proporciona a la comunidad, los ingresos financieros de los gobiernos locales directamente relacionados con la presencia de la mina, entre otros.
  
- ◆ Cuantificar las oportunidades de empleo que estarán disponibles para las comunidades, originadas por las actividades de mantenimiento y monitoreo durante el cierre y el poscierre.

- ◆ Describir los pagos y beneficios de liquidación que serán otorgados a los trabajadores de la mina, y las condiciones en las que serán otorgados.
- ◆ Cuantificar la capacitación y recapacitación que se ofrecerá a las personas cuyo medio de vida depende total o en gran porcentaje de las operaciones de la mina (por ejemplo, los programas de reconversión laboral), demostrando que la capacitación está relacionada con las aspiraciones de los trabajadores es apropiada para los requerimientos laborales del mercado e incluye habilidades asociadas con la vida diaria, como aquellas requeridas para su reinserción laboral o habilidades para la administración de pequeños negocios.
- ◆ Detallar y cuantificar las iniciativas de apoyo con empleos alternativos, tanto a los empleados de la mina como a los contratistas y sus empleados; por ejemplo, proporcionar información acerca de empleos disponibles en otras ubicaciones, asistencia para la reubicación, entre otras.
- ◆ Describir el uso o los usos de tierras y las actividades económicas que estarán disponibles al momento del cierre.
- ◆ Describir la situación actual de la titulación de tierras incluyendo los derechos de superficie y subsuelo y el programa para transferir los derechos de propiedad de la mina, e identificar a quienes les correspondan.
- ◆ Identificar los medios para la transferencia de la administración y el financiamiento de la infraestructura física y servicios sociales proporcionados por la mina que continuarán después del cierre por ser de valor para las comunidades.
- ◆ Identificar los medios para entregar la administración y el financiamiento de iniciativas de desarrollo proporcionados por la mina a las comunidades o gobiernos locales.
- ◆ Describir las instalaciones de la mina que serán transferidas a las comunidades o gobiernos locales y los medios para la administración de dichas instalaciones, incluyendo los nombres de los responsables de su administración y la documentación que sustente el uso futuro de las instalaciones por parte de la comunidad o los gobiernos local, regional o nacional, de acuerdo con lo señalado en el artículo 18 del reglamento.
- ◆ Describir la forma en que todas las iniciativas mencionadas anteriormente u otras adicionales contribuirán a los ingresos financieros directos de las comunidades (mediante generación de ingresos, tributación, entre otras) y, por lo tanto, ayudarán a mitigar la pérdida del ingreso local y el ingreso del gobierno generado por la mina.
- ◆ Para los puntos anteriores, garantizar que se incluyan objetivos cuantificables para cada actividad; por ejemplo, el número de trabajadores que serán entrenados o el valor de mercados alternativos para negocios locales, de modo que se pueda medir el rendimiento contra los objetivos.

- ◆ Proporcionar un cronograma que incluya funciones y responsabilidades, hitos y procedimientos de reporte para los componentes sociales del plan de cierre.
- ◆ Identificar las decisiones respecto a las actividades de cierre —es decir, clausura, recuperación, revegetación, entre otras— que contribuyan al logro de los objetivos sociales y económicos en el planeamiento de cierre.



## 2.5. Actividades poscierre<sup>7</sup>

Concluido el cierre de las áreas, labores e instalaciones utilizadas por una unidad minera, el titular de actividad minera debe continuar desarrollando las medidas de tratamiento de efluentes y emisiones, monitoreo, mantenimiento o vigilancia que corresponda, de acuerdo con el plan de cierre de minas aprobado por la autoridad competente. La ejecución de obras de ingeniería y de construcción de infraestructura para la rehabilitación ambiental no están comprendidas en la etapa de poscierre.

La etapa de poscierre estará a cargo y bajo responsabilidad del titular de actividad minera hasta por un plazo no menor de cinco años luego de concluida la ejecución del plan de cierre, siempre que el titular demuestre que —a través de la continuación de las medidas indicadas en el párrafo anterior— se logrará la estabilización física y química de los residuos o componentes de dicha unidad, susceptibles de generar impactos ambientales negativos. En cuyo caso, se detraerá de las garantías un monto a valor presente correspondiente al tiempo de poscierre adicional proyectado que sea necesario o a perpetuidad según se requiera, a efectos de que el Estado, directamente o a través de terceros, se encargue de mantener las medidas de poscierre establecidas. Los montos restantes de la garantía serán devueltos al titular.

---

<sup>7</sup> Basado en el artículo 31 del Reglamento para el Cierre de Minas (Decreto Supremo N.º 033-2005-EM).

# III. SUPERVISIÓN AMBIENTAL

El OEFA es la entidad competente que asegura el cumplimiento de todos los compromisos y obligaciones asumidos por el titular minero en el plan de cierre. En lo que respecta a la parte técnica, este organismo tiene la responsabilidad de supervisar la ejecución del contenido del plan a nivel de la ingeniería de detalle.

También, está facultado para —en el marco de sus funciones de fiscalización y supervisión— obligar al titular minero a modificar el plan de cierre en caso de que se advierta un desfase significativo entre el presupuesto aprobado y los montos ejecutados que efectivamente se estén registrando o se prevea ejecutar; o, en caso de que se produzcan mejoras tecnológicas, modificaciones en el estudio o cualquier otro cambio que varíe significativamente las circunstancias en las que se aprobó el expediente o se llevó a cabo la última modificación o actualización.

Cabe precisar que se cuenta con dos cuadros de tipificación de infracciones y escalas de sanciones plenamente establecidas: uno aprobado a través del Decreto Supremo N.º 007-2012-MINAM y otro aprobado mediante la Resolución de Consejo Directivo N.º 043-2015-OEFA/CD. El primero de ellos solo se aplica en caso de que los supuestos de hecho no estén previstos en la nueva tipificación.

En la Resolución de Consejo Directivo N.º 043-2015-OEFA/CD, se prescribe una novedad al clasificar la infracción de “No presentar el plan de cierre de minas en el modo, forma y plazo establecido por la normatividad vigente” en los siguientes subtipos de infracciones:

- ◆ Si la conducta genera daño potencial a la flora o fauna, será calificada como grave y sancionada con una multa de 5 hasta 500 UIT.
- ◆ Si la conducta genera daño potencial a la salud o vida humana, será calificada como grave y sancionada con una multa de 10 hasta 1 000 UIT.
- ◆ Si la conducta genera daño real a la flora o fauna, será calificada como muy grave y sancionada con una multa de 20 hasta 2 000 UIT.
- ◆ Si la conducta genera daño real a la salud o vida humana, será calificada como muy grave y sancionada con una multa de 30 hasta 3 000 UIT.



El procedimiento de supervisión debe ser asignado, planificado, organizado, dirigido, controlado y evaluado por el coordinador de Supervisión, el funcionario que tiene además la responsabilidad de impartir instrucciones, directrices y orientaciones en el marco de los lineamientos institucionales, y la jefatura directa del personal técnico a cargo.

El procedimiento de fiscalización contiene etapas desarrolladas por un supervisor, funcionario cuya responsabilidad es planificar, preparar e investigar las materias programadas o denunciadas, y concluir o resolver respecto de lo investigado o supervisado. Además, con el objeto de organizar la carga de trabajo, el supervisor deberá mensualmente ordenar y secuenciar las comisiones que le sean asignadas, considerando los siguientes aspectos:

- ◆ Prioridad en el inicio de la fase investigativa (programada, urgencia dada por la materia o instrucción de la jefatura, fecha origen, cumplimiento de indicadores de gestión u otro)
- ◆ Tamaño de la empresa minera o materias asociadas a plazo de corrección
- ◆ Ubicación geográfica (ciudad, sector, distancia)
- ◆ Fecha y hora en que se ha estimado se obtendrá mejor resultado
- ◆ Disponibilidad de recursos (movilización, equipo de protección personal, materiales, entre otros)

La supervisión pensando en el cierre se debería realizar desde la etapa de construcción de la instalación o unidad minera. En general los problemas de estabilidad tanto química como física comienzan cuando no se cumple con los criterios de diseño aprobados según los permisos y los estándares de seguridad. Los grandes desastres de instalaciones mineras corresponden a instalaciones que se construyeron sin cumplir los criterios de diseños.

Las presas de relaves son estructuras utilizadas para contener los desechos mineros conocidos como relaves. Si estas estructuras no se diseñan y construyen correctamente según los estándares de ingeniería con controles de calidad adecuados, existe el riesgo de falla del muro, lo que podría resultar en la liberación de grandes cantidades de desechos tóxicos en el ambiente. Esto causa contaminación del agua, afectación a la salud de población y daños ambientales graves, como ocurrió en el desastre de la presa de Fundão en Brasil en el 2015.

Es importante que el equipo de supervisión establezca un programa detallado de supervisión desde la etapa de construcción de la mina, fase supervisada por Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin). Esto asegurará que se cumplan los criterios de diseño, los controles de calidad, la seguridad estructural de la instalación, la prevención de inundaciones o infiltraciones, y protección ambiental y a la salud de las personas.

La historia de la operación de una instalación minera puede influir significativamente en la evaluación de los riesgos y en la determinación de las medidas de cierre de la mina. Además, la historia de la operación minera puede afectar los siguientes aspectos:

- ◆ **Historial de incidentes:** Si una mina tiene un historial de incidentes o accidentes, esto puede indicar la presencia de riesgos operativos o de seguridad que influirán en la estabilidad de la instalación a la etapa de cierre de la mina. Por ejemplo, si ha habido fugas de sustancias químicas o contaminación del agua en el pasado, es probable que se requieran medidas de cierre adicionales para reducir los riesgos a largo plazo del ambiente y a la salud de las personas del área de influencia.
- ◆ **Impactos ambientales pasados:** Las actividades mineras pueden causar impactos ambientales a largo plazo, como la contaminación del suelo, el agua y el aire, así como la degradación del hábitat natural, derrames o infiltraciones. La evaluación de estos impactos pasados puede influir en el número de medidas necesarias para mitigar o revertir los efectos negativos al ambiente y a la salud de las personas del área de influencia.

Por otro lado, cabe destacar que la frecuencia de las inspecciones por parte del ente fiscalizador se realiza de acuerdo con el Plan Anual de Evaluación y Fiscalización Ambiental (Planefa) y, por lo general, las unidades mineras se inspeccionan una vez al año. Sin embargo, como ya se ha mencionado, las inspecciones podrán ser más frecuentes conforme se acerque el final de la vida útil de la mina. Por otro lado, ante la denuncia o advertencia del OEFA de un posible incumplimiento de los compromisos por parte del titular, la entidad fiscalizadora podrá programar las inspecciones especiales que sean necesarias para comprobar y asegurar el debido cumplimiento del instrumento de gestión ambiental aprobado.

## 3.1. Finalidad

La función de supervisión tiene por finalidad verificar el cumplimiento de las obligaciones fiscalizables de los titulares de actividades —cuya supervisión se encuentra a cargo del OEFA y las funciones de fiscalización ambiental a cargo de las EFA— y promover la subsanación voluntaria de los incumplimientos de dichas obligaciones. Esta finalidad se enmarca en un enfoque de cumplimiento normativo, prevención y gestión del riesgo, para garantizar una adecuada protección ambiental.

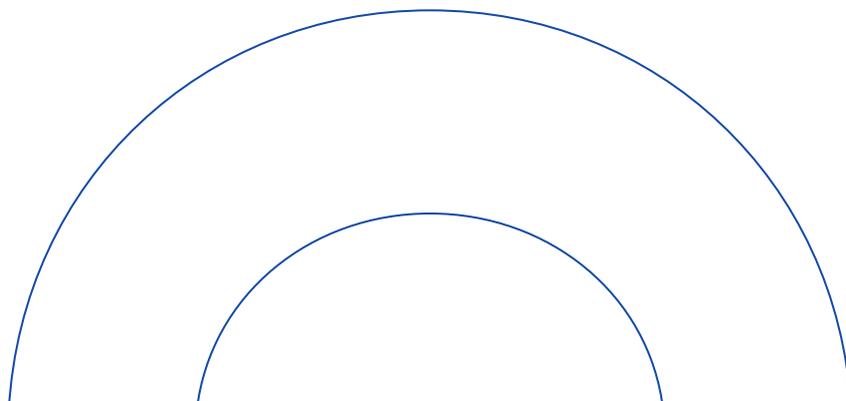
El papel de la supervisión reviste una gran importancia al asegurar el cumplimiento de los planes de cierre de minas en su etapa de cierre final y la fase posterior al cierre. Especialmente en la etapa de cierre progresivo, puesto que las actividades desarrolladas en ese periodo en principio no contemplan en el cálculo de la garantía ambiental, salvo los casos de incumplimiento donde sí son requeridas (artículo 48).

La función de la autoridad fiscalizadora es determinante para garantizar el cumplimiento de los objetivos del plan de cierre de minas, incluso hasta la etapa adicional posterior al cierre. En ese sentido, en la etapa de supervisión, la entidad fiscalizadora también goza de prerrogativas para imponer diversas medidas administrativas: (a) medidas preventivas y (b) requerimientos en el marco del SEIA, cuya finalidad de interés público consiste en proteger el ambiente. Esas medidas forman parte de las obligaciones ambientales fiscalizables de los administrados, y deberán cumplirse en la forma, modo y plazo que la ley prevé.

## 3.2. Planificación de la supervisión

La planificación comprende las siguientes acciones:

- ◆ **Establecer objetivos claros:** Definición clara de los objetivos de la supervisión en relación con la instalación que será objeto de la fiscalización o de las obligaciones fiscalizables del titular minero. Estos podrían incluir garantizar el manejo adecuado de los productos químicos peligrosos, prevenir la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, y minimizar los impactos en el ambiente circundante, entre otros.
- ◆ **Revisar los planes de cierre de la mina:** Revisión específica y exhaustiva de los planes de cierre de la mina, revisión del PEQ y los estudios de respaldo (monitoreos, evaluaciones, entre otros). Además, incluye asegurarse de comprender los procedimientos y medidas de control que deben ser supervisadas para verificar que la medida de cierre es la adecuada y permitirá minimizar los riesgos químicos.
- ◆ **Evaluar los riesgos de estabilidad química:** Evaluación de los riesgos para identificar los posibles impactos ambientales y de salud asociados con el drenaje ácido de mina (DAM), la contaminación de aguas subterráneas o superficiales, la liberación de gases y polvos tóxicos o la movilización de contaminantes. Esto ayudará a priorizar las áreas de enfoque durante la supervisión.
- ◆ **Revisión:** Denuncias respecto a la unidad fiscalizable, procedimientos administrativos sancionadores y las medidas administrativas impuestas por las autoridades competentes, entre otros.



Antes de una supervisión al equipo supervisor, le deberían surgir un gran número de preguntas orientadas al cumplimiento normativo y a los objetivos de la supervisión. Algunos ejemplos de cuestionamientos para el desarrollo de estos criterios pueden ser:

- ◆ ¿Cumple con los parámetros de calidad del agua aceptable para descargar a un curso de agua o a una napa subterránea?, ¿existe un número de muestras suficientes a lo largo del tiempo que pueda determinar la calidad a lo largo de la operación de la mina?
- ◆ ¿La instalación remanente se encuentra estable física y geoquímica?, ¿existe drenaje ácido?
- ◆ ¿Qué tipo y rango de tiempo de precipitaciones se debe considerar para el diseño de los canales de contorno?
- ◆ ¿Los estudios de respaldo consideran los efectos del cambio climático?
- ◆ ¿Cuáles son los principales productos químicos y residuos generados por las operaciones mineras en el sitio?
- ◆ ¿Se han identificado sustancias tóxicas, metales pesados o compuestos reactivos en el área de la mina?
- ◆ ¿Qué medidas se han tomado para controlar y gestionar los residuos químicos generados durante la operación de la mina?
- ◆ ¿Se han implementado barreras físicas o sistemas de contención para evitar la liberación de sustancias químicas peligrosas al ambiente?
- ◆ ¿Se han realizado pruebas de lixiviación o análisis de agua en los cuerpos de agua cercanos para detectar la presencia de contaminantes químicos provenientes de la mina?
- ◆ ¿Existen fuentes de agua subterránea en el área de la mina? Si la respuesta es afirmativa, ¿se han llevado a cabo pruebas de calidad del agua para detectar la contaminación geoquímica?
- ◆ ¿Se han tomado medidas para evitar la generación de gases tóxicos, como el dióxido de azufre o el metano, durante la operación y el cierre de la mina?
- ◆ ¿Se han realizado estudios de modelización para predecir la dispersión de sustancias químicas en el aire y el agua en caso de un accidente o liberación no intencionada?
- ◆ ¿Se han identificado zonas de recarga de acuíferos o áreas sensibles desde el punto de vista ambiental en las cercanías de la mina?
- ◆ ¿Se ha desarrollado un plan de monitoreo a largo plazo para evaluar la estabilidad geoquímica después del cierre de la mina y garantizar que no se produzcan impactos negativos en el ambiente?
- ◆ ¿La evaluación captura las categorías de riesgo importantes para la empresa minera, stakeholders y las partes interesadas?
- ◆ ¿Los miembros del staff de cierre fueron los correctos?, ¿el equipo estaba conformado por las distintas áreas y representaban la combinación necesaria de disciplinas?, ¿participaron conjuntamente en la identificación y ratificación de los riesgos y oportunidades?

- ◆ ¿Se utilizó toda la información relevante disponible para evaluar los riesgos, incluidos los aportes de las partes interesadas externas cuando correspondía?
- ◆ ¿Se han evaluado los posibles riesgos acumulativos?
- ◆ ¿Se ha considerado una evaluación estocástica (probabilística) de los riesgos?
- ◆ ¿Deben refinarse los criterios de éxito o las actividades de cierre en función de la evaluación de riesgos?
- ◆ ¿Son los riesgos residuales compatibles con la cesión o el uso de la tierra posterior a la mina identificado, y todos los interesados comprenden los riesgos residuales?
- ◆ ¿Se han evaluado los riesgos con todos los controles implementados y en caso de que los controles fallen?
- ◆ ¿Se han identificado las estrategias para mitigar las consecuencias de cualquier riesgo posterior al cierre y se están implementando medidas para hacer frente a estas consecuencias?

Estas preguntas son solo una guía y es posible que requieran adaptarse a las circunstancias y requisitos específicos de la mina en cuestión. Además, es recomendable contar con la asesoría de expertos en el campo de la gestión ambiental, hidrogeología, la geoquímica y la geotecnia, para evaluar adecuadamente la estabilidad geoquímica en el cierre de una mina.

Otro dato fundamental para la supervisión es la identificación del mineral que se extrae en la mina objeto de fiscalización; solo con una revisión visual el inspector podría determinar si existe contaminación a un cuerpo de agua cercano. El color del agua contaminada por diferentes metales puede variar, pero aquí se presentan algunas indicaciones generales:

- ◆ **Hierro:** El agua contaminada con hierro puede tener un color amarillento, marrón o rojizo, dependiendo de la concentración y la forma en que está presente el hierro.
- ◆ **Cobre:** El agua contaminada con cobre puede tener un color azul verdoso o azul claro.
- ◆ **Oro y plata:** La contaminación del agua con oro o plata no suele afectar significativamente su color.
- ◆ **Plomo:** El agua contaminada con plomo puede tener un color opaco o grisáceo.
- ◆ **Zinc:** El agua contaminada con zinc puede tener un color azul verdoso o blanquecino, especialmente en concentraciones más altas.
- ◆ **Estaño:** La contaminación del agua con estaño no suele afectar significativamente su color.
- ◆ **Tungsteno:** La contaminación del agua con tungsteno no suele afectar significativamente su color.
- ◆ **Carbón:** El agua contaminada con carbón puede tener un color marrón oscuro o negro, especialmente si contiene partículas suspendidas de carbón.

Es importante tener en cuenta que la presencia de otros compuestos en el agua también puede influir en su color, y las concentraciones de los metales mencionados pueden variar, lo que afectará la intensidad del color observado.

Esta etapa culmina con la elaboración del plan de supervisión.

## 3.3. Ejecución de la supervisión

### 3.3.1. Acción de supervisión *in situ*

La acción de supervisión *in situ* se realiza sin previo aviso, dentro o fuera de la unidad fiscalizable. En determinadas circunstancias y para garantizar la eficacia de la supervisión, la autoridad de supervisión, en un plazo razonable, puede comunicar al titular minero la fecha y hora en que se efectuará la acción de supervisión.

El supervisor debe elaborar un acta de supervisión, en la cual se describirán los hechos verificados en la acción de supervisión *in situ*, así como las incidencias ocurridas durante la acción de supervisión. Al término de la acción de supervisión, el acta de supervisión debe ser suscrita por el supervisor, el titular minero o el personal que participó y, de ser el caso, los observadores, peritos o técnicos. El supervisor debe entregar una copia de este documento al titular minero. En caso de que el titular minero o su personal se niegue a suscribir o recibir el acta de supervisión, esto no enerva su validez, por lo que se debe dejar constancia de ello.

La ausencia del titular minero o su personal en la unidad fiscalizable no impide el desarrollo de la acción de supervisión, por lo que se puede recabar la información y constatar los hechos relacionados con el cumplimiento de las obligaciones fiscalizables y consignarlos en el acta de supervisión que es remitida al titular minero.

Por otro lado, en el supuesto de que no se realice la acción de supervisión por obstaculización del titular minero o su personal, se debe elaborar un acta de supervisión en la que se indique este hecho. Además, en caso no se realice la acción de supervisión por causas ajenas al titular minero, se debe elaborar un acta de supervisión en la que se deje constancia del motivo que impidió la realización.

### 3.3.2. Acción de supervisión en gabinete

La acción de supervisión en gabinete consiste en el acceso y la evaluación de información de las actividades o funciones desarrolladas por el titular minero, a efectos de verificar el cumplimiento de sus obligaciones fiscalizables. En caso la autoridad de supervisión analice información distinta a la presentada por el titular minero supervisado, esta debe ser notificada para que, en el plazo de cinco días hábiles, presente documentación que considere pertinente.

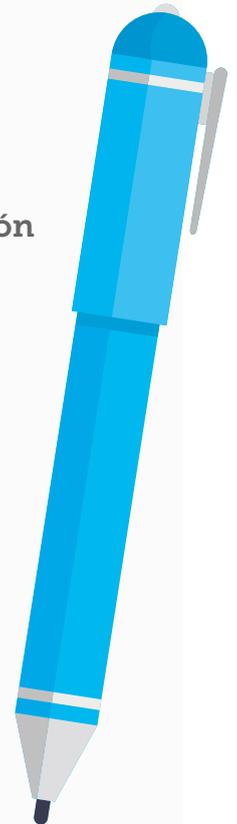
### 3.3.3. Contenido del acta de supervisión

El acta de supervisión debe contener como mínimo:

Oefa

## ACTA DE SUPERVISIÓN

- El nombre o denominación social del titular minero
- El registro único del contribuyente, cuando corresponda
- La identificación de la unidad fiscalizable objeto de supervisión
- La actividad o función desarrollada por el titular minero
- El tipo de supervisión
- La fecha y hora de la acción de supervisión (inicio y cierre)
- Los hechos o funciones verificadas
- Las áreas o los componentes supervisados
- Los medios probatorios
- Los muestreos ambientales efectuados, cuando corresponda
- Las observaciones del titular minero, en caso lo solicite
- El requerimiento de información efectuado y el plazo otorgado para su entrega, de ser el caso
- El nombre, cargo y firma del personal del titular minero, los supervisores a cargo de la acción de supervisión y, de ser el caso, de los otros participantes de la acción de supervisión



El error material contenido en el acta de supervisión no afecta su validez ni de los medios probatorios ni de las muestras recolectadas que se hayan obtenido en dicha acción de supervisión.

### **3.3.4. Notificación de los resultados de los análisis efectuados**

En caso la autoridad de supervisión tome muestras en una acción de supervisión, los resultados deberán ser notificados al titular minero. Si el titular minero hubiere consignado una dirección electrónica, la notificación de los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras tomadas en la supervisión debe efectuarse en el plazo de un día hábil, contado desde el día siguiente de otorgada la conformidad a los informes de ensayo remitidos por el laboratorio.

Si el titular minero no ha autorizado la notificación electrónica, los resultados de los análisis de laboratorio de las muestras tomadas en la supervisión deberán ser notificados a su domicilio dentro de los tres días hábiles, contados desde el día siguiente de otorgada la respectiva conformidad. Al referido plazo se adiciona el correspondiente término de la distancia aplicable a los procesos judiciales.

En caso la autoridad de supervisión tome muestras en una acción de supervisión, el titular minero puede solicitar la dirimencia durante su desarrollo. La dirimencia está sujeta a los plazos, las condiciones y las limitaciones del servicio establecido por el laboratorio de ensayo, de acuerdo con la normativa que rige la acreditación en la prestación de servicios de evaluación de la conformidad, establecidas por el Instituto Nacional de Calidad (Inacal).

## **3.4. Resultados de la supervisión**

### **3.4.1. Evaluación de resultados**

Culminada la ejecución de las acciones de supervisión, se elabora el informe de supervisión que contiene el análisis de la información disponible para determinar la recomendación de inicio del procedimiento administrativo sancionador o el archivo de la supervisión, o las recomendaciones y medidas administrativas a las que hace referencia el artículo 13.

### **3.4.2. Subsanación y clasificación de los incumplimientos**

De conformidad con lo establecido en el literal f) del artículo 257 del Texto Único Ordenado de la Ley N.º 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, aprobado por Decreto Supremo N.º 004-2019-JUS, si el titular minero acredita la subsanación voluntaria del incumplimiento antes del inicio del procedimiento administrativo sancionador, se dispone el archivo del expediente de supervisión en este extremo.

Los requerimientos efectuados por la autoridad de supervisión o el supervisor mediante los cuales disponga una actuación vinculada al incumplimiento de una obligación acarrean la pérdida del carácter voluntario de la subsanación. En el caso de que la subsana-

ción deje de ser voluntaria antes del inicio del procedimiento administrativo sancionador y el incumplimiento califique como leve, la autoridad de supervisión puede disponer el archivo del expediente en este extremo.

Los incumplimientos detectados se clasifican en dos tipos:

- ◆ **Incumplimientos leves:** Son aquellos que involucran (a) un riesgo leve o (b) incumplimientos de una obligación de carácter formal u otra que no cause daño o perjuicio.
- ◆ **Incumplimientos trascendentes:** Son aquellos que involucran (a) un daño a la vida o la salud de las personas; (b) un daño al ecosistema, biodiversidad, la flora o fauna; (c) un riesgo significativo o moderado; o (d) los incumplimientos de una obligación de carácter formal u otra que cause daño o perjuicio.

Para la determinación del riesgo se aplica la “Metodología para la estimación del riesgo ambiental”, que genera el incumplimiento de las obligaciones fiscalizables que el OEFA apruebe.

### 3.4.3. Informe de supervisión

El informe de supervisión contiene como mínimo:

- ◆ Los datos de la supervisión
- ◆ Los antecedentes
- ◆ Los análisis de la supervisión
- ◆ Las conclusiones y recomendaciones
- ◆ Los anexos

El informe de supervisión es notificado al titular minero en caso de archivo o supervisión orientativa, y a otras entidades, cuando corresponda.

# IV. SUPERVISIÓN DE ACTIVIDADES DE ESTABILIDAD GEOQUÍMICA EN LAS ETAPAS DE CIERRE TEMPORAL, CIERRE PROGRESIVO Y CIERRE FINAL

## 4.1. Algunas definiciones relevantes de las infraestructuras que contribuyen a la generación del drenaje de minas

A continuación, se presenta un esquema de cómo debe realizarse la gestión de la estabilidad geoquímica:

- ◆ **Botaderos estéril y baja ley/pilas de lixiviación:** Lugares destinados al depósito de material sea para disposición final, almacenamientos temporales o procesamiento mediante lixiviación por solventes.
- ◆ **Depósitos de relaves o depósitos de relave:** Áreas de disposición final del mineral minado luego de pasar por el proceso de recuperación, por lo que pueden ser relaves espesados, en pasta o filtrados.
- ◆ **Mina tajo abierto y subterránea:** Área de yacimiento minero, que puede ser a cielo abierto o subterráneo que producto de la extracción dejó una exposición de los componentes mineral con oxígeno y otros elementos facilitadores del drenaje minero.

La información relevante debe ser colectada para la evaluación de los impactos y riesgos asociados a estas infraestructuras son:

**Figura 4. Información relevante para la evaluación de impactos y riesgos asociados**



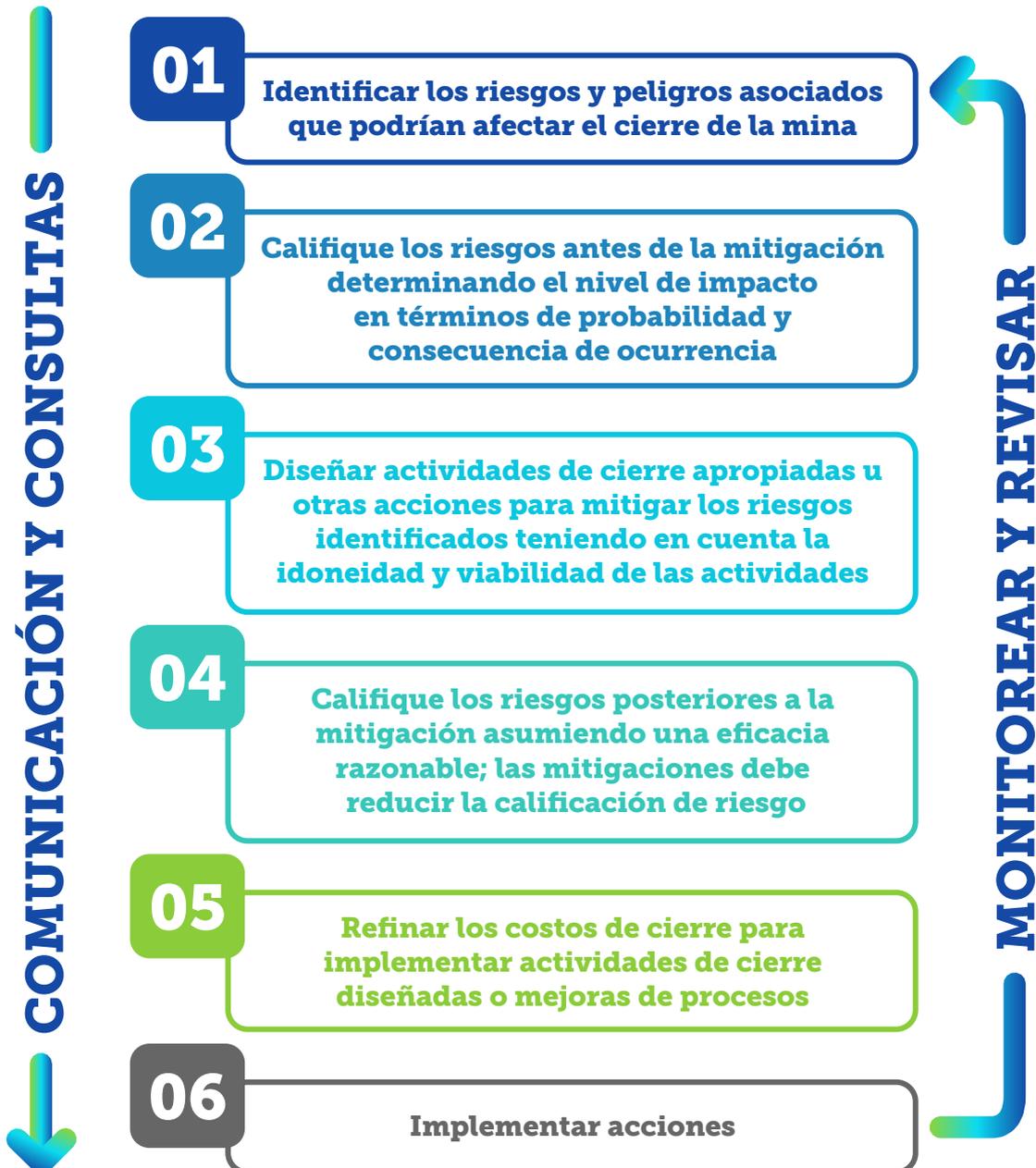
Nota. Elaboración propia

Es importante destacar que existen ciertos parámetros que deben ser estudiados y levantados para conseguir una buena línea base y explicaciones consistentes para la generación de medidas de mitigación adecuadas. Por eso, se reitera que la historia de la mina desde la etapa de construcción corresponde a información relevante al analizar si la medida de cierre propuesta es la adecuada y no requiere de modificaciones o adecuaciones para la supervisión.

Las evaluaciones de riesgos se realizan de forma frecuente en el desarrollo de una mina; para eso, existen herramientas y métodos para la identificación y evaluación de riesgos. El objeto es utilizar estas herramientas para disminuir el riesgo y aumentar las oportunidades. Es fundamental incorporar la evaluación de riesgos en el proceso de cierre, contar con una evaluación de riesgos realizada al inicio del proceso de planificación del cierre y realizar evaluaciones periódicas a medida que avanza la mina. El resultado de los riesgos identificados en la etapa inicial será la base de las actividades que se deberán realizar durante la operación para prevenir y mitigar riesgos.

El proceso de evaluación de riesgos debe llevarse a cabo con regularidad. La Figura identifica los pasos clave que se deben tomar para identificar los riesgos como parte del proceso de planificación del cierre.

Figura 5. Proceso de evaluación de riesgos

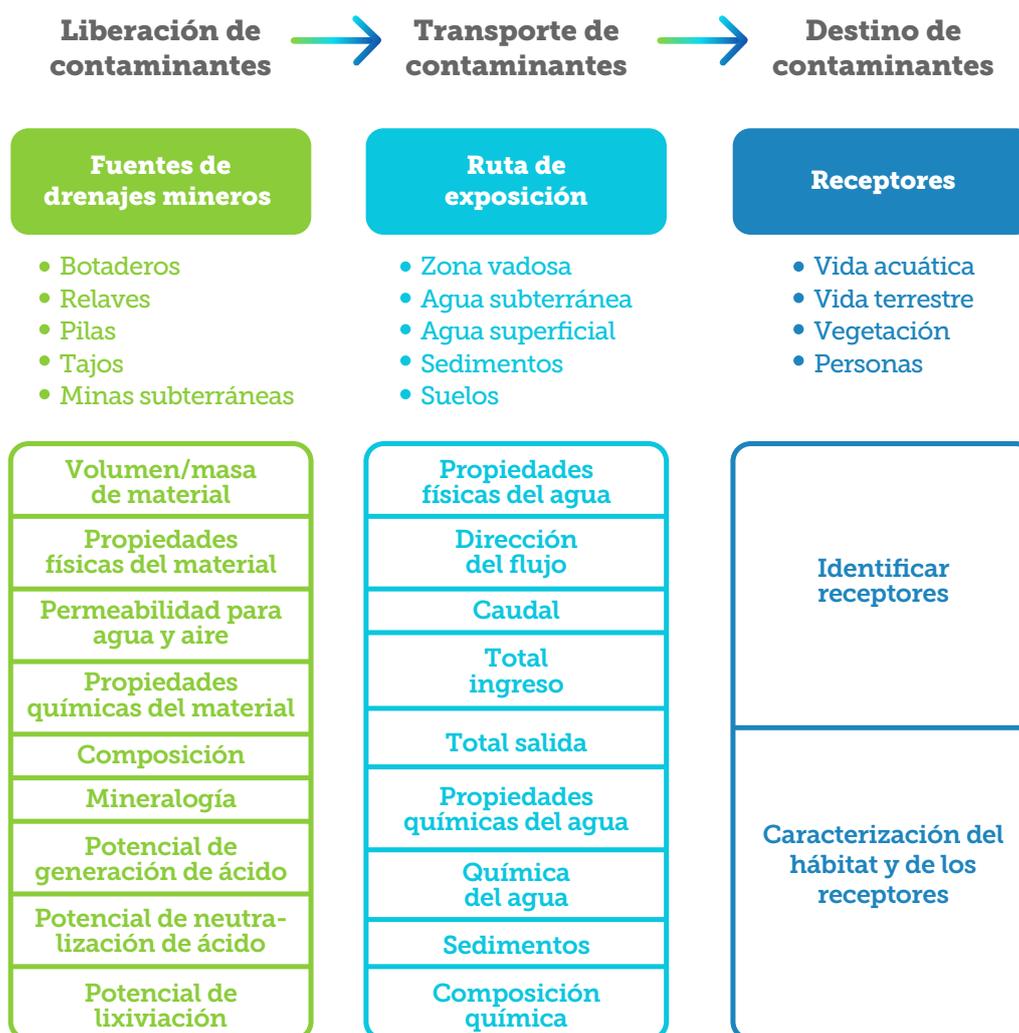


Nota. Modificado de Consejo Internacional de Minería y Metales [ICMM] (2018). *Proceso de evaluación de riesgos: Cierre Integrado de Minas, Guía de Buenas Prácticas (2.ª ed.)*. International Council on Mining & Metals.

Si bien en la supervisión lo que se controla corresponde al paso 6 de la Figura 5, eliminar o no considerar alguna de las cinco etapas anteriores podría llevar a cometer errores en la supervisión; en el cierre de una instalación minera, no se pueden separar las etapas. Una mina corresponde a un conjunto de instalaciones que funcionan en conjunto y que son parte de un proceso, sin duda el tipo de mineralización que existe en el yacimiento podría hacer la diferencia entre generar o no drenaje ácido y esto afectará al total de instalaciones potenciales de generar DM. Una nueva revisión de los antecedentes podría identificar errores que no fueron abordados en la evaluación inicial, lo que reduciría riesgos para el Estado.

A nivel internacional existe un gran número de metodologías para determinar una evaluación de riesgos para el cierre de una mina, que presentan algunas diferencias, pero comparten el mismo procedimiento general (figura 5). Para la representación gráfica de estos factores, se utilizan a menudo modelos conceptuales. En la siguiente figura anterior, se presenta un modelo conceptual simplificado a modo de ejemplo y en la siguiente se presenta un esquema simplificado de cómo debe ser estudiada la estabilidad geoquímica.

Figura 6. Modelo conceptual simplificado



Nota. Tomado de Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [Sernagiomín] (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.* [Sernagiomín].

## 4.1.1 Exploración

En esta etapa es necesario realizar todo el levantamiento físico-químico, el cual será la información clave del proceso de EQ en esta etapa, dado que aquí se sentarán las bases para el conocimiento físico-químico de las futuras infraestructuras que darán lugar al futuro emprendimiento minero que posteriormente dará lugar a una operación.

Cabe resaltar que es necesario conocer que en esta etapa temprana una descripción detallada de los recursos minerales que serán explotados posteriormente se hace extremadamente necesaria, considerando algunas disciplinas claves como la geología, la hidrología, la hidrogeología, la climatología y la caracterización geoquímica de los elementos que serán extraídos y depositados en forma de estéril o relaves.

### 4.1.1.1 Descripción del medio físico

- ◆ **Geología:** El análisis de las características geológicas del área de estudio —incluyendo el yacimiento y los materiales que conforman o formarán parte de una posible fuente de drenaje minero, así como la región donde se encuentran— es crucial en esta fase. Tanto la capacidad de generar drenaje minero como su calidad varían según las características geológicas de los materiales.

Es esencial estudiar e interpretar la geología regional, local y del propio yacimiento como complemento a la descripción mineralógica a nivel de muestra de la instalación. Esto ayuda a entender la naturaleza del material y su relación con la generación de drenaje minero. Se deben considerar detalladamente la mineralogía del área (litología, alteración y mineralización) y los materiales, y su geoquímica, la cual afecta directamente la calidad del drenaje y el grado de meteorización.

Específicamente, se debe analizar la cantidad y la mineralogía de los sulfuros presentes, ya que influyen directamente en la generación de ácido en un entorno determinado. También, se debe evaluar la disponibilidad, mineralogía y capacidad de neutralización de minerales como carbonatos, silicatos y aluminosilicatos, así como el tipo y grado de alteración de la roca y los productos de esta alteración, especialmente la formación de minerales secundarios que, según su solubilidad, pueden aumentar o disminuir las tasas de migración de los contaminantes.

- ◆ **Climatología:** El clima ejerce una gran influencia en la generación de drenaje minero, lo que afecta directamente aspectos como el grado de meteorización del material, la dispersión del lixiviado, la variación estacional en la química del drenaje y la concentración de elementos, entre otros aspectos relevantes.

Al describir el clima en relación con el drenaje minero, es crucial considerar varios factores principales. Estos incluyen precipitación en términos de su tipo (líquida o sólida), cantidad y distribución temporal, y la temperatura que abarca la amplitud

térmica diaria. La interpretación de estos factores ayuda a estimar la cantidad y distribución estacional de las recargas en una cuenca hidrográfica. Además, los estudios sobre la dirección y la velocidad del viento son importantes, ya que respaldan las medidas de control y mitigación asociadas al transporte de material particulado.

- ◆ **Hidrología e hidrogeología:** El análisis de la hidrología e hidrogeología del área donde se encuentra la mina o la instalación minera es fundamental para comprender la interacción entre el entorno y las potenciales fuentes de drenaje minero, según el modelo conceptual y numérico establecido para cada instalación.

Un modelo conceptual numérico-hidrológico-hidrogeológico es una representación simplificada que describe las características físicas y dinámicas de un acuífero o sistema de acuíferos. Este modelo abarca aspectos como la estratigrafía, la geometría del acuífero, las zonas de recarga y descarga, las propiedades hidráulicas de los materiales como la permeabilidad y la porosidad, y las interacciones entre aguas superficiales y subterráneas.

Su objetivo principal es comprender cómo se desplaza el agua a través del subsuelo y cómo interactúa con el entorno geológico. Es recomendable desarrollar modelos conceptuales, incluso en etapas previas al inicio de las operaciones mineras. Estos modelos deben actualizarse con nueva información de campo obtenida mediante exploraciones, sondeos y pruebas hidráulicas.

Los modelos conceptuales/numéricos pueden ser utilizados de manera predictiva durante la operación minera para confirmar impactos y causalidades. Se basan en datos recopilados en el campo, como mediciones de niveles de agua subterránea, pruebas de bombeo y estudios geológicos y químicos del agua. Estos datos se utilizan para crear un marco conceptual que explique los procesos hidrogeológicos en el área de estudio y sirva de base para desarrollar modelos numéricos más detallados.

La caracterización hidrológica identifica todos los recursos hídricos y puntos de descarga, evaluando caudal, calidad del agua, dirección de flujo y fluctuaciones estacionales. Esto determina la frecuencia de monitoreo de estos parámetros y la importancia de evaluar tanto el caudal como la concentración de elementos para establecer la carga geoquímica asociada.

La caracterización hidrogeológica detecta la presencia de agua subterránea, tipos de acuíferos, velocidad y dirección de flujo, calidad del agua, áreas de recarga y descarga, profundidad del nivel freático y posible conexión con aguas superficiales.

A continuación, la Tabla 1 resume las variables fundamentales para tener en cuenta al describir el entorno físico, junto a las herramientas y metodologías recomendadas para su análisis:

**Tabla 1. Principales variables y herramientas para la descripción del medio físico**

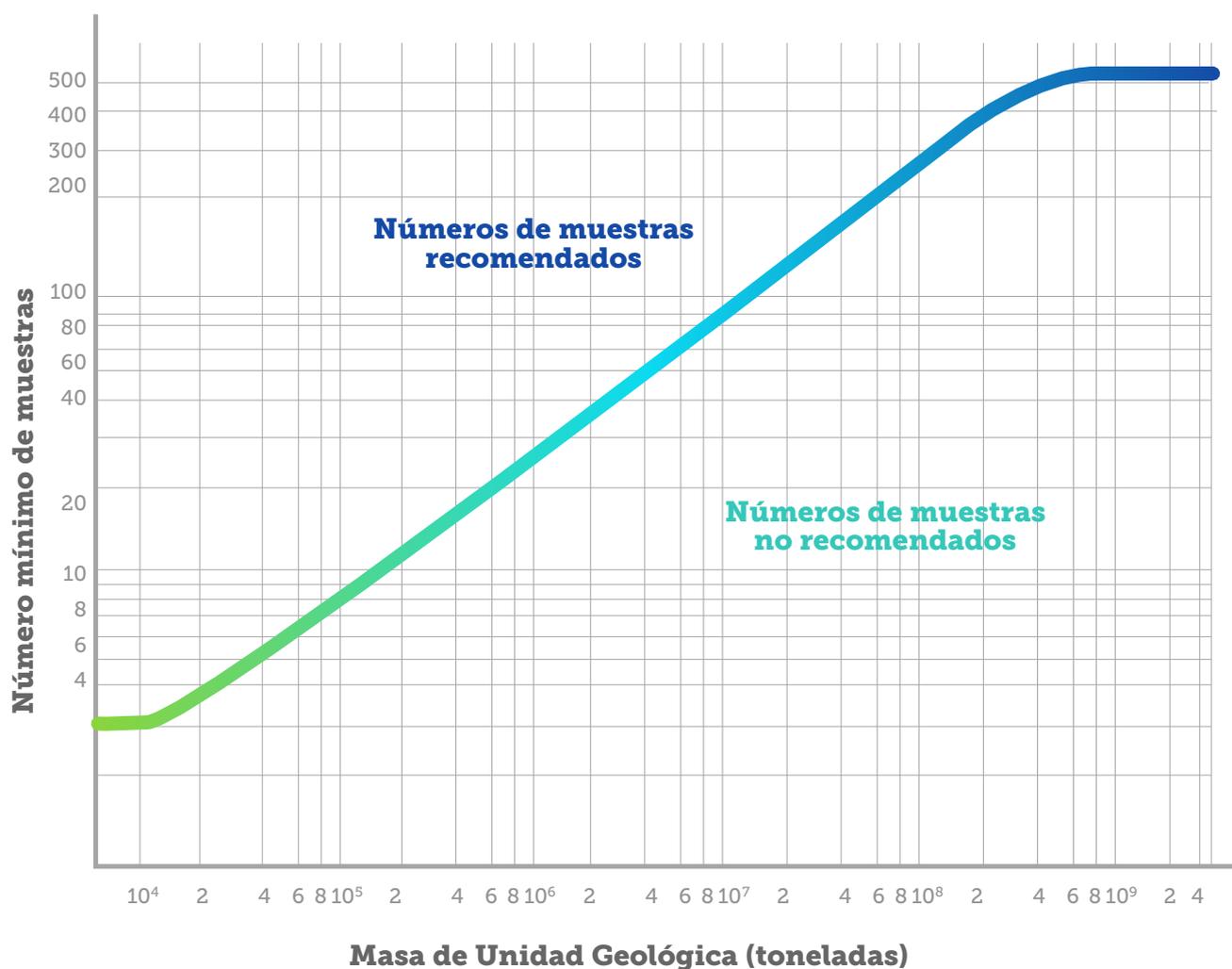
Descripción del medio físico	Principales variables	Principales herramientas
<b>Geología</b>	Estudio e interpretación de la geología regional y local	Mapas topográficos, geológicos Reconocimiento del terreno, análisis mineralógicos, fisicoquímicos y químicos
	Muestreo y análisis de muestras geológicas, suelo y sedimento	Sistemas de información geográfica (SIG) Modelos digitales de elevación (MDE)
<b>Clima</b>	Tipo, cantidad y distribución temporal de la precipitación	Estaciones meteorológicas <i>in situ</i> y adyacentes al proyecto
	Registro de temperaturas diarias y amplitud térmica	
	Estimación de la cantidad y distribución estacional de las recargas en la cuenca hidrográfica	Gestión de la información meteorológica
	Otros: Estimación de los periodos de sequía, evapotranspiración, condiciones eólicas, profundidad de congelamiento	
<b>Hidrología/ hidrogeología</b>	Delimitación de la cuenca hidrográfica	Mapas topográficos, reconocimiento del terreno, interpretación geológica, sistemas de información geográfica (SIG) o modelos digitales de elevación (MDE)
	Identificación de las áreas de recarga / descarga	
	Caracterización hidrológica	Perforaciones, métodos geofísicos e interpretación de la información geológica para detectar la presencia de la masa de agua y su tipología (acuífero, acuitardo, entre otras)
	Caracterización hidrogeológica	Medición de los niveles del agua (niveles piezométricos) subterránea para determinar la dirección de flujo
	Identificación de direcciones de flujo	Ensayos de laboratorio o estimaciones con valores tabulados (Freeze y Cherry, 1979) para determinar la porosidad y otros parámetros hidráulicos de interés
	Identificación del nivel freático	
	Caracterización hidro(geo)química	Muestreo y análisis de laboratorio para determinar la calidad química del agua

*Nota.* Tomado de Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.*

Como es sabido la caracterización geoquímica de los elementos es fundamental para conocer la existencia de drenaje minero en el futuro o no. Por lo tanto, una buena caracterización, tanto de las unidades geológicas como de los relaves existentes, es fundamental para dimensionar una buena campaña de muestras necesarias para realizar los estudios necesarios y definir las medidas de mitigación que serán aplicadas en el futuro.

Para la caracterización de unidades geológicas y estimación de número de muestras a ser analizadas para la caracterización geoquímica, se recomienda la regla de modificación de Steffen et al.(1989). A continuación, se presenta la figura que define el número de muestras por toneladas de unidad geológica presentes en el depósito.

Gráfico 1. Número de muestras en base a la masa de cada unidad geológica



Nota. Tomado de Steffen, Robertson and Kirsten (1989). *Hypothetical curve to determine the number of samples required to characterise geological units.*

Esta representa el número de muestras mínimo por material presente a ser minado del depósito. Como se está hablando de unidades (alteración, litología, mineralización) para lo que representa el muestreo geoquímico, se deberían medir, a través del modelo de bloques, las masas existentes en el yacimiento. Luego, en función de eso, por el número de toneladas, se debe definir el número mínimo de muestras geoespacialmente representativas de un depósito. Además, también como método alternativo, se puede considerar la siguiente regla de modificación de Price y Errington (1994), que se basa en el mismo concepto anteriormente mencionado y es presentada en la tabla siguiente:

**Tabla 2. Regla de modificación de Price y Errington**

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

*Nota.* Elaboración propia.

Solamente como ejemplo para la realización de una caracterización de toma de muestras de materiales con potencialidad de generación de inestabilidad química se puede definir que, si un botadero tiene 50 000 000 toneladas, se debería por lo menos tomar una cantidad mínima de 400 muestras de material depositado. Es importante mencionar que toda metodología de muestreo puede ser aplicada y utilizada siempre y cuando esta cumpla los estándares de representatividad de los parámetros de interés y consiga realizar una caracterización del espacio muestral de la vecindad que se quiere entender y analizar.

Cuando se habla de materiales, coberturas o muestras que son homogéneos e isotrópicos, se puede reducir considerablemente el número de muestras representativas.

## 4.1.2 Mina

Con relación a este punto explícitamente de exploración y, en algunos casos, de instalaciones remanentes ya implantadas, las informaciones que deben ser verificadas por los supervisores son las siguientes:

### 4.1.2.1. Modelos geológicos con caracterización de unidades LAM (litología-alteración-mineralización)

Antes de comenzar, se debe definir qué es un modelo geológico; un modelo de bloques geológico corresponde a una representación tridimensional de la estructura geológica de una zona específica. Se basa en datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para mostrar la disposición y relación de diferentes tipos de rocas y estructuras geológicas, como fallas, capas y cuerpos minerales. Este modelo es esencial para entender la geología de un área, y es especialmente útil en la exploración y explotación de recursos naturales como minerales, petróleo y gas. En la creación de un modelo de bloques geológico, los geólogos y geofísicos interpretan datos de diversas fuentes, como el mapeo geológico de superficie, los sondeos, los muestreos y estudios geofísicos. Luego, utilizando un software especializado, integra esta información para construir un modelo 3D. Este modelo ayuda a visualizar y analizar la estructura geológica subterránea, lo que facilita decisiones importantes en áreas como la minería, la ingeniería y la gestión de recursos naturales.

La construcción de un modelo geológico de bloques utilizando unidades LAM (litología, alteración y mineralización) implica varios pasos detallados y requiere la integración de datos geológicos y geofísicos precisos. A continuación, se describe un proceso general para construir tal modelo:

- ◆ **Recolección de datos**
  - ◆ **Litología:** Se recolectan datos sobre los tipos de rocas presentes en el área de estudio. Esto incluye su composición, textura, y estructura.
  - ◆ **Alteración:** Se identifican y registran las alteraciones de las rocas, es decir, cambios en la composición mineral, debido a procesos geológicos como la meteorización o la actividad hidrotermal.
  - ◆ **Mineralización:** Se recopila información sobre la presencia y distribución de minerales económicamente valiosos, como oro, cobre, plomo, entre otros.

- ◆ Mapeo geológico y muestreo
  - ◆ Realizar un mapeo geológico detallado en el campo para identificar y mapear las unidades litológicas, zonas de alteración y mineralización
  - ◆ Tomar muestras de roca y suelo para análisis químicos y mineralógicos
- ◆ Estudios geofísicos y geoquímicos
  - ◆ Llevar a cabo estudios geofísicos (como magnetometría, gravimetría o sismografía) para entender la estructura subterránea
  - ◆ Analizar los datos geoquímicos para determinar la concentración de elementos y su distribución espacial
- ◆ Análisis de sondeos y perforaciones
  - ◆ Integrar datos de sondeos y perforaciones, que proporcionan información precisa sobre la litología, alteración y mineralización en profundidad
- ◆ Modelado 3D con *software* especializado
  - ◆ Utilizar un *software* de modelado geológico para integrar todos los datos recolectados
  - ◆ Crear un modelo de bloques en 3D que represente las unidades LAM en el subsuelo
- ◆ Interpretación y validación
  - ◆ Interpretar el modelo para entender la distribución y relación entre las diferentes unidades LAM
  - ◆ Validar el modelo con datos adicionales de campo o perforaciones para asegurar su precisión
- ◆ Actualización y refinamiento continuo
  - ◆ A medida que se disponga de nuevos datos, actualizar y refinar el modelo para mejorar su precisión y utilidad

El modelo resultante es una poderosa herramienta para la exploración de recursos minerales, la planificación de la minería y la comprensión de la geología de un área de manera integral. Es importante destacar que la calidad del modelo depende en gran medida de la precisión y la cantidad de los datos de entrada, así como de la experiencia y habilidades del equipo que construye el modelo.

#### 4.1.2.2. Muestreo geoquímico de las unidades LAM con los siguientes análisis

Los ensayos geoquímicos, ya sean estáticos o cinéticos, son utilizados en el campo de la geología y la minería para evaluar las propiedades químicas de las rocas y minerales. Cada tipo de ensayo ofrece información crucial para entender cómo se comportarán estos materiales bajo ciertas condiciones ambientales y durante la explotación de recursos:

La construcción de un modelo geológico de bloques utilizando unidades LAM (litología, alteración y mineralización) implica varios pasos detallados y requiere la integración de datos geológicos y geofísicos precisos. A continuación, se describe un proceso general para construir tal modelo:

- ◆ Ensayos geoquímicos estáticos<sup>8</sup>
  - ◆ **Definición:** Estos ensayos se enfocan en determinar la composición química actual de una muestra sin simular los cambios que podría sufrir con el tiempo.
  - ◆ **Metodología:** Incluyen pruebas como el análisis de solubilidad en ácido, que mide la cantidad de minerales que se pueden disolver en ácidos; y la prueba de potencial de acidificación, que evalúa la capacidad de las rocas para generar ácido sulfúrico.
  - ◆ **Objetivo:** Proporcionan una “instantánea” de la química de una muestra, la cual es útil para identificar características inmediatas como la presencia de minerales tóxicos o valiosos.
- ◆ Ensayos geoquímicos cinéticos<sup>9</sup>
  - ◆ **Definición:** Diseñados para simular y entender cómo cambia la química de una muestra con el tiempo bajo condiciones ambientales específicas.
  - ◆ **Metodología:** Incluyen la prueba de lixiviación en columna y en botella, que simulan cómo los minerales y metales se disuelven y migran con el tiempo bajo condiciones de percolación de agua.
  - ◆ **Objetivo:** Son cruciales para predecir el comportamiento a largo plazo de los materiales, como la generación de drenaje ácido de roca o la liberación de contaminantes.

<sup>8</sup> Estos métodos son detallados en textos de geoquímica y minería, como en el libro *Geochemistry in mineral exploration* de Arthur W. Rose y otros.

<sup>9</sup> Estas técnicas se encuentran detalladas en publicaciones especializadas como *Environmental Geochemistry of minesite drainage* de D. W. Blowes y J. L. Jambor.

En la siguiente tabla se explican los ensayos realizados para cada uno de los tipos de análisis y sus ventajas y desventajas:

**Tabla 3. Principales variables y herramientas para la descripción del medio físico**

<b>MÉTODOS DE LABORATORIO</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Ánalisis</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Etapa</b>
<b>Test estáticos de laboratorio (cualitativos)</b>	pH en pasta y conductividad	Rápida y fácil de realizar; proporciona información básica sobre la acidez	Información limitada; no representa condiciones a largo plazo	Exploración-operación
	Test ABA Modificado	Proporciona una estimación del potencial de generación de ácido	Requiere conocimientos específicos para interpretación	Exploración-operación
	Determinación del potencial de Neutralización por Carbonato (CO <sub>3</sub> -NP)	Específico para la capacidad de neutralización de los carbonatos	Limitado solo a la neutralización por carbonatos	Eventualmente necesario en planificación y cierre
	Test NAG	Evalúa el potencial total de generación de ácido de una muestra	No simula condiciones ambientales a largo plazo	Exploración-operación
	Test NAG secuencial y cinético	Proporciona una evaluación detallada del potencial ácido a lo largo del tiempo	Más complejo y requiere más tiempo que la prueba NAG regular	Exploración-operación
	B.C. Research Initial Test	Es un análisis inicial para identificar el potencial de generación de ácido	Menos detallado que otros análisis más avanzados	No necesario, alternativo
	Test SPLP y TCLP	Identifica la lixiviación potencial de sustancias contaminantes	Requiere condiciones de laboratorio controladas	Exploración-operación
	Extracciones secuenciales	Determina la liberación secuencial de elementos	Proceso laborioso y puede requerir mucho tiempo	No utilizado
	Test ABCC	Se enfoca en el contenido de carbonato para el balance ácido-base	Limitado al análisis del contenido de carbonato	No utilizado
	Test NAP	Evalúa el potencial de neutralización de ácido	No proporciona información detallada sobre otras propiedades	Eventualmente necesario en planificación y cierre
	Test (APP/S ratio)	Determina la relación entre producción de ácido y azufre	Requiere análisis detallado de azufre	Exploración-operación
<b>Test cinéticos de laboratorio (cuantitativos)</b>	Celdas de humedad	Simula condiciones de humedad para estudios a largo plazo	Requiere un largo período para obtener resultados	Exploración-operación
	Test en columnas	Simula la lixiviación natural y la movilización de contaminantes	Puede ser costoso y requiere mucho tiempo	Exploración-operación
	B.C. Research Confirmation Test	Confirma los resultados de test iniciales sobre drenaje ácido	Requiere múltiples ensayos y análisis detallados	No utilizado
	Soxhlet extraction	Extracción continua para evaluar la liberación de componentes	Proceso prolongado y puede requerir equipo especializado	No utilizado

Nota. Elaboración propia.

### 4.1.2.3. Muestreo de calidad de aguas superficiales

Este tipo de muestreo considera los siguientes elementos a ser analizados y parámetros de valores característicos, de acuerdo con la normativa peruana (Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM):

Tabla 4. Parámetros para muestreo de calidad de aguas superficiales

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
<b>FÍSICOS-QUÍMICOS</b>				
Aceites y grasas	mg/L	0.5	1.7	1.7
Cianuro total	mg/L	0.07	**	**
Cianuro libre	mg/L	**	0.2	0.2
Cloruros	mg/L	250	250	250
Color (b)	Color verdadero Escala Pt/Co	15	100 (a)	**
Conductividad	( $\mu$ S/cm)	1 500	1 600	**
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L	3	5	10
Dureza	mg/L	500	**	**
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	10	20	30
Fenoles	mg/L	0.003	**	**
Fluoruros	mg/L	1.5	**	**
Fósforo total	mg/L	0.1	0.15	0.15
Materiales flotantes de origen antropogénico		Ausencia de material flotante de origen antrópico	Ausencia de material flotante de origen antrópico	Ausencia de material flotante de origen antrópico
Nitratos (NO <sup>3</sup> ) (c)	mg/L	50	50	50
Nitritos (NO <sup>2</sup> ) (d)	mg/L	3	3	**
Amoniaco- N	mg/L	1.5	1.5	**
Oxígeno disuelto (valor mínimo)	mg/L	≥ 6	≥ 5	≥ 4
Potencial de hidrógeno (pH)	Unidad de pH	6.5-8.5	5.5-9.0	5.5-9.0
Sólidos disueltos totales	mg/L	1 000	1 000	1 500
Sulfatos	mg/L	250	500	**
Temperatura	°C	Δ3	Δ3	**
Turbiedad	UNT	5	100	**

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado

### INORGÁNICOS

Aluminio	mg/L	0.9	5	5
Antimonio	mg/L	0.02	0.02	**
Arsénico	mg/L	0.01	0.01	0.15
Bario	mg/L	0.7	1	**
Berilio	mg/L	0.012	0.04	0.1
Boro	mg/L	2.4	2.4	2.4
Cadmio	mg/L	0.003	0.005	0.01
Cobre	mg/L	2	2	2
Cromo total	mg/L	0.05	0.05	0.05
Hierro	mg/L	0.3	1	5
Manganeso	mg/L	0.4	0.4	0.5
Mercurio	mg/L	0.001	0.002	0.002
Molibdeno	mg/L	0.07	**	**
Níquel	mg/L	0.07	**	**
Plomo	mg/L	0.01	0.05	0.05
Selenio	mg/L	0.04	0.04	0.05
Uranio	mg/L	0.02	0.02	0.02
Zinc	mg/L	3	5	5

### ORGÁNICOS

Hidrocarburos totales de petróleo (C <sub>8</sub> - C <sub>40</sub> )	mg/L	0.01	0.2	1.0
Trihalometanos	( e )	1.0	1.0	1.0
Bromoformo	mg/L	0.1	**	**
Cloroformo	mg/L	0.3	**	**
Dibromocloro-metano	mg/L	0.1	**	**
Bromodichloro-metano	mg/L	0.06	**	**

### I. COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES

1.1.1 Tricloroetano	mg/L	0.2	0.2	**
1.1 Dicloroetano	mg/L	0.03	**	**
1.2 Dicloroetano	mg/L	0.03	0.03	**
1.2 Diclorobenceno	mg/L	1	**	**
Hexaclorobutadieno	mg/L	0.0006	0.0006	**
Tetracloroetano	mg/L	0.04	**	**
Tetracloruro de carbono	mg/L	0.004	0.004	**
Tricloroetano	mg/L	0.07	0.07	**

Parámetros	Unidad de medida	A1	A2	A3
		Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento avanzado
<b>BTEX</b>				
Benceno	mg/L	0.01	0.01	**
Etilbenceno	mg/L	0.3	0.3	**
Tolueno	mg/L	0.7	0.7	**
Xilenos	mg/L	0.5	0.5	**
<b>Hidrocarburos aromáticos</b>				
Benzo(a)pireno	mg/L	0.0007	0.0007	**
Pentaclorofenol (PCP)	mg/L	0.009	0.009	**
<b>Organofosforados</b>				
Malatión	mg/L	0.19	0.0001	**
<b>Organoclorados</b>				
Aldrín + dieldrín	mg/L	0.00003	0.00003	**
Clordano	mg/L	0.0002	0.0002	**
Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT)	mg/L	0.001	0.001	**
Endrin	mg/L	0.0006	0.0006	**
Heptacloro + heptacloro epóxido	mg/L	0.00003	0.00003	**
Lindano	mg/L	0.002	0.002	**
<b>Carbamato</b>				
Aldicarb	mg/L	0.01	0.01	**
<b>II. CIANOTOXINAS</b>				
Microcistina-LR	mg/L	0.001	0.001	**
<b>III. BIFENILOS POLICLORADOS</b>				
Bifenilos policlorados (PCB)	mg/L	0.0005	0.0005	**
<b>MICROBIOLÓGICOS Y PARASITÓLOGOS</b>				
Coliformes totales	NMP/100 ml	50	**	**
Coliformes termotolerantes	NMP/100 ml	20	2 000	20 000
Formas parasitarias	N.º de organismos/L	0	**	**
<i>Escherichia coli</i>	NMP/100 ml	0	**	**
<i>Vibrio cholerae</i>	Presencia/100 ml	Ausencia	Ausencia	Ausencia
Organismos de vida libre (algas, protozoarios, copépodos, rotíferos, nematodos, en todos sus estadios evolutivos) (f)	N.º Organismo/L	0	<5x106	<5x106

Nota. Elaboración propia.

La definición del número de muestras está definida por el número de puntos comprometidos en el muestreo de acuerdo con los compromisos ambientales. Los puntos eventuales deberían ser definidos por el especialista de recursos hídricos.

Figura 7. Muestreos de puntos críticos



Nota. Tomado de International Network for Acid Prevention [INAC] (2017). *Global Cover System Design. Technical Guidance Document*. INAC.

Como se presenta en la figura, se recomienda el muestreo de puntos críticos, en el cual se puede tener alteraciones en la calidad química de las aguas tanto superficiales como subterráneas; por lo tanto, para tener un indicador y orden de magnitud de dónde y cuántas muestras, se recomienda:

- ◆ Cantidad de una muestra en duplicado representativa del dren de fondo del botadero de material estéril, **total: dos muestras**
- ◆ Cantidad de una muestra en duplicado representativa del dren de fondo del depósito de relaves, **total: dos muestras**
- ◆ Cantidad de una muestra en duplicado representativa del canal periférico de mina, botadero de estéril y depósito de relaves, **total: seis muestras**
- ◆ Cantidad de una muestra de calidad de aguas de fondo de minas
- ◆ Cantidad de una muestra de calidad de aguas de cuerpos superficiales de agua
- ◆ Cantidad de una muestra en duplicado de pozos de monitoreo aguas abajo representativa del botadero de estéril y depósito de relaves, **total: cuatro muestras**
- ◆ Cantidad de una muestra en duplicado de pozos de monitoreo aguas arriba representativa del botadero de estéril y depósito de relaves, **total: cuatro muestras**
- ◆ Total de muestras aproximadamente ~ veintidós para análisis químico de aguas, considerando además dos blancos (10%) del total de muestras

Todos los puntos de monitoreo y metodología de análisis deben respetar los procedimientos descritos en las siguientes normas internacionales:

#### 4.1.2.4. Calidad de aguas

- ◆ ISO 5667: Water quality sampling - part 3: guidance on the preservation and handling of water samples (ISO, 2003)
- ◆ National Field Manual for the Collection of Water-Quality Data (U.S. Geological Survey, s. f.)
- ◆ ANZECC/ARMCANZ: Australian Guidelines for Water Quality Monitoring and Reporting (ANZECC/ARMCANZ, 2000)
- ◆ Acmer: A guide to the application of the ANZECC/ARMCANZ water quality guidelines in the minerals industry (Batley et al., 2003)
- ◆ Sampling Ambient Water for Trace Metals at EPA Water Quality Criteria Levels (U.S. Environmental Protection Agency, 1996)
- ◆ MEND 4.7.1 Monitoring Acid Mine Drainage (MEND, 1990)

#### 4.1.2.5. Muestreo de aguas superficiales

- ◆ ISO5667: Water Quality Sampling - Part 6: Guidance on Sampling of Rivers and Streams (ISO, 2005)
- ◆ Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales (Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA)

#### 4.1.2.6. Muestreo de aguas subterráneas

- ◆ U.S. Environmental Protection Agency: Ground-Water Sampling Guidelines for Superfund and RCRA Project Managers (Yeskis y Zavala, 2002)
- ◆ ISO 5667: Water Quality Sampling - Part 18: Guidance on Sampling of Groundwater at Contaminated Sites (ISO, 2001)
- ◆ NEPC: Schedule B (2) Guideline on Data Collection, Sample Design and Reporting (NEPC, 1999)
- ◆ AS/NZS: Water Quality Sampling, Part 11: Guidance on Sampling of Groundwaters (AS/NZS, 1998)
- ◆ MEND 4.7.1 Monitoring Acid Mine Drainage (MEND, 1990)
- ◆ Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales
- ◆ Manual de Buenas Prácticas en la Investigación de Sitios Contaminados Muestreo de Aguas Subterráneas (Minam, 2016)

#### 4.1.2.7. Sedimentos

- ◆ MEND 4.7.4 Review of Sediments Monitoring Techniques (MEND, 1990)

Con estas informaciones y conociendo nuestras infraestructuras, se debe definir preliminarmente las medidas de mitigación que deben ser implantadas para durante la operación de la mina.

## 4.2. Explotación y beneficio

Durante esta fase se deben supervisar y controlar con especial cuidado las informaciones relativas a los procesos de construcción de cada una de las fuentes generadoras de drenaje ácido; por lo tanto, es necesario contar con un registro suficiente de algunas informaciones básicas de cada una de las infraestructuras.

En la siguiente tabla se presentan las informaciones que deben ser verificadas y son propias de cada infraestructura durante el proceso de explotación:

**Tabla 5. Aspectos clave para tener en cuenta de las fuentes que podrían generar DM**

<p><b>Botaderos</b></p>	<p>Descripción detallada en base a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Historia de su construcción (método de disposición del material, edad del botadero, entre otros)</li> <li>◆ Información del plan minero</li> <li>◆ Secuencia de llenado</li> <li>◆ Tonelaje y volúmenes (dimensiones)</li> <li>◆ Granulometría/distribución del material</li> <li>◆ Geología: litología, alteración, mineralogía (LAM)</li> <li>◆ Información del modelo de bloques y del modelo de leyes</li> </ul>
<p><b>Depósitos de relaves</b></p>	<p>Descripción detallada en base a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Tipo de depósito (embalse, depósito, espesado, filtrado, entre otros)</li> <li>◆ Tipo de yacimiento (cobre, oro, hierro, entre otros)</li> <li>◆ Etapa en la que se encuentra el proyecto</li> <li>◆ Análisis de la información histórica del depósito y su variabilidad en el tiempo</li> <li>◆ Secuencia de llenado del depósito</li> <li>◆ Balance metalúrgico</li> <li>◆ Geología: mineralogía del material que se procesa</li> <li>◆ Balance hidrológico considerando el clima y manejo de agua (circulación, recirculación, lugar de entrada y salida, entre otros)</li> <li>◆ Estudios de geofísica para una caracterización completa incluyendo la base del depósito</li> </ul>
<p><b>Depósitos de lixiviación</b></p>	<p>Descripción detallada en base a:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Diseño de la pila o ripio</li> <li>◆ Secuencia de depósito del material</li> <li>◆ Geología y mineralogía</li> <li>◆ Tonelaje y volumen</li> <li>◆ Información hidrogeológica del sistema</li> <li>◆ Modelo hidrogeoquímico</li> <li>◆ Información metalúrgica</li> <li>◆ Leyes de recuperación y estimación de leyes remanentes</li> <li>◆ Caracterización de las soluciones de recirculación</li> <li>◆ Información de los lavados del depósito, incluyendo si se ha realizado o se estima un lavado final</li> </ul>

## Mina a tajo abierto

### Descripción detallada en base a:

- ◆ Geología regional
- ◆ Geología del frente: litología, alteración, mineralización (LAM)
- ◆ Mapeo del frente: zonas mineralizadas y zonas estériles
- ◆ Modelo estructural
- ◆ Modelo hidrogeológico
- ◆ Información sobre la permeabilidad e impermeabilización del sistema

*Nota.* Tomado de Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [Sernageomin] (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.* Sernageomin.

De ese modo, las informaciones deben ser garantizadas para conseguir entender de la mejor manera las medidas de mitigación y claramente deben estar acompañadas por los monitoreos que son efectuados durante la operación de la misma operación. Cabe destacar que, a pesar de lo anterior, deben ser descritas las posibles medidas de control, las cuales deben contener durante su ejecución, por lo menos, su respectivo proyecto básico o ejecutivo para conseguir ser implantados.

## 4.3. Cierre

Si bien es fundamental planificar, implementar y verificar las medidas de cierre desde el diseño inicial de una instalación minera, la etapa de ejecución del cierre definitivo conlleva una serie de riesgos significativos. Entre los principales desafíos se encuentran, la ejecución del cierre de una instalación minera puede ser técnicamente compleja, especialmente, si se trata de una mina de antigua data, gran infraestructura, un número importante de instalaciones remanentes, con potencial de generación de DM y actividades de extracción diversificadas. Se requiere de una verificación de la correcta implementación de medidas de cierre, con el objeto de asegurar el cierre efectivo en el largo plazo, lo que podría requerir conocimientos especializados y tecnologías específicas.

## 4.4. Actividades de verificación durante la supervisión para unidades en etapas de explotación, exploración y cierre

A continuación, en la siguiente tabla se presentan las etapas y actividades que deben ser cumplidas y verificadas por el comité técnico de supervisión:

**Tabla 6. Actividades que deben ser verificadas por el comité técnico de supervisión en las diferentes etapas de la mina**

ETAPA	ACTIVIDAD-MEDIO FÍSICO	SUPERVISIÓN/VERIFICACIÓN
<b>EXPLORACIÓN</b>	Levantamiento topográfico	Verificación de topografías áreas y límites de infraestructuras proyectadas con estacas y sistema de coordenadas.
	Caracterización geológica	Verificación de sondajes y modelo geológico con puntos de campo y mapeo geológico.
	Caracterización hidrológica	Verificación de estudio hidrológico con estaciones de monitoreo existentes junto al análisis estadístico correspondiente.
	Caracterización hidrogeológica	Verificación de sondajes hidrogeológicos con localización, mapeo hidrogeológico, ensayos y testes hidráulicos para caracterización de Ss, Sy, K.
	Muestreo de LB calidad de aguas	Verificación de análisis de calidad de aguas superficiales y subterráneas con batería de análisis hidroquímicos aniones y cationes principales.
	Muestreo de LB calidad de suelos	Verificación de estudios de calicatas realizadas para caracterización de suelos junto al análisis de suelos como granulometrías, ensayos de humedad y ensayos de laboratorio para conocimiento de elementos y especiaciones existentes (debe contener el número de muestras, horizontes y coordenadas).
	Muestreo de LB calidad de aire	Verificación de instalación y muestreo de análisis de calidad de aire PM <sub>10</sub> presente en un lugar de la futura operación.
	Muestreo geoquímico (mineral)	Verificación de realización testes estáticos para caracterización geoquímica del mineral que será procesado.
	Muestreo geoquímico (estéril)	Verificación de realización testes estáticos para caracterización geoquímica del estéril que será depositado en las pilas.
	Caracterización clima	Verificación de estudios de viento, precipitación, nieve y fenómenos climáticos del área de estudio.
	Caracterización de flora	Verificación de estudios y levantamiento de áreas sensibles como bofedales y que sean ambientes sensibles al impacto de la operación.
	Identificación de cuerpos de agua superficiales	Verificación de levantamiento de cuerpos de agua presentes en las áreas de estudio.
	Desarrollo de ingenierías (pilas-depósitos de relaves)	Verificación de estudios de ingeniería para la construcción de las infraestructuras que serán implantadas por causa del proyecto.
Estudios metalúrgicos (relaves)	Verificación de estudios de ensayos metalúrgicos para caracterización de los relaves.	

ETAPA	ACTIVIDAD – MEDIO FÍSICO	SUPERVISIÓN/VERIFICACIÓN
<p style="text-align: center;"><b>EXPLOTACIÓN</b></p> <p style="text-align: center;">○</p> <p style="text-align: center;"><b>BENEFICIAMIENTO</b></p>	<p>Muestreo de calidad de aguas</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación de los protocolos de monitoreo sistemático por parte de la empresa, con acompañamiento del comité de supervisión.</li> <li>◆ Muestreo de aguas superficiales y subterráneas por parte del comité técnico de supervisión en los puntos que correspondan a compromisos legales y ambientales.</li> <li>◆ Medición de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, oxígeno disuelto, T°) con uso de multiparámetro.</li> </ul>
	<p>Muestreo geoquímico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Muestra aleatoria de materiales que están siendo depositados en las pilas de estéril.</li> <li>◆ Verificación de realización de ensayos cinéticos de muestras depositadas en las pilas de estéril.</li> <li>◆ Se debe intentar de cumplir el criterio de toneladas <i>versus</i> número de muestras o algún criterio similar para representatividad.</li> </ul>
	<p>Construcción de infraestructuras (pilas)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación mediante levantamiento topográfico de la instalación de la pila de estéril de acuerdo con el proyecto y los límites establecidos.</li> <li>◆ Verificación mediante diseño <i>as built</i> de la construcción del dren de fondo de la pila de estéril, canales de contorno de acuerdo con el proyecto, y con las dimensiones y materiales definidos por el proyectista. Es importante contar con el respaldo del documento emitido por el ITO del proyecto.</li> <li>◆ Muestreo de calidad de aguas del dren de fondo y canales periféricos si ellos tienen presencia de aguas para caracterización hidroquímica.</li> <li>◆ Realizar análisis con multiparámetro de parámetros fisicoquímicos de las aguas.</li> </ul>
	<p>Construcción de infraestructuras (depósitos)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación mediante levantamiento topográfico de la instalación de acuerdo con el proyecto y los límites establecidos.</li> <li>◆ Verificación mediante diseño <i>as built</i> de la construcción del dren de fondo del depósito de relaves, canales de contorno de acuerdo con el proyecto y con las dimensiones y materiales definidos por el proyectista. Es importante contar con el respaldo del documento emitido por la inspección técnica de obras (ITO) del proyecto.</li> <li>◆ Verificación de control tecnológico asociados a la construcción del depósito de relaves (muro).</li> </ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Muestreo de relaves para análisis geoquímicos y reológicos.</li> <li>◆ Muestreo de calidad de aguas de laguna de los relaves para caracterización hidroquímica.</li> <li>◆ Realizar análisis con multiparámetro de parámetros fisicoquímicos de las aguas.</li> </ul>
	Monitoreo de calidad de aguas, aire y suelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación de la información colectada por la empresa durante el periodo de operación, sea para agua, aire y suelo.</li> </ul>
	Modelo numérico hidrogeológico (flujo y transporte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Revisión del modelo hidrogeológico (numérico) de flujo y transporte con revisión de los escenarios de simulación futura.</li> </ul>
<b>CIERRE</b>	Muestreo de calidad de aguas	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Muestreo de aguas superficiales y subterráneas por parte del comité técnico de supervisión en los puntos correspondientes al dren de fondo de pilas de estéril, los canales de contorno de pilas y depósitos, el dren de fondo de depósitos de relaves, el fondo de mina, y los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas como pozos de monitoreo y pozos de bombeo, además de cursos de aguas naturales existentes en las periferias de la operación en cierre.</li> <li>◆ Medición de parámetros fisicoquímicos (pH, CE, oxígeno disuelto, T°) con uso de multiparámetro en los mismos puntos ya mencionados.</li> </ul>
	Muestreo geoquímico	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Muestra aleatoria de materiales que están y son utilizados como cobertura tanto de pilas de estéril como de rellenos y depósitos de relaves.</li> </ul>
	Eficiencia de coberturas	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Realización de ensayos de infiltración de coberturas usando metodología de permeámetro de Guelph o doble anillo.</li> <li>◆ Cantidad de muestras o ensayos. Se puede utilizar la recomendación de la tabla 2.</li> </ul>
	Eficiencia de sistema de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Medición de aforos en los puntos de control de salidas de drenes de fondo de los botaderos de estéril y los depósitos de relaves, así como del funcionamiento de los canales periféricos.</li> <li>◆ Revisión de los datos de monitoreos de estos puntos para garantizar que no exista pérdida de eficiencia.</li> </ul>

Nota. Elaboración propia.

En base a las obligaciones o compromisos del instrumento aprobado respecto a la estabilidad geoquímica, el equipo supervisor desarrollará diversas actividades para verificar el cumplimiento de estas obligaciones.

Con respecto a la determinación de la cantidad de calicatas de inspección para verificación, resulta difícil establecer un número mínimo de muestras, dado que dependerá de varios factores, entre los que se encuentran:

- ◆ Tipo de instalación (tajo, pila, depósito de relaves, botadero de estériles, entre otros)
- ◆ Condición de la instalación (cumplió con los criterios de diseños, presentó algún hallazgo durante la operación, se diseñó pensando en el cierre, entre otras)
- ◆ Evaluación de las condiciones del sitio (cerca de un curso de agua superficial o subterránea, precipitaciones, cercano a poblaciones o comunidades, tipo de cuenca endorreica o exorreica, entre otras)
- ◆ Extensión de la instalación
- ◆ Complejidad de la cobertura
- ◆ Parámetros que serán evaluados
- ◆ Características de la instalación (potencial de DAM)

Por esa razón, cada instalación minera y cada mina corresponde a un caso único, lo que impide determinar un número de muestras estándar. Sin embargo, se podrían utilizar métodos estadísticos para determinar el tamaño de la muestra para lograr una estimación confiable de la eficiencia de la cobertura. Esto generalmente implica calcular el tamaño de la muestra necesario para alcanzar un nivel de confianza deseado y un margen de error aceptable. Por ejemplo, es posible utilizar técnicas como el muestreo aleatorio simple o el muestreo estratificado para seleccionar las ubicaciones de las muestras en la instalación. Posteriormente, se debe calcular el tamaño de muestra necesario utilizando métodos estadísticos apropiados, como el cálculo del tamaño de muestra para determinar una proporción o una media, dependiendo de los parámetros que se estén evaluando.

Como alternativa, es posible utilizar el muestreo no probabilístico o juicio de experto. Este será diseñado de acuerdo con el criterio del grupo de expertos, quienes determinarán el número de muestras requerido para establecer la condición de la instalación. Es importante trabajar con un equipo de profesionales multidisciplinarios para determinar el tamaño de la muestra adecuado y diseñar un plan de muestreo que garantice resultados confiables y representativos.

Si la medida de cierre contempla la implementación de cobertura multicapa, se deben considerar las siguientes actividades:

- ◆ Determinación de las áreas a supervisar o verificación con el apoyo de sistemas RPAS (drones o aeronaves pilotadas remotamente).
- ◆ Determinación de la profundidad de calicata de inspección y la colecta de muestras para la identificación y caracterización de cada una de ellas en función a las capas y los espesores señalados en el instrumento

- ◆ Verificación de los espesores implementados y comparación con las medidas propuestas, haciendo uso de herramientas de medición de precisión
- ◆ Determinación de ensayos a realizar para comprobar las características o especificaciones señaladas en el instrumento, entre otras, según las condiciones de lo evidenciado

Verificar si una medida de cierre está bien implementada implica realizar una serie de evaluaciones y seguimientos. A continuación, se presentan algunos métodos comunes para verificar la implementación efectiva de medidas de cierre:

- ◆ Inspecciones *in situ*
- ◆ Monitoreo ambiental
- ◆ Auditorías externas
- ◆ Participación de las partes interesadas
- ◆ Revisiones documentales
- ◆ Control de calidad
- ◆ Comparación con estándares y mejores prácticas

A continuación, se presenta cada uno de esos puntos:

- ◆ **Inspecciones *in situ*:** Se realizan visitas periódicas al sitio de la mina cerrada para evaluar el estado de las medidas de cierre implementadas. Esto puede incluir inspeccionar la rehabilitación del terreno, el estado de las estructuras desmanteladas y el funcionamiento de los sistemas de control de agua y residuos.



Se recomienda realizar las visitas *in situ* por un equipo multidisciplinario para verificar la implementación de medidas de cierre. Esto ofrecerá una serie de beneficios significativos que aportarán a una mejor supervisión y verificación de implementación de la medida, entre las principales:

- ◇ **Perspectivas diversas:** Un equipo multidisciplinario puede incluir expertos en diversas áreas, como ingeniería ambiental, geología, geoquímica, hidrología, ecología y sociología. Esto permite una evaluación integral de la implementación de medidas de cierre desde múltiples perspectivas, identificando una gama más amplia de problemas potenciales y oportunidades de mejora.

- ◆ **Identificación del problema:** Al tener una variedad de expertos en el equipo, se pueden identificar de manera más precisa y completa los potenciales problemas relacionados con la implementación de las medidas de cierre. Esto incluye problemas técnicos, ambientales, sociales, económicos y de seguridad que pueden no ser evidentes para un solo especialista.
- ◆ **Sinergia de conocimientos:** La colaboración entre diferentes disciplinas permite aprovechar el conocimiento y la experiencia de cada miembro del equipo. Esto puede conducir a identificación de posibles riesgos en etapas tempranas de la implementación de la medida.
- ◆ **Comunicación interdisciplinaria:** La interacción entre los miembros del equipo multidisciplinario facilita la comunicación y el intercambio de información entre diferentes áreas de expertise. Esto puede ayudar a garantizar que se aborden de manera integral todos los aspectos relevantes para la implementación exitosa de medidas de cierre.
- ◆ **Mayor credibilidad y legitimidad:** La participación de un equipo multidisciplinario en las visitas in situ aumenta la credibilidad y legitimidad de los hallazgos y recomendaciones. Esto puede ser especialmente importante al comunicar los resultados a las partes interesadas, como las comunidades locales y reguladores.
- ◆ **Enfoque holístico:** Un equipo multidisciplinario puede adoptar un enfoque holístico para evaluar la implementación de medidas de cierre, considerando no solo los aspectos técnicos y ambientales, sino también los impactos sociales, económicos y culturales. Esto ayuda a garantizar que se tomen en cuenta todas las dimensiones relevantes del cierre de la instalación minera.
- ◆ **Monitoreo ambiental:** Se implementan programas de monitoreo ambiental para evaluar la calidad del agua, la calidad del suelo, la biodiversidad y otros indicadores ambientales clave. Los monitoreos deben ser implementados por el titular minero y evaluados por el equipo técnico multidisciplinario que realizará las inspecciones en terreno. Los datos recopilados durante el monitoreo pueden ayudar a identificar cualquier impacto negativo residual y guiar la implementación de acciones correctivas si es necesario.



- ◆ **Auditorías externas:** Se solicita al titular minero auditorías externas independientes para revisar los procesos de cierre y verificar el cumplimiento de las regulaciones ambientales y los estándares de la industria. Las auditorías pueden proporcionar una evaluación objetiva de la implementación de medidas de cierre y ayudar a identificar áreas de mejora. Algunos de los objetivos específicos de una auditoría de cierre de mina pueden incluir:
  - ◇ Evaluar si se han cumplido los requisitos legales y regulatorios relacionados con el cierre de la mina y la restauración ambiental
  - ◇ Verificar que se han implementado adecuadamente todas las medidas de control y mitigación de impactos ambientales previstas en el plan de cierre y restauración ambiental
  - ◇ Evaluar la efectividad de las medidas de monitoreo y seguimiento a largo plazo para garantizar que no hayan impactos ambientales negativos después del cierre de la mina
  - ◇ Evaluar la efectividad de las medidas para el poscierre
  - ◇ Identificar las lecciones aprendidas y las mejores prácticas para mejorar la planificación y gestión del cierre de la mina y la restauración ambiental en futuros proyectos mineros

Las auditorías deberán comprender el desarrollo de al menos las siguientes etapas:

**Tabla 7. Etapas de la auditoría**

ETAPA	ACTIVIDADES
<b>PREAUDITORÍA</b>	Consistirá en la revisión de antecedentes de la mina, entre los cuales incluirá el plan de cierre aprobado, los permisos sectoriales, los estudios de estabilidad física y la estabilidad química que respalden las medidas de cierre propuestas. Esta actividad permitirá entender la historia y los compromisos de la mina; esta etapa consistirá principalmente en actividades de gabinete. Con los resultados de esta etapa, se planificarán las actividades para la próxima etapa.
<b>AUDITORÍA</b>	Esta etapa considera la ejecución de las actividades de terreno (visita a la mina y sus instalaciones).
<b>POSAUDITORÍA</b>	Etapa en la cual se consolidará y contrastará la información técnica y la recolectada en terreno. Con esta información se elaborará el informe de auditoría.
<b>ELABORACIÓN DE INFORME</b>	Dentro del plazo estipulado en el programa, el auditor hará entrega del informe al servicio público y al titular minero.

Nota. Elaboración propia.

- ◆ **Participación de las partes interesadas:** Se trata de involucrar a las comunidades locales, las organizaciones no gubernamentales y otras partes interesadas en el proceso de verificación de las medidas de cierre, lo que puede proporcionar información valiosa sobre la efectividad de las medidas de cierre. La retroalimentación de las partes interesadas puede ayudar a identificar preocupaciones y problemas que pueden no ser evidentes de otra manera. Se pueden establecer hitos de seguimiento en los que pueden participar los stakeholders interesados en la implementación de las medidas.



- ◆ **Revisiones documentales:** Se centra en revisar los documentos relacionados con el cierre de la mina —como planes de cierre, informes de monitoreo, estudios de respaldo, evaluaciones de riesgos y registros de cumplimiento— para evaluar la implementación de medidas de cierre y asegurarse de que se estén siguiendo los procedimientos establecidos.
- ◆ **Control de calidad:** Está enfocado en generar una mayor certeza en la construcción, ejecución e implementación de las medidas de cierre, lo que permitirá contar con un criterio de experto que permita asegurar que se cumplan los estándares necesarios, orientados en un cierre a largo plazo, y que se entregue un certificado de un producto final de alta calidad.
- ◆ **Comparación con estándares y mejores prácticas:** Comparar la implementación de medidas de cierre con estándares y mejores prácticas de la industria puede proporcionar un marco de referencia para evaluar su efectividad e identificar áreas de mejora.

Al utilizar una combinación de estos métodos, es posible verificar de manera efectiva si una medida de cierre se encuentra bien implementada y si está cumpliendo con sus objetivos de mitigar los impactos ambientales y sociales después del cierre de la mina.

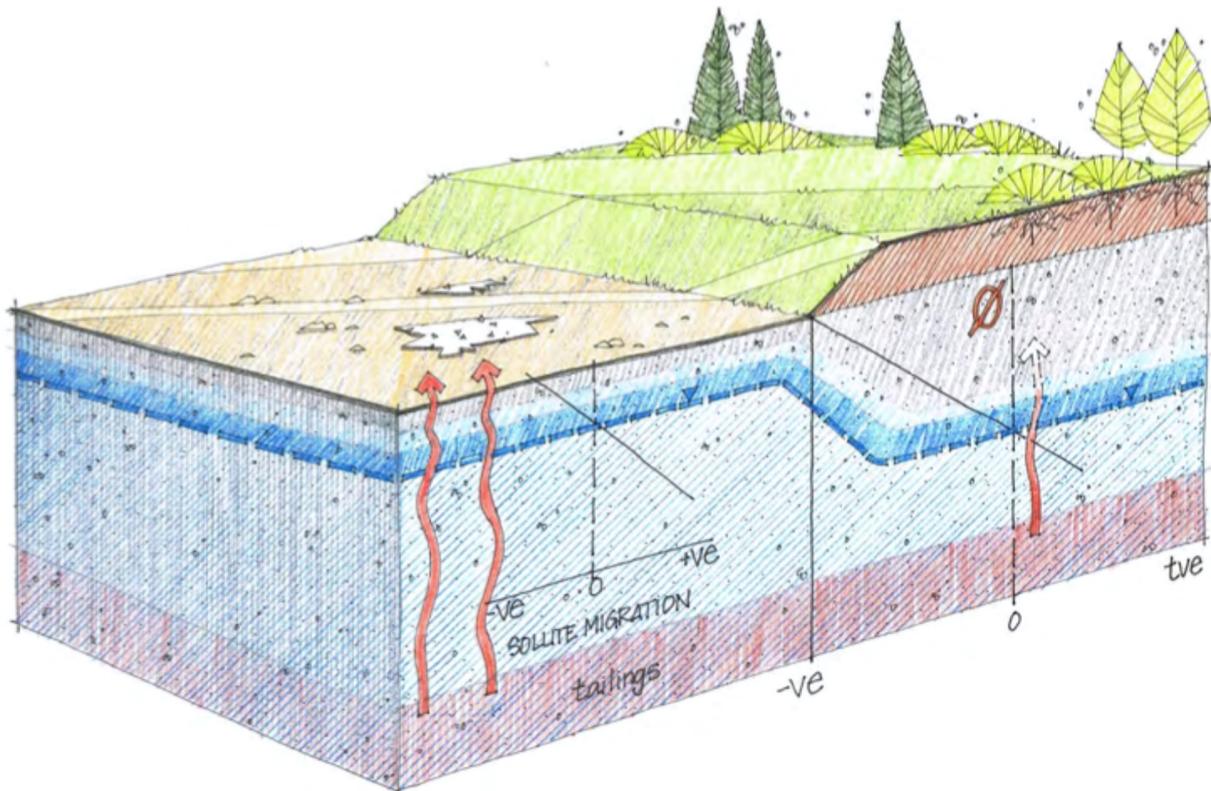
La mayoría de las instalaciones potencialmente generadoras de DM continúa experimentando cambios físicos y químicos después de su cierre. Los diseños de sistemas de cobertura deben tener en cuenta estos cambios. En algunos sitios, estos desechos pueden

tener propiedades inusuales que requieren cuidados adicionales en el diseño. Según INAP (2017), los desechos mineros problemáticos pueden ser:

- ◆ Líquidos o semisólidos; por ejemplo, relaves finos fluidos
- ◆ Compuestos por arcillas altamente dispersivas; por ejemplo, lutitas marinas
- ◆ Altamente erosionables; por ejemplo, arena de relaves de grano fino
- ◆ Solubles en agua; por ejemplo, desechos de sal
- ◆ Sujetos a grandes asentamientos; por ejemplo, relaves de baja densidad
- ◆ Radioactivos; por ejemplo, desechos de minas de uranio
- ◆ Sujetos a autocalentamiento o ignición; por ejemplo, desechos de carbón
- ◆ Sujetos a altas tasas de intemperismo; por ejemplo, acopios de lutita friable
- ◆ Probablemente contengan aguas residuales, solventes, escombros de construcción y otros materiales

El objetivo principal de las coberturas es aislar los residuos del entorno receptor (flora, fauna y seres humanos). Los sistemas de cobertura se emplean para evitar la migración de posibles contaminantes desde las instalaciones de almacenamiento de residuos hacia los receptores ambientales. Estos diseños de sistemas podrán considerar la vegetación —dependerá de la ubicación, por ejemplo, en climas áridos, no es posible por la limitación de agua— que puede crecer en la cubierta con raíces que penetren más profundamente con el tiempo (ver figura 8). La hidrología de la zona no saturada es una consideración importante en los sistemas de cubierta de aislamiento, ya que la mayoría de los constituyentes de preocupación potencial (COPC, por sus siglas en inglés) migran debido a la capilaridad dentro de la matriz del suelo.

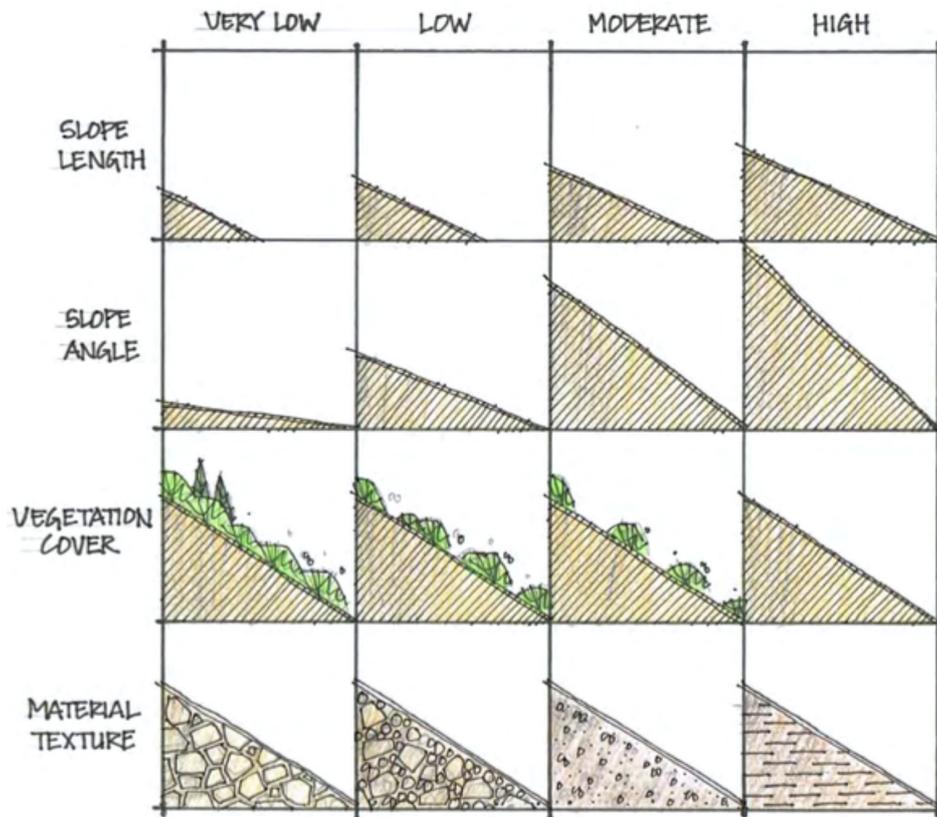
**Figura 8. Sistema de cobertura**



Nota. Tomado de International Network for Acid Prevention [INAP] (2017). *Global cover system design: Technical guidance document*. INAC.

Cabe resaltar que otro aspecto relevante del diseño de un sistema de cobertura es considerar intervenir los taludes para mantener de forma estable el terreno y con una mínima pérdida de masa (ver figura 9).

Figura 9. Mecanismos potenciales de control de la erosión para el diseño del sistema de cubierta



Nota. Tomado de International Network for Acid Prevention [INAP] (2017). *Global cover system design: Technical guidance document*. INAC.

#### 4.4.1. Factores de diseño predominantes

Varios factores técnicos predominantes surgen de los objetivos generales de diseño del sistema de cobertura que dictan criterios de diseño específicos del sitio. Entre ellos se encuentran:

- ◆ El clima
- ◆ El uso de la tierra después de la mina
- ◆ Las propiedades físicas y geometría del material de desecho; por ejemplo, constructibilidad, asentamiento, estabilidad del talud
- ◆ La química del material de desecho; por ejemplo, reactividad versus no reactividad, lixiviación de metales versus percolación ácida
- ◆ Las características y la disponibilidad del material de cobertura
- ◆ Los plazos para el establecimiento de formas de terreno estables y productivas
- ◆ El acceso al sitio y la constructibilidad

Existen distintos sistemas de cobertura y los diseños dependerán de los diferentes objetivos que se requieren para la implementación de la medida de cierre. Según INAP (2007), los diseños se han dividido en seis categorías:

- ◆ Sistemas de cobertura de protección simple; por ejemplo, reclamación, reforestación, aislamiento, sistemas de protección contra la erosión
- ◆ Sistemas de cobertura de almacenamiento y liberación
- ◆ Sistemas de cobertura de almacenamiento y liberación mejorados; por ejemplo, mejorados con una capa de permeabilidad inferior, una ruptura capilar, o una desviación de ruptura capilar estacionalmente congelada y diseñada (SFCBD)
- ◆ Sistemas de cobertura tipo barrera; por ejemplo, suelo compactado o capa permanentemente congelada
- ◆ Sistemas de cobertura con capas ingenieriles; por ejemplo, capas geosintéticas
- ◆ Sistemas de cobertura de suelo o roca saturados

Es importante señalar que un sistema de cobertura particular puede caer en más de una categoría. Por ejemplo, todos los sistemas de cobertura ofrecen cierto grado de protección contra la erosión, y un sistema con un medio de crecimiento que cubre una geomembrana también puede funcionar como un sistema de cobertura de almacenamiento y liberación. Por lo tanto, se debe evaluar un sistema de cobertura en un continuo de valores de rendimiento, con diferentes mecanismos dominantes que cumplen con los criterios de diseño según el conjunto único de condiciones de un sitio.

El enfoque más adecuado para garantizar que un sistema de cobertura cumpla con las expectativas de las partes interesadas, ya sean internas o externas a la operación minera, suele ser el resultado de uno o más de los siguientes aspectos:

- ◆ Definir y documentar los objetivos finales de uso de la tierra y las expectativas para la forma de terreno de desechos mineros que consideren la forma de terreno en el contexto del sitio en su conjunto
- ◆ Definir y documentar objetivos claros para el sistema de cobertura, que surgen de los objetivos y expectativas de uso de la tierra

Si bien la cobertura es una de las medidas más utilizadas como medida de cierre de estabilidad química para una instalación minera, no es la única y se puede implementar en conjunto con otras medidas de cierre dependiendo de los resultados de los estudios

y la evaluación de riesgos. A continuación, se mencionan los riesgos, los impactos y las posibles soluciones de control y mitigación que podrían ser adoptadas para cada una de las infraestructuras:

**Tabla 8. Impactos, riesgos y medidas de mitigación por infraestructura**

INSTALACIÓN	IMPACTOS	RIESGOS	MEDIDAS DE CONTROL / MITIGACIÓN CIERRE
<b>BOTADEROS</b>	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la infiltración de DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, otros) del agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM (la aplicación de este tipo de medidas puede significar periodos extensos de tratamiento)</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>
	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la generación de DM a causa de lluvias o crecidas, o por la interacción de cursos de agua superficial con la instalación	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con agua y su uso en lugares de afloramiento</li> </ul>	
	Alteración significativa de la calidad del agua superficial producto de la generación de DM a causa de lluvias o crecidas, o producto de la interacción de cursos superficiales con la instalación	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, recreacional, entre otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con agua y su uso</li> </ul>	
<b>DEPÓSITOS DE RELAVES</b>	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la infiltración de DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, entre otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con agua y su uso en lugares de afloramiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM (la aplicación de este tipo de medidas puede significar periodos extensos de tratamiento)</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>
	Alteración significativa de la calidad del agua superficial producto de la generación de DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, recreacional, entre otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con el agua y su uso</li> </ul>	

<b>DEPÓSITOS DE LIXIVIACIÓN</b>	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la generación de DM a causa de lluvias o crecidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con el agua y su uso en lugares de afloramiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM (la aplicación de este tipo de medidas puede significar periodos extensos de tratamiento)</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>
	Alteración significativa de la calidad del agua superficial producto de la generación de DM a causa de lluvias o crecidas	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, recreacional, otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con y el uso del agua</li> </ul>	
<b>MINA A TAJO ABIERTO</b>	Alteración significativa de la calidad del agua del <i>pit lake</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, recreacional, entre otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto de agua y su uso</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Relleno con material neutralizador no generador de DM</li> <li>◆ Canales periféricos</li> </ul>
	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la infiltración de DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, entre otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con el agua y su uso en lugares de afloramiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> <li>◆ Sistema de bombeo fondo mina</li> </ul>
<b>MINA SUBTERRÁNEA</b>	Alteración significativa de la calidad del agua subterránea producto de la infiltración de DM	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Afectación de la salud de las personas por el uso (agrícola, residencial, otros) del agua</li> <li>◆ Afectación de especies o ecosistemas por el contacto con el agua y su uso en lugares de afloramiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Relleno de la mina subterránea con material compactado o cementado</li> <li>◆ Construcción de pozos de bombeo para evitar infiltración</li> <li>◆ Construcción de canales periféricos</li> </ul>

Nota. Elaboración propia.

La tabla anterior es extremadamente relevante, dado que representa las principales medidas de control y mitigación para los problemas de estabilidad química.

## 4.4.2. Monitoreo de estabilidad geoquímica

Uno de los puntos relevantes para realizar medición de eficiencia de las medidas de control y mitigación es comprobar con ensayos de campo cómo se está comportando la solución de ingeniería. En la Tabla 9 se especifican los controles y ensayos clásicos para realizar control y monitoreo de condiciones:

Tabla 9. Controles y monitoreos recomendados por instalación

INSTALACIÓN	MEDIDAS DE CONTROL / MITIGACIÓN CIERRE	MONITOREOS Y ENSAYOS RECOMENDADOS
<b>BOTADEROS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación fotográfica vía RPAS (drone) para determinar longitudes de canales de contorno y verificación de erosiones</li> <li>◆ Ensayos de proctor normal o modificado para conocer la densidad máxima seca de la cobertura aplicada</li> <li>◆ Ensayos de permeabilidad pueden ser realizados tipo Lefranc o tipo Guelph</li> <li>◆ Análisis químico de calidad de aguas superficiales y subterráneas</li> <li>◆ Muestreo de suelos con metodología simples de pH en pasta para conocer calidad de suelos <i>in situ</i></li> <li>◆ Geofísica mediante técnicas de resistividad eléctrica como tomografías para definir infiltraciones</li> <li>◆ Ejecución de trincheras o calicatas de exploración para validación de la cobertura</li> </ul>
<b>DEPÓSITOS DE RELAVES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación fotográfica vía RPAS (drone) para determinar longitudes de canales de contorno y verificación de erosiones</li> <li>◆ Ensayos de proctor normal o modificado para conocer la densidad máxima seca de la cobertura aplicada</li> <li>◆ Ensayos de permeabilidad pueden ser realizados tipo Lefranc o tipo Guelph</li> <li>◆ Análisis químico de calidad de aguas superficiales y subterráneas</li> <li>◆ Muestreo de suelos con metodología simple de pH en pasta para conocer la calidad de suelos <i>in situ</i></li> <li>◆ Geofísica mediante técnicas de resistividad eléctrica como tomografías para definir infiltraciones</li> <li>◆ Ejecución de trincheras o calicatas de exploración para validación de la cobertura</li> </ul>

<p><b>DEPÓSITOS DE LIXIVIACIÓN</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Construcción de drenajes de fondo</li> <li>◆ Cobertura superficial con material de suelo inerte</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Tratamiento pasivo utilizando material neutralizador de DM</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación fotográfica vía RPAS (<i>drone</i>) para determinar longitudes de canales de contorno y verificación de erosiones</li> <li>◆ Ensayos de proctor normal o modificado para conocer la densidad máxima seca de la cobertura aplicada</li> <li>◆ Ensayos de permeabilidad pueden ser realizados tipo Lefranc o tipo Guelph</li> <li>◆ Análisis químico de calidad de aguas superficiales y subterráneas</li> <li>◆ Muestreo de suelos con metodología simples de pH en pasta para conocer calidad de suelos <i>in situ</i></li> <li>◆ Geofísica mediante técnicas de resistividad eléctrica como tomografías para definir infiltraciones</li> <li>◆ Ejecución de trincheras o calicatas de exploración para validación de la cobertura</li> </ul>
<p><b>MINA A TAJO ABIERTO</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Relleno con material neutralizador no generador de DM</li> <li>◆ Canales periféricos</li> <li>◆ Construcción de cortina de pozos de bombeo</li> <li>◆ Sistema de bombeo fondo mina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Verificación fotográfica vía RPAS (<i>drone</i>) para determinar longitudes de canales de contorno y verificación de erosiones</li> <li>◆ Análisis químico de calidad de aguas superficiales y subterráneas</li> </ul>
<p><b>MINA SUBTERRÁNEA</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Relleno de la mina subterránea con material compactado o cementado</li> <li>◆ Construcción de pozos de bombeo para evitar infiltración</li> <li>◆ Construcción de canales periféricos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Análisis químico de calidad de aguas superficiales y subterráneas</li> <li>◆ Monitoreo mediante técnicas de geofísica con técnicas eléctricas (magnetotéluricas u otras)</li> </ul>

Nota. Elaboración propia.

## 4.5. Actividades de monitoreo durante la supervisión

En función de lo comentado anteriormente, este punto trata de las actividades que pueden ser fácilmente efectuadas por el equipo de supervisión. Cabe destacar que se realizará un detalle técnico de algunas metodologías ampliamente conocidas para determinar parámetros que son importantes considerar como medidas de control de drenajes mineros.

### 4.5.1. Condición de las aguas

Con objetivo de entender la calidad de las aguas sean superficiales o subterráneas — además de los monitoreos de calidad de aguas realizados periódicamente—, puede ser realizado el siguiente ensayo en las salidas de las vertientes o en drenajes existentes de cada infraestructura. Este ensayo corresponde a la medición de pH, lo que puede ser realizado con el uso de un multiparámetro o con un elemento tan simple como el uso de cinta de papel, el cual toma una coloración dependiendo la condición de pH. Como es sabido las aguas naturalmente tienen un pH que varía de 4 a 6.8 en condiciones naturales. Si es menor a este rango, se está en presencia de alguna alteración producto de contacto con material sulfurado.

#### 4.5.1.1. ¿Cómo funciona?

Se debe sumergir la tira de prueba de pH en el líquido durante dos segundos y luego esperar diez segundos. Debido a que la tira con el papel tornasol entra en contacto con una sustancia ácida o básica, la tira se decolora.

Imagen1. Medición de pH



Nota. Tomado de Royal Brinkman (s. f.). ¿Cómo se usan las tiras de pH? Royal Brinkman.  
<https://royalbrinkman.es/centro-de-conocimiento/cuidado-del-cultivo/como-se-usan-las-tiras-de-ph>

## 4.5.2. Condición de los suelos

Dos parámetros importantes en la conservación de los suelos deben ser analizados en ensayos simples que pueden ser realizados en campo. El primero es la condición de infiltración y el segundo, la condición de alteración geoquímica que pudiese tener. Al detallar la metodología de cada una se puede decir lo siguiente.

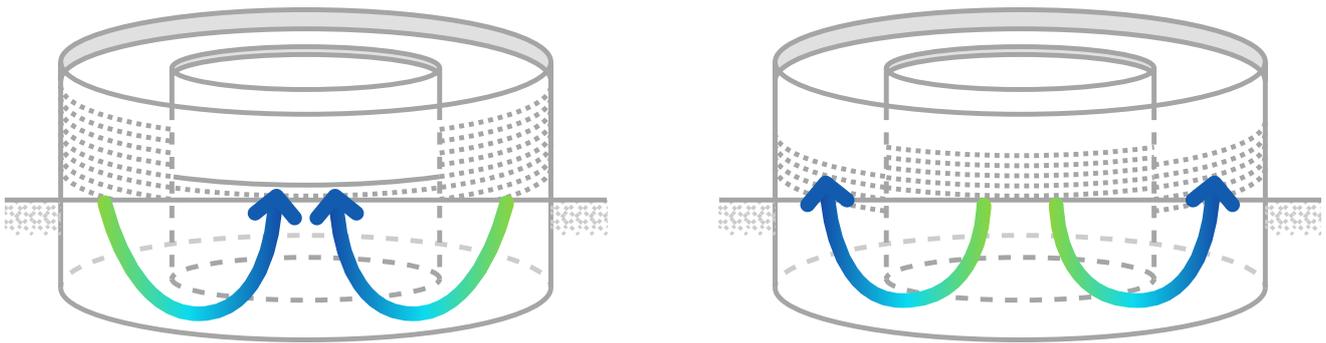
### 4.5.2.1. Infiltración de coberturas

Existen varias metodologías de cálculo y estimación de eficiencia de coberturas mediante infiltración. La primera es ampliamente conocida y aplicada en la minería por la simpleza y la facilidad de conseguir los materiales para ejecución. La segunda es un proceso más sofisticado diseñado para estimación de la conductividad hidráulica de los suelos, el cual posee la capacidad de conseguir mejores resultados con mayor precisión.

- ◆ **Ensayo de infiltración de doble anillo:** El ensayo de infiltración de doble anillo corresponde a un ensayo no invasivo de terreno, realizado con dos cilindros concéntricos que pueden tener un diámetro de 33 cm y 55 cm respectivamente. Además, los cilindros poseen una altura de 25 cm y un espesor de 4 mm. Ambos cilindros son rotulados en su interior mediante una regla metálica para realizar las mediciones de nivel en su interior.

Para la ejecución del ensayo se realiza una excavación de 30 cm de profundidad, en la cual se hinca entre 5 y 10 cm los dos anillos de manera concéntrica en un suelo natural sin mayor intervención. Una vez realizado esto y habiendo sido nivelados ambos anillos, se procede de la siguiente manera:

- ◆ El anillo central y el espacio anular son llenados con agua potable hasta una columna de 18 cm de altura.
- ◆ Una vez nivelados ambos niveles tanto exterior como interior, se inicia la medición del descenso que experimenta el nivel del anillo interior, debido a la infiltración del agua en la superficie de suelo ensayada.
- ◆ Cuando el nivel en el anillo interior llega a 11 cm de columna de agua, se vuelve a llenar hasta 18 cm el nivel de agua en el interior. En un comienzo se toman medidas cada dos minutos; luego, cada cinco minutos; y, desde el minuto cuarenta en adelante, cada diez minutos respectivamente hasta finalizar la prueba.
- ◆ El método requiere una coordinación y preocupación constante de que tanto los niveles interior como exterior se mantengan al mismo nivel. En caso contrario, se produce un efecto de descarga lateral que puede incrementar el nivel interior o disminuirlo de manera más acelerada, como se aprecia en la siguiente figura:

**Figura 10. Efecto de recarga y descarga de anillos**

Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017a). Minuta técnica: Análisis y resultados de ensayos de infiltración doble anillo en Planta La Negra. ICASS Consultores.

En la figura 10, se presenta una foto de la experiencia de terreno, en la cual se pueden observar los anillos ubicados de manera concéntrica y con los niveles de agua en proceso de descenso de los niveles iniciales. Se destaca que en esta actividad el hincamiento del cilindro fue de 5 cm bajo la superficie de terreno y el cilindro fue llenado con 18 cm de columna de agua en la cual se registraron los niveles en la razón que avanzaba el tiempo. La secuencia de tiempo que se utilizó en los registros de terreno corresponde a etapas de medición de 2-5-10 minutos, los cuales crecen en la medida que avanza el tiempo de registro. Por lo general, se utiliza un tiempo de registro total promedio de noventa a cien minutos en gran parte de las pruebas.

**Imagen 2. Recarga y descarga de anillos**

Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017a). Minuta técnica: Análisis y resultados de ensayos de infiltración doble anillo en Planta La Negra. ICASS Consultores.

- ◆ **Resultados:** El tratamiento de los datos obtenidos de la experiencia de terreno debe ser ajustado al modelo empírico de cálculo de infiltración promedio ( $I_p$ ) de Kostiakov (1932) y mejorado por Phillips (1957), la ecuación que permite obtener la infiltración acumulada y por consiguiente la infiltración promedio. A continuación, se presenta la ecuación de Infiltración acumulada:

$$d = K * t^m$$

Nota. Tomado de Soilmoisture Equipment Corp. (2008). *Model 2800K1 Guelph permeameter*. Soilmoisture Equipment Corp.

Donde:

**t** = tiempo en (min)

**d** = Infiltración acumulada en el tiempo t [mm].

**K** = Constante que depende de la estructura inicial del suelo (en seco). Es la lámina que se infiltra en el primer instante mayor que cero (mm).

**m** = Constante que depende de la estabilidad de la estructura del suelo frente al agua,  $0 > m < 1$ .

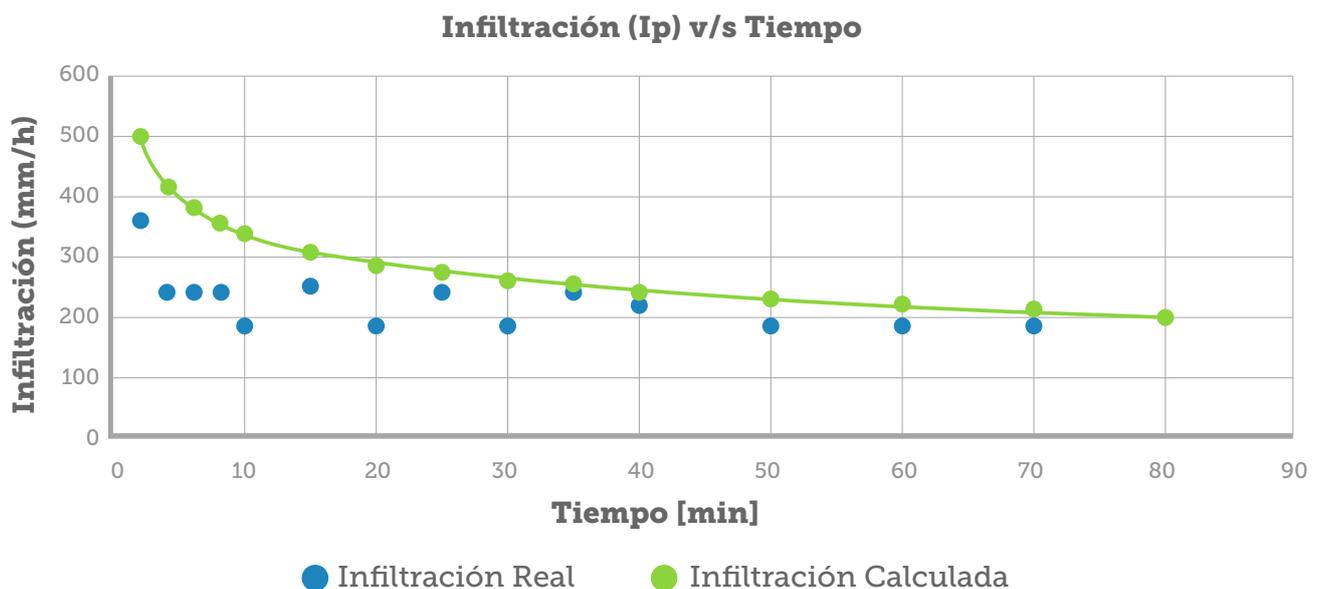
Y, por consiguiente, la infiltración promedio responde a la ecuación que se escribe a continuación:

$$I_p = K * 60 * t^{(m-1)} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]$$

Nota. Tomado de Soilmoisture Equipment Corp. (2008). *Model 2800K1 Guelph permeameter*. Soilmoisture Equipment Corp.

A manera de ejemplo, en la figura 13 se presentan los resultados de infiltración promedio *versus* el tiempo de manera ejemplificadora. De ese modo, se debería tener como resultado la curva calculada.

Gráfico 2. Resultados de infiltración



Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017a). *Minuta técnica: Análisis y resultados de ensayos de infiltración doble anillo en Planta La Negra*. ICASS Consultores.

- ◆ **Método de permeámetro de Guelph:** El método de Guelph es una técnica hidrológica utilizada para medir la conductividad hidráulica saturada del suelo en el campo. Esta propiedad del suelo es crucial para entender cómo el agua se mueve a través del suelo, lo que es fundamental para estudios relacionados con la agricultura, hidrología e ingeniería ambiental.

Generalmente, se realizan medidas en dos horizontes de medición y se recomienda que en cada punto se tomen muestras en los horizontes someros 15 cm y 30-45 cm de acuerdo como se estime conveniente.

Los pasos por seguir para realizar la prueba con el permeámetro de Guelph son:

- ◆ **Selección del sitio:** El sitio de prueba se tiene que elegir en base a la información disponible; por ejemplo, calicatas, perfiles de suelo, observación visual, etc. El objetivo de esta evaluación es realizar la prueba en un punto que sea lo más representativo posible; en otras palabras, debe posicionarse en una parte donde el suelo que se quiere caracterizar no presente anomalías (raíces, rocas, entre otras), y que el volumen de suelo representativo sea suficiente (alrededor y debajo del punto). El permeámetro de Guelph permite ensayar suelos con permeabilidades de medias a altas (entre  $10^{-4}$  y  $10^{-7}$  m/s), es decir, suelos arenosos a limosos.
- ◆ **Perforación:** Un agujero de diámetro de 6 cm se realiza con la broca tipo Auger, la coruña y el cepillo. La profundidad del agujero depende de la profundidad de la prueba, idealmente, entre 25 y 60 cm. La profundidad del agujero tiene que ser mayor a 10 cm para evitar derrame. Primero, se perfora con la broca sacando muestras de suelo; la muestra se dispone en forma de perfil. Segundo, se usa la coruña para obtener un agujero de geometría uniforme, con diámetro regular.

En suelos húmedos y particularmente en suelos con textura fina a mediana, el proceso de perforación puede dejar una capa lisa en las paredes del agujero, que podría perturbar el flujo natural del agua. En ese caso, la capa se quita con el cepillo. Una vez el agujero se haya terminado, se mide su profundidad exacta y su diámetro.

- ◇ **Posicionamientos del instrumento en el agujero de infiltración:** El permeámetro se baja lentamente, sin golpear las paredes del agujero hasta el fondo de este. De esa forma, se mide la profundidad total del agujero. Luego, se posiciona el permeámetro de forma que se alcance la carga hidráulica sobre el fondo deseado. Se recomienda siempre dejar 1 cm entre la punta del permeámetro y el fondo del pozo, e instalar la punta del permeámetro de 1 cm a 50 cm arriba del fondo del agujero, dependiendo de la permeabilidad del suelo. De hecho, a mayor carga hidráulica, mayor tasa de infiltración. Por lo tanto, para un suelo de permeabilidad menor, cabe aplicar una carga hidráulica mayor para apurar la prueba.

Generalmente, se realizarán por lo menos dos ensayos en cada punto, con dos cargas hidráulicas distintas (H1 y H2). Estas cargas hidráulicas tienen que ser determinadas según la permeabilidad estimada del suelo, pero en forma general, H1 = 10 cm y H2 = 20 cm dan buenos resultados.

- ◇ **Llenado del instrumento e inicio de la prueba:** El instrumento se llena por su tubo de entrada somero. Si toda el agua se infiltra y el tubo no se puede llenar, significa que la tasa de infiltración es demasiado importante y no se puede realizar la prueba. Si es posible rellenar el tubo, la prueba empieza una vez que el tubo esté lleno.
- ◇ **Recolección de datos:**
  - Este procedimiento describe la realización de una prueba de permeabilidad de carga constante única.
  - Una vez que el permeámetro esté lleno, se toma lectura del nivel en el permeámetro y, al mismo tiempo, se lanza el cronometro.

Se toma una lectura del nivel de agua cada cinco minutos en el caso de un suelo de arena o grava y cada diez minutos en el caso de un suelo limoso. En cada medición, se calcula la tasa de infiltración según la siguiente fórmula:

$$R = \frac{L_1 - L_2}{\Delta t} \text{ (cm/min)}$$

Con:

**R:** Tasa de infiltración

**L2 y L1:** Lectura de nivel 1 y 2

**$\Delta t$ :** Tiempo entre medición 1 y medición 2

La prueba se realiza tres veces hasta obtener tres resultados de tasas de infiltración similares; se deben realizar en forma consecutiva. Esto indica que el sistema se encuentra en régimen permanente; por lo tanto, se detiene la prueba.

Se lleva a cabo una descripción adecuada del suelo, lo que permite evaluar su potencial de capilaridad macroscópica. En otras palabras, se describe la textura del suelo (porcentaje de grava, arena, limo y arcilla), ya que la estructura del suelo describe la forma en cual se agregan las partículas. Se puede usar la clasificación de estructura planar, prismática, columnar, en bloques, granular, sin estructura. Cabe resaltar que comúnmente los suelos arenosos no tienen estructura.

- ◆ **Cálculo de la permeabilidad:** La permeabilidad se calcula usando la siguiente fórmula:

$$K_{fs} = \frac{C_1 Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \frac{H_1}{\alpha^*}}$$

*Nota.* Tomado de Soilmoisture Equipment Corp. (2008). *Model 2800K1 Guelph permeameter*. Soilmoisture Equipment Corp.

Con:

**Kfs:** Permeabilidad en condiciones de saturación de campo (con burbujas de aire encerradas en el suelo) en cm/s

**C1:** Coeficiente de forma del bulbo saturado, la cual se determina sobre la curva apropiada, no tiene unidad

**Q1:** Caudal en cm<sup>3</sup>/s

**H1:** Altura de agua en el agujero en cm

**a:** Radio del pozo en cm

**$\alpha$ :** Parámetro de capilaridad macroscópica, el cual se determina con la tabla apropiada en cm<sup>-1</sup>

Los resultados obtenidos después de los cálculos obtenidos deberían comportarse de la siguiente forma:

Figura 11. Cálculos de permeabilidad

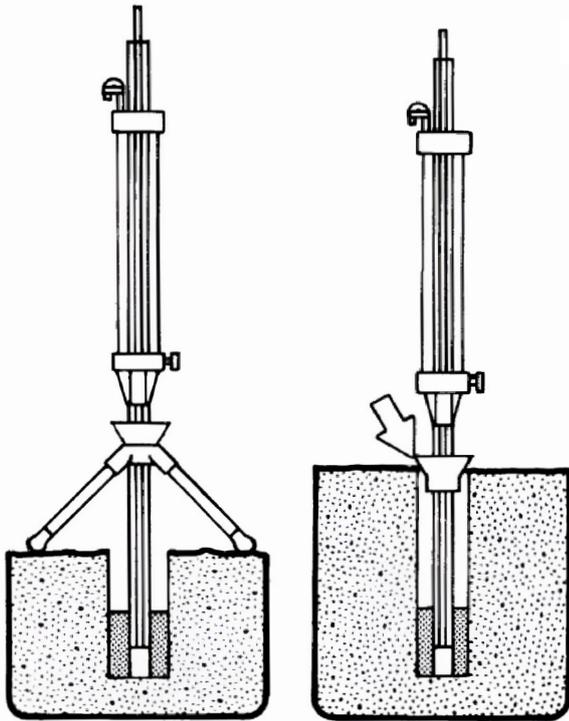
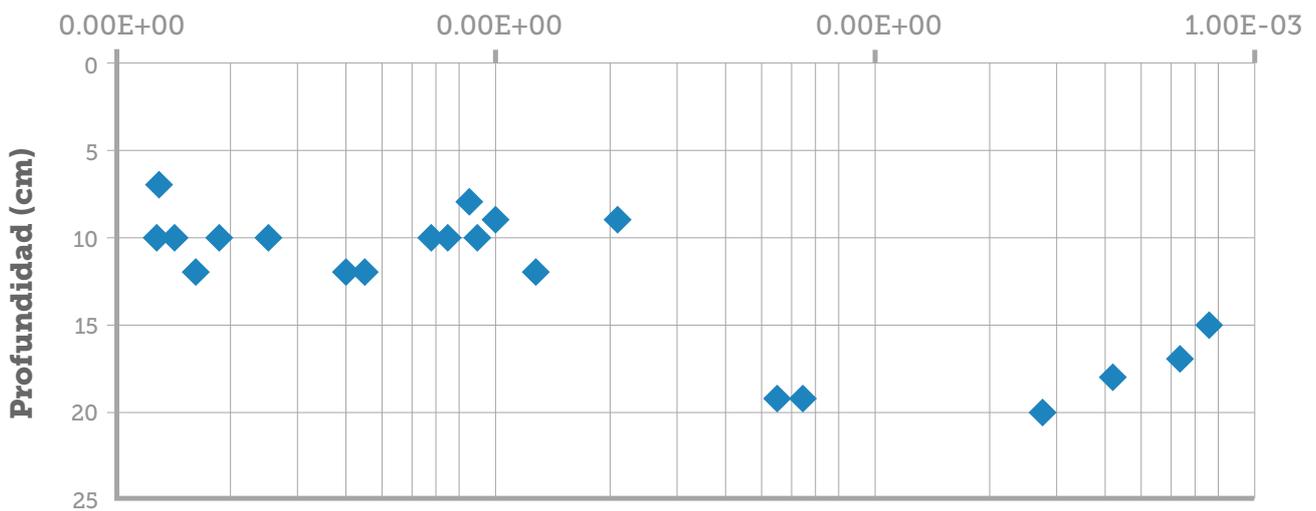


Imagen 3. Cálculos de permeabilidad



Nota. Tomado de Soilmoisture Equipment Corp. (2008). Model 2800K1 Guelph permeameter. Soilmoisture Equipment Corp.

Gráfico 3. Variación de conductividad hidráulica en profundidad



A continuación, se presenta el permeámetro de Guelph con sus formas de instalación:

- ◆ **Recomendación de número de muestras:** Para casos de determinación de número de puntos de muestreo, se recomienda tomar en consideración el detalle de la tabla presentada a continuación:

Tabla 10. Determinación de puntos de muestreo

GRILLA		ÁREA (m <sup>2</sup> )	ÁREA TOTAL (m <sup>2</sup> )
x (m)	y (m)		
25	25	625	Hasta 40 000
50	50	2 500	> 40 000
100	100	10 000	> 150 000
150	150	22 500	> 350 000
200	200	40 000	> 600 000
250	250	62 500	> 1 000 000

Nota. Elaboración propia.

Considerando la experiencia en proyectos semejantes, para la determinación de eficiencia de camada de cobertura, se determina un número mínimo tomando en cuenta una grilla uniforme y homogénea que sería necesaria para representar de forma adecuada el área en evaluación. Además, se recomienda tomar una muestra cada ciertos metros que serían representativos de un área total de estudio para ese nivel de definición. Mayores refinamientos deberían ser estudiados para entender mejor las dinámicas de áreas más específicas si fuera necesario.

Lo anterior corresponde a una recomendación de estudios que fueron desarrollados en diferentes proyectos de empresas mineras en Chile, Brasil y Europa. Técnicamente no existe una ciencia cierta, dado que cada parámetro o elemento tiene un comportamiento diferente. Sin embargo, usando las reglas de estimación y geoestadística, se puede determinar un número mínimo de muestras que podría ser representativo de un área espacial de estudio. Por ejemplo, la siguiente imagen corresponde a un área de evaluación de la camada filtrante de una pila dinámica de lixiviación de óxidos usando el permeámetro de Guelph.

**Imágenes 4 y 5. Área de evaluación de la camada filtrante de una pila dinámica de lixiviación de óxidos usando el permeámetro de Guelph**



*Nota. Tomado de Schlumberger Water Services Chile (2016). Resultados de los ensayos de permeabilidad in situ sobre pilas de lixiviación, Minera Centinela. Schlumberger Water Services Chile.*

#### **4.5.2.2. Calidad química de coberturas**

Los suelos sufren diversas alteraciones que pueden ocasionar una caída de la calidad de los suelos que son usados como cobertura. Uno de los métodos de campo más usados para entender la calidad de los suelos es la metodología de pH en pasta. A continuación, se detalla de manera simple cómo efectuarla y qué parámetros se deben tomar en consideración:

- ◆ **Muestreo de suelos superficiales:** El equipo de terreno tomará las muestras superficiales en los primeros 10 cm de suelo en cada punto. Las muestras deben ser colocadas en la bolsa de muestra con un peso objetivo de 5 kg de material. Esta cantidad de material para cada muestra permitirá tener una cantidad de material suficiente para realizar los ensayos de terreno, las muestras de laboratorio y los duplicados. Debe resultar en un remanente para cada muestra.

Para evitar la contaminación cruzada entre puntos de muestreo, se descontaminarán (por lavado con agua destilada, detergente, y enjuagando con agua destilada) cualquier herramienta o insumo que haya sido utilizado para realizar el proceso de toma de muestras antes de volver a utilizarla.

Antes de realizar los análisis de granulometría y pH en pasta, el total de la muestra (5 kg) debe ser homogenizado, mezclando en un balde o caja plástico de capacidad suficiente (10 L) con las herramientas de mezcla respectivas. Se deben romper partículas grandes de suelo no-consolidado. Una vez finalizada la actividad anterior, se debe lavar la caja/balde ocupada por la muestra, aplicando agua destilada y detergente “tipoalconox” para la limpieza de utensilios; luego, se debe enjuagar con agua destilada antes de ocuparla para la próxima muestra.

Los ensayos de pH y conductividad eléctrica (CE) en pasta están diseñados para evaluar las características físico-químicas de suelos en el terreno con la hipótesis de que los suelos han sido impactados por las descargas de residuos líquidos, los cuales cuentan con alto contenido de sólidos. Esto demuestra que las características físico-químicas de los suelos de línea base del área del estudio son distintas en la actualidad. Los ensayos son de bajo costo y de rápido análisis e interpretación.

Los análisis de las muestras en el laboratorio, como parte de esta investigación, permitirán el desarrollo de correlaciones específicas del área (si existen), entre el pH y CE en pasta y elementos de interés. El procedimiento de pH y CE en pasta se basa en el método de pH en pasta confeccionado por United States Environmental Protection Agency (1978), con modificaciones para incluir mediciones de CE y así incrementar el número de registros posibles del sector.

A continuación, se presentan las etapas del procedimiento:

- ◆ Asegurar que la muestra esté homogenizada.
- ◆ Sacar aproximadamente cien gramos de muestra de suelo.
- ◆ Filtrar la muestra mediante el uso de malla #10 (2 mm) y descartar la porción gruesa retenida en malla (gravas).
- ◆ Depositar la fracción pasante por la malla en la tasa o el vaso de ensayo.
- ◆ Agregar agua destilada en razón 2:1 (suelo: agua) por masa, lo cual es aproximadamente 3:1 por volumen, y permitir al suelo a absorber el agua antes de agitar.
- ◆ Agitar la muestra con la ayuda de la cuchara. Una muestra bien preparada será la que se encuentre en el punto de saturación; es decir, no debe contener agua encharcada en la superficie ni evidencia de suelo seco en superficie.

- ◆ Si es necesario, agregar más suelo o agua hasta llegar en el punto de saturación, agitando como sea necesario.
- ◆ Colocar el multiparámetro en la muestra y agitarlo suavemente. Una vez estabilizada la medición, se deben anotar los valores de pH y CE.
- ◆ Lavar el multiparámetro —y cualquier herramienta (por ejemplo, una cuchara), que haya sido utilizada con la muestra— con agua destilada, detergente, y posteriormente enjuagar con agua destilada para evitar contaminación cruzada.

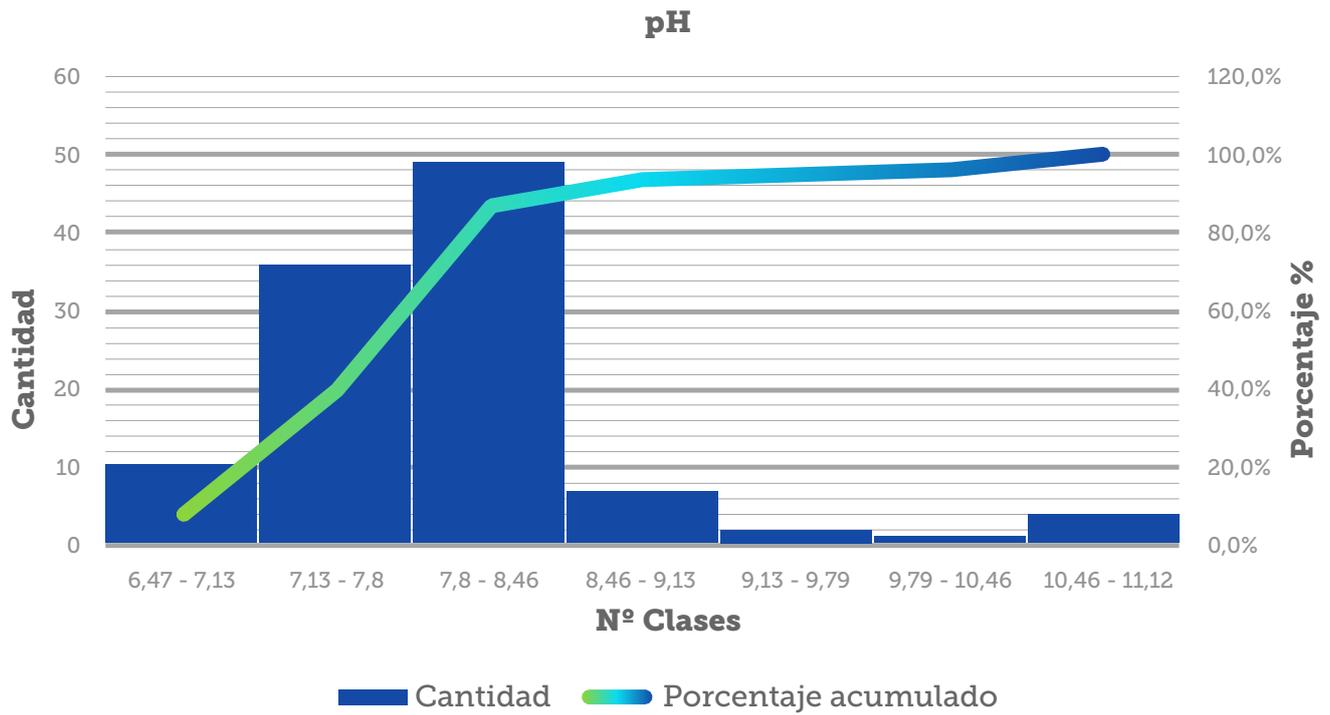
Imagen 6. Procedimiento de pH y CE



Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017b). Nota técnica: Construcción de calicatas Sector Industrial La Negra – P155-NT-10-RevA. ICASS Consultores.

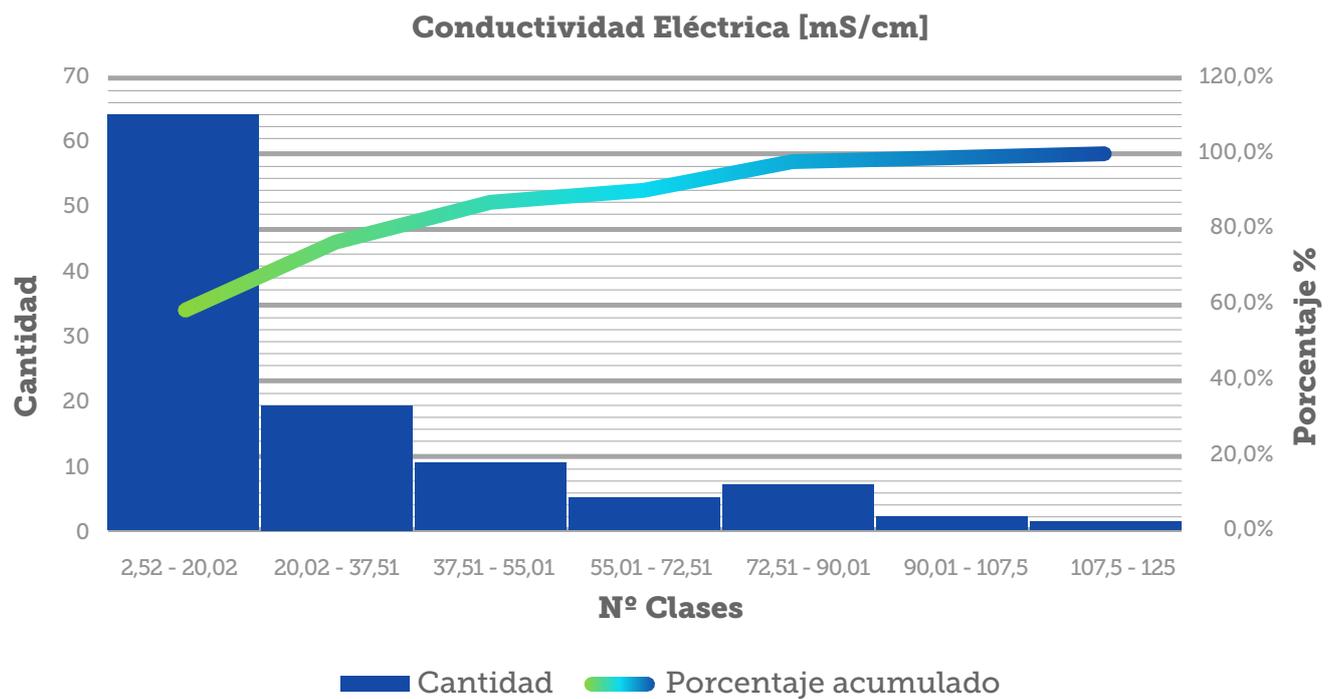
- ◆ **Resultados de fase análisis de pH en pasta:** De los análisis efectuados en terreno, los cuales corresponden al análisis mediante el método de pH en pasta de las muestras, se obtienen resultados de pH, conductividad eléctrica (CE) y total de sólidos disueltos (TDS). Estos resultados son expresados mediante los gráficos de Pareto, los cuales muestran una distribución estadística de cómo se comportan los datos de acuerdo con un rango determinado de manera estadística.

Gráfico 4. Resultados del análisis pH pasta



Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017b). Nota técnica: Construcción de calicatas Sector Industrial La Negra – P155-NT-10-RevA. ICASS Consultores.

Gráfico 5. Resultados del análisis pH pasta



Nota. Tomado de ICASS Consultores (2017b). Nota técnica: Construcción de calicatas Sector Industrial La Negra – P155-NT-10-RevA. ICASS Consultores.

Ellos entregan un comportamiento de referencia que puede ser usado como un indicador de condiciones sulfatadas o generadoras de drenajes mineros. Es importante contar con todas las informaciones en un nivel de, por lo menos, ingeniería básica para cada una de las medidas de control para así realizar el monitoreo y mantenimiento de poscierre respectivo.

Es importante definir las actividades en las etapas que establece la Ley que Regula el Cierre de Minas; es decir, que las actividades deben realizarse para las etapas de cierre progresivo, final y en poscierre para verificar las condiciones de las medidas de cierre aprobadas en los instrumentos. Cada etapa tiene una particularidad; en la etapa de cierre progresivo, se puede acompañar al titular minero en el desarrollo de las actividades que está ejecutando. Por otro lado, la planificación de la supervisión se debe realizar desde la etapa de construcción de la medida de cierre. Además, si la planificación de la supervisión es después de los trabajos del titular minero, el objetivo será determinar si todo ese trabajo se realizó de acuerdo con su plan de cierre de minas (PCM), por lo que se verifica las condiciones de lo que ya está construido. Para eso, hay que determinar el área de inspección los puntos necesarios de verificación, como calicata y los ensayos que se deben realizar.

# V. MANTENIMIENTO, MONITOREO POSCIERRE Y VERIFICACIÓN EN UNIDADES EN POSCIERRE

Para el poscierre ya se habrán ejecutado las medidas de cierre planificadas, como el desmantelamiento de la infraestructura, la ejecución de la totalidad de las medidas de cierre y la rehabilitación del sitio. En esta etapa, se implementan las actividades de mantención y el monitoreo de las medidas.

## 5.1. Conceptos generales

Para el poscierre existen dos objetivos fundamentales a considerar: (a) mantención de las instalaciones a perpetuidad y (b) uso futuro de la tierra. Las medidas de poscierre deben ser mantenidas a perpetuidad con el principal objetivo de que estas instalaciones no se conviertan en un pasivo minero. Dejar de mantener las instalaciones después del cierre implicaría un nivel alto de riesgos. A continuación, se presentan los principales riesgos:

- ◆ **Contaminación ambiental:** Sin un mantenimiento adecuado de las medidas de cierre de las instalaciones remanentes, las estructuras mineras cerradas —como los depósitos de relaves, las pilas de desechos, los tajos o botaderos— pueden deteriorarse, lo que afectaría la efectividad de las medidas de cierre y, con el tiempo, se liberarían contaminantes peligrosos en el ambiente, como metales pesados y productos químicos tóxicos que pueden contaminar el suelo, el agua subterránea y los cuerpos de agua cercanos.
- ◆ **Riesgos para la salud pública:** La contaminación ambiental resultante puede representar riesgos para la salud pública, lo que causa enfermedades en las personas que viven en el área de influencia del sitio minero cerrado, debido a la exposición a sustancias peligrosas.
- ◆ **Degradación del paisaje:** La falta de mantenimiento puede llevar a la degradación del paisaje en el área minera cerrada, lo que afecta negativamente a la biodiversidad y el valor estético de la región.
- ◆ **Pérdida de confianza y responsabilidad social:** La falta de cumplimiento con las medidas de cierre puede dañar la reputación de la empresa minera y erosionar la confianza de la comunidad local y las partes interesadas en la industria minera.

- ◆ **Costos financieros adicionales:** La restauración y limpieza de los daños ambientales causados por la falta de mantenimiento podría considerar costos financieros significativos para el Estado, los cuales podrían superar con creces los costos iniciales de cierre ejecutado.

Planificar el cierre para el uso de la tierra posterior al cierre es un desafío. En el análisis se debe considerar al menos lo siguiente:

- ◆ Ubicación de las instalaciones remanentes con relación a las poblaciones cercanas
- ◆ Verificación del uso de tierra futuro
- ◆ Obligaciones normativas para el uso de la tierra
- ◆ Propiedad de la tierra
- ◆ Viabilidad económica
- ◆ Planes regionales

No existe un proceso único para planificar el uso de la tierra después del cierre. Sin embargo, hay una serie de principios que se pueden utilizar para identificar y evaluar las opciones de cierre (International Council on Mining & Metals, 2018):

- ◆ **Evaluación temprana:** Las estructuras formales para la gestión del uso de la tierra después del cierre y las iniciativas comunitarias y comerciales deben considerarse desde las primeras etapas de la aprobación y la concesión de permisos. Se tendrán en cuenta criterios regionales que conlleven a un mismo destino del uso del suelo de acuerdo con el ordenamiento ambiental y territorial.
- ◆ **Considerar la capacidad de la tierra:** El uso de la tierra debe ser compatible con la idoneidad de la tierra para sostener un tipo de uso de la tierra de forma permanente; es decir, tipos de suelo, profundidad, pendiente, etc.
- ◆ **Involucrar a las partes interesadas:** Se debe interactuar con los reguladores y otras partes interesadas, incluidos los pueblos indígenas, las agencias gubernamentales, las organizaciones comunitarias y los propietarios privados para obtener información sobre las posibles opciones de uso de la tierra dentro de los límites de la capacidad/idoneidad de la tierra previstas.
- ◆ **Reutilización de la tierra:** Se deben identificar y evaluar las opciones para maximizar la vida útil de un territorio, por lo que se debe comenzar desde las primeras etapas de la planificación del cierre.
- ◆ **Considerar el marco legal aplicable:** Algunas jurisdicciones pueden tener estipulaciones sobre el uso de la tierra después del cierre o pueden tener planificación o políticas regionales que deben ser considerados para el desarrollo del uso de la tierra después del cierre.

## 5.2. Para las actividades de supervisión

Las obligaciones ambientales están referidas a las actividades de mantenimiento y monitoreo; por lo tanto, el equipo supervisor debe analizar las obligaciones ambientales en esta etapa para determinar el proceso de cumplimiento por el titular minero:

- ◆ Identificar los compromisos de mantenimiento y monitoreo de los instrumentos.
- ◆ Determinar la forma de cumplimiento y la verificación, lo cual puede ser con la revisión de los informes y la toma de muestra de agua según la obligación. Esto con el propósito de que las condiciones químicas de los elementos en la etapa de poscierre no tengan alteraciones respecto a lo planificado.

### 5.2.1 Mantenimiento geoquímico

Para lograr la estabilidad química en el cierre de una mina, se deben implementar una serie de medidas que ayudan a prevenir la generación del DAM y la liberación de otros contaminantes químicos. En general las principales medidas de cierre para lograr la estabilidad química son:

- ◆ **Cobertura del material de desecho:** Cubrir los materiales de desecho con capas de suelo o material inerte para limitar su exposición al oxígeno y al agua, reduciendo así la oxidación de minerales sulfurosos y la generación de DAM
- ◆ **Control de infiltración:** Implementar sistemas de drenaje y control de agua (canales de contorno) para minimizar la infiltración de agua en los materiales de desecho y reducir la lixiviación de contaminantes
- ◆ **Control de la erosión:** Estabilizar las superficies expuestas mediante técnicas de revegetación, estructuras de control de la erosión y otras medidas para prevenir la erosión del suelo y la liberación de contaminantes
- ◆ **Tratamiento de aguas ácidas:** Diseñar e implementar sistemas de tratamiento de aguas ácidas para neutralizar el pH y eliminar los metales pesados y otros contaminantes antes de su descarga al ambiente
- ◆ **Monitoreo ambiental:** Establecer programas de monitoreo ambiental para evaluar continuamente la calidad del agua, la calidad del aire, y la salud de la flora y fauna en y alrededor del sitio minero donde se ejecuta el cierre
- ◆ **Rehabilitación del paisaje:** Restaurar el paisaje y la vegetación en el sitio minero cerrado mediante técnicas de reforestación, siembra de pastos y otras prácticas de rehabilitación para promover la estabilización del suelo y reducir la erosión

Durante la etapa de poscierre se deben implementar planes de mantenimiento a largo plazo para asegurar que las medidas de cierre permanezcan efectivas y se mantengan durante muchos años después del cierre de la mina.

## 5.2.2. Mantenimiento de canales de contorno

El mantenimiento de los canales de contorno como medida de cierre en una mina es fundamental, dado que los canales previenen la erosión del suelo y el ingreso de agua a la instalación cerrada, lo que podría provocar el movimiento de sedimentos. Esto afectaría negativamente al ambiente y la salud de la población del área de influencia. A continuación, se presentan algunas pautas sobre cómo realizar esta tarea:

- ◆ **Inspección regular:** Se deben realizar inspecciones periódicas de los canales de contorno para identificar cualquier signo de erosión, sedimentación excesiva o daño estructural. Esto ayudará a detectar problemas antes de que se vuelvan graves.
- ◆ **Limpeza de vegetación no deseada:** Se elimina la vegetación no deseada que pueda obstruir los canales de contorno o los residuos que puedan acumulados en el canal que puedan obstaculizar el flujo de agua. Esto puede incluir arbustos, árboles, tierra, piedras, roca o maleza, que se hayan acumulado o crecido en los bordes de los canales.
- ◆ **Mantenimiento de la pendiente:** Es importante asegurarse de que las pendientes de los canales de contorno se mantengan estables y libres de erosión. Si es necesario, se deben realizar trabajos de perfilado para restaurar la pendiente adecuada y prevenir la erosión.
- ◆ **Control de sedimentos:** Se implementan medidas para controlar la sedimentación en los canales de contorno, como la instalación de trampas de sedimentos o barreras de paja en puntos críticos para atrapar los sedimentos antes de que ingresen a los cuerpos de agua cercanos.
- ◆ **Mantenimiento de estructuras de drenaje:** Es importante asegurarse de que las estructuras de drenaje, como los vertederos de agua pluvial, estén limpias y funcionando correctamente para evitar inundaciones y erosión en los canales de contorno.
- ◆ **Registro y seguimiento:** Se debe llevar un registro de todas las actividades de mantenimiento realizadas en los canales de contorno y realizar un seguimiento de la efectividad de estas medidas con el tiempo para ajustarlas según sea necesario.

Por lo tanto, la mantención de los canales periféricos es uno de los puntos de atención más relevantes dentro de la generación de DM. Otras actividades de mantención son las erosiones producto de las precipitaciones intensas en las áreas de coberturas con deficiente sistema de drenaje superficial tanto en botaderos como depósitos de relaves.

Una de las actividades de control y mantenimiento es la verificación antes y después de cada periodo lluvioso para así, en los inicios de los periodos secos, poder realizar las mantenciones respectivas a los sistemas de drenajes superficiales. Es recomendable realizar la actividad a con un sistema RPAS (drones), como se observa en la siguiente figura:

#### Imágenes 7 y 8. Imágenes de verificación de cierre con drones



Nota. Imagen tomada por el equipo de investigación en Kinross Gold, Paracatú

### 5.2.3. Mantenimiento de señalética y cierre de accesos

Para realizar el mantenimiento de la señalética y el cierre de acceso como medida de cierre en una mina, se pueden establecer los siguientes pasos:

- ◆ **Inspección regular:** Se realizan inspecciones periódicas de la señalética y los cierres de acceso para identificar cualquier signo de desgaste, daño o vandalismo.
- ◆ **Reparación o reemplazo:** Si se encuentra señalética dañada, desgastada o ilegible, se debe reparar o reemplazar de inmediato. Es importante asegurarse de que todas las señales estén claramente visibles y legibles para advertir a las personas sobre los peligros y la prohibición de acceso.
- ◆ **Limpieza y mantenimiento de la señalética:** Se debe limpiar regularmente las señales para eliminar la suciedad, el polvo y otros residuos que puedan obstruir la visibilidad.
- ◆ **Reforzamiento de los cierres de acceso:** Es importante asegurarse de que los cierres de acceso estén en buenas condiciones de funcionamiento y que impidan el acceso no autorizado al sitio minero cerrado. Si es necesario, se debe reparar o reforzar los cierres para garantizar su efectividad.

- ◆ **Actualización de la señalética:** Se debe revisar periódicamente la señalética para asegurarse de que refleje con precisión cualquier cambio en las condiciones del sitio minero o en las regulaciones de seguridad.
- ◆ **Capacitación del personal:** Se debe proporcionar capacitación regular al personal encargado del mantenimiento de la señalética y los cierres de acceso para asegurarse de que comprendan la importancia de estas medidas y sepan cómo mantenerlas adecuadamente.
- ◆ **Registro y seguimiento:** Es importante llevar un registro de todas las actividades de mantenimiento realizadas en la señalética y los cierres de acceso, incluyendo fechas de inspección, reparaciones realizadas y cualquier otra acción tomada. Además, se debe realizar un seguimiento de la efectividad de estas medidas con el tiempo.

Con estas actividades de mantenimiento regular, es posible garantizar que los canales de contorno, señalética y cierre de accesos cumplan eficazmente su función de control de la erosión, la sedimentación, la protección del sitio minero cerrado y la prevención del acceso no autorizado como parte de las medidas de cierre de la mina.

# VI. CONTROL DE CALIDAD

En el proceso de cierre de instalaciones mineras, el control de calidad juega un papel crucial para garantizar que se cumplan los estándares ambientales, de seguridad y legales requeridos. Este apartado se enfocará en la importancia del control de calidad como herramienta de verificación durante el cierre de operaciones mineras.

Al igual que en el proceso de construcción de un depósito de relaves, que instala una geomembrana con el objeto de evitar las infiltraciones, para lograr el objetivo y la eficacia de la geomembrana, esta se instalará de acuerdo con los estándares del fabricante (fondo nivelado, relleno de suelo arcilloso, compactación, densidad, soldadura, entre otros) con los debidos resguardos y consideraciones. Solo al cumplir con estas exigencias, la geomembrana permitirá asegurar alta resistencia, buena impermeabilidad, resistencia a la corrosión y capacidad antienviejamiento. Al no cumplir con estos requisitos, la geomembrana podría no cumplir con las capacidades técnicas, lo que implicaría un alto costo para el titular minero. Sin embargo, si la instalación de esta geomembrana se realiza con un equipo de control de calidad, se asegurará el cumplimiento de los estándares exigidos por el fabricante de la geomembrana y con esto una medida efectiva contra las infiltraciones. Así como el control de calidad es una medida efectiva para la construcción, resulta una herramienta eficiente para la construcción de las medidas de cierre.

## Imágenes 9 y 10. Control de calidad cobertura, revegetación y canal de contorno botadero de estériles



Nota. Elaboración propia.

El cierre de instalaciones mineras se ha transformado en una de las principales etapas en el ciclo de vida de una mina. Es el proceso mediante el cual se llevan a cabo actividades para cerrar de manera segura y ambientalmente responsable las operaciones mineras una vez que ha finalizado la extracción de minerales.

## 6.1. Objetivos del control de calidad en el cierre de minas

El control de calidad se podría transformar en una gran herramienta enfocada en generar mayor certeza en la construcción, ejecución e implementación de las medidas de cierre. Esto permitirá contar con un criterio de experto que permita asegurar que se cumplan los estándares necesarios, orientados en un cierre a largo plazo y que se entregue un certificado de un producto final de alta calidad. Aquí se aborda la importancia de este proceso en este contexto y se desempeña un papel fundamental en la implementación de las medidas enfocadas en el cierre de minas.

**Imagen 11. Control de calidad soldadura geomembrana**



*Nota.* Imagen tomada por el equipo de investigación en SIGSA.

El control de calidad durante el cierre de instalaciones mineras tiene varios objetivos principales:

- ◆ **Garantía de seguridad:** Uno de los aspectos más importantes del control de calidad es que permite asegurar la implementación exacta de la medida que se debe incorporar. El control de calidad verificará que se sigan los códigos y normativas de construcción pertinentes, así como que se realicen inspecciones para identificar posibles riesgos de seguridad y corregirlos antes de que se transforme en un problema en el largo plazo.
- ◆ **Cumplimiento de especificaciones técnicas:** El control de calidad asegura que los materiales utilizados para ejecutar la medida de cierre cumplan con las especificaciones técnicas requeridas. Esto incluye la verificación de la resistencia de los materiales, la compatibilidad entre ellos y su adecuación para el uso previsto. Garantizar la calidad de los materiales es fundamental para la durabilidad y funcionalidad a largo plazo de la medida implementada.

- ◆ **Reducción de costos:** Detectar y corregir defectos durante el proceso de construcción puede ayudar a evitar costosos retrabajos o reparaciones futuros o costos muestrales de verificación por parte de la autoridad. El control de calidad permite identificar problemas tempranamente, lo que ayuda a minimizar los costos asociados con su corrección y a mantener el proyecto dentro del presupuesto previsto.
- ◆ **Mejora de la reputación y la satisfacción del cliente:** Entregar una instalación cerrada de alta calidad aumenta la satisfacción del cliente y mejora la reputación de la empresa responsable del cierre. Un control de calidad efectivo garantiza que se cumplan las expectativas por parte del Estado y que el producto final sea confiable y funcional en el largo plazo.
- ◆ **Cumplimiento legal y normativo:** La construcción está sujeta a una serie de regulaciones y normativas, desde normas de seguridad hasta requisitos medioambientales. El control de calidad ayuda a garantizar el cumplimiento de todas estas regulaciones, lo que reduce el riesgo de enfrentar sanciones legales o problemas regulatorios en el futuro.
- ◆ **Mejora continua:** El control de calidad no se limitará solo a la ejecución de la medida de cierre, sino que también abarca la evaluación y mejora continua de los procesos y prácticas utilizadas. Por ejemplo, si un cierre tarda diez o quince años en su implementación, que el control de calidad acompañe durante esta implementación, permitirá identificar áreas de oportunidad para optimizar la eficiencia y calidad de la medida de cierre.

## 6.2. Procesos de control de calidad en el cierre de instalaciones mineras

El control de calidad durante el cierre de instalaciones mineras involucra una serie de procesos que pueden incluir:

- ◆ Inspecciones periódicas para verificar el cumplimiento de los requisitos legales y regulatorios.
- ◆ Muestreo y análisis de suelos, aguas superficiales y subterráneas para evaluar la calidad ambiental y detectar posibles contaminantes.
- ◆ Monitoreo de la calidad del aire para evaluar los niveles de emisiones de partículas y gases.
- ◆ Evaluación de la estabilidad del terreno y las estructuras construidas durante el proceso de cierre.

- ◆ Revisión de los planes de restauración y rehabilitación para garantizar su viabilidad y eficacia.
- ◆ Verificación del cumplimiento de los requisitos legales y regulatorios establecidos para el cierre de minas.
- ◆ Garantía de que las actividades de cierre se lleven a cabo de manera segura para los trabajadores y el ambiente.
- ◆ Asegurar que se implementen medidas adecuadas para mitigar los impactos ambientales negativos.
- ◆ Supervisión de la calidad de las obras de restauración y rehabilitación del área afectada por la actividad minera.

## 6.3. Importancia del control de calidad en el cierre de minas

El control de calidad en el cierre de instalaciones mineras es fundamental por varias razones:

- ◆ Permite verificar que se están cumpliendo los estándares ambientales y de seguridad establecidos.
- ◆ Ayuda a identificar y corregir posibles desviaciones o incumplimientos durante el proceso de cierre.
- ◆ Contribuye a generar confianza y transparencia entre las partes interesadas, incluidos los reguladores, las comunidades locales y los inversionistas.
- ◆ Garantiza que el legado ambiental y social de la actividad minera sea gestionado de manera adecuada y responsable.

Si bien incluir el control de calidad en el cierre de minas no es una práctica habitual, en el futuro se podría transformar en una gran herramienta. Así como el control de calidad se utiliza habitualmente en la construcción de instalaciones o edificios, se podría transformar en una herramienta útil para certificar y asegurar que este proceso se lleve a cabo de manera efectiva y responsable. A través de la implementación de prácticas de control de calidad adecuadas, es posible minimizar los impactos ambientales y sociales asociados al cierre de minas, lo que garantiza la protección a largo plazo de las comunidades y el ambiente.

# VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Australia (2016). *Cierre de minas: Programa de prácticas líderes (leading practice) para el desarrollo sostenible de la industria minera*.

Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, y Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand [ANZECC/ARMCANZ] (2000). *Australian guidelines for water quality monitoring and reporting*. ANZECC/ARMCANZ.

Batley, G. E., Humphrey, C., Apte, S., y Stauber, J. (2003). *A guide to the application of the ANZECC/ARMCANZ water quality guidelines in the minerals industry*. Australian Centre for Minerals Extension and Research.

Consejo Internacional de Minería y Metales [ICMM]. (2008). *Planificación del cierre integrado de minas: equipo de herramientas*. ICMM. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/Planificacion-Cierre-Integrado-ICMM.pdf>

Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (s. f.). *Normas técnicas para diseño ambiental (guías)*. Ministerio de Energía y Minas del Perú. <https://www.minem.gob.pe/publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50>

Freeze, R. A. y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.

Gobierno del Perú (2005). *Reglamento para el Cierre de Minas* (Decreto Supremo N.º 033-2005-EM).

ICASS Consultores (2017a). *Minuta técnica: Análisis y resultados de ensayos de infiltración doble anillo en Planta La Negra*. ICASS Consultores.

ICASS Consultores (2017b). *Nota técnica: Construcción de calicatas Sector Industrial La Negra – P155-NT-10-RevA*. ICASS Consultores.

Instituto de Ingenieros de Minas del Perú (2019). *Resultados*. Instituto de Ingenieros de Minas del Perú. <https://iimp.org.pe/mineria-en-el-peru/resultados>

International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, y Principles for Responsible Investment (2022). *Estándar Global de Gestión de Relaves*.

International Council on Mining & Metals (2018). *Cierre integrado de minas: Guía de buenas prácticas* (2.a ed.). International Council on Mining & Metals.

International Network for Acid Prevention [INAP] (2017). *Global cover system design: Technical guidance document*. INAC.

International Organization for Standardization [ISO] (2001). *ISO 5667-18: Water quality sampling – Part 18: Guidance on sampling of groundwater at contaminated sites*. ISO.

International Organization for Standardization [ISO] (2003). *ISO 5667 - Water quality sampling - Part 3: Guidance on the preservation and handling of water samples*.

International Organization for Standardization [ISO] (2005). *ISO 5667-6: Water quality sampling – Part 6: Guidance on sampling of rivers and streams*. ISO.

Kostiakov, A. N. (1932). *On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration*.

Mine Environment Neutral Drainage [MEND] (1990a). *MEND 4.71 Monitoring acid mine drainage*.

Mine Environment Neutral Drainage [MEND] (1990b). *MEND 4.74 Review of sediments monitoring techniques*.

Mine Environment Neutral Drainage [MEND] (2004). *MEND 2.21.4a Design, construction and performance monitoring of cover systems for waste rock and tailings, Volume 1*.

Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (2016). *Protocolo nacional para el monitoreo de la calidad de los recursos hídricos superficiales* (Resolución Jefatural N.º 010-2016-ANA).

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (s. f.). *Normatividad Especifica Ambiental Sector Energía y Minas: Sub-sector Minero*. <https://www.minem.gob.pe/descripcion.php?idSector=4&idTitular=679>

Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2006). *Guía para la elaboración de planes de cierre de minas*. Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. [https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia\\_cierre.pdf](https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/guia_cierre.pdf)

Ministerio de Energía y Minas [Minem] (2015a). *Resolución Directoral N.º 075-2015-MEM-DGAAM*. Lima, 3 de febrero.

Ministerio de Energía y Minas (Minem). (2015b). *Resolución Directoral N.º121-2015-MEM-DGAAM*. Lima, 4 de marzo.

Ministerio de Energía y Minas [Minem] (2016a). *Resolución Directoral N.º 001-2016-MEM-DGAAM*. Lima, 8 de enero.

Ministerio de Energía y Minas [Minem]. (2016b). *Resolución Directoral N.º 256-2016-MEM-DGAAM*. Lima, 31 de agosto.

Ministerio de Energía y Minas [Minem] (2016c). *Resolución Directoral N.º 286-2016-MEM-DGAAM*. Lima, 27 de septiembre.

- Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2019). *Resolución Directoral N.º 087-2019-MEM-DGAAM*. Lima, 11 de junio.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú [Minem] (2023). *Ley y Reglamento que regula el Cierre de Minas: Ley N.º 28090 y su Reglamento*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/4467449/RCM%202023.pdf?v=1682114450>
- Ministerio del Ambiente del Perú [Minam] (2016). *Manual de buenas prácticas en la investigación de sitios contaminados: Muestreo de aguas subterráneas*. Minam.
- Morales, A. L. (2020). *Ley 20.551 regula el cierre de faenas mineras en Chile. Documento preparado para el proyecto Seminario sobre el fortalecimiento de la gestión legal y la institucionalidad para el cierre y poscierre de minas en la región andina. Comisión Económica para América Latina y el Caribe*.
- Morales, A. L. y Hantke Domas, M. (2020). *Guía metodológica de cierre de minas. Documentos de Proyectos (LC/TS.2020/166)*. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- National Environment Protection Council [NEPC] (1999). *Schedule B (2) guideline on data collection, sample design and reporting*. NEPC.
- O’Kane, M. y Barbour, S. L. (2003). *Predicting field performance of lysimeters used to evaluate cover systems for mine waste. En Proceedings of 6th international conference on acid rock drainage*, Cairns.
- O’Kane, M. y Barbour, S. L. (2006). *Choosing representative climate years for predicting long-term performance of mine waste cover systems. En Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage*, MO.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA]. (2012). *Resolución de Consejo Directivo N.º 016-2012-OEFA/CD*. Lima, 28 de diciembre.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2015). *Resolución de Consejo Directivo N.º 007-2015-OEFA/CD*. Lima, 17 de febrero.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2017). *Resolución Directoral N.º 448-2017-OEFA-DFSAI*. Lima, 27 de marzo.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2018). *OEFA ordenó a Aruntani SAC el cierre del depósito de desmonte y el tajo de la unidad minera Florencia-Tucari en Moquegua*.
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental [OEFA] (2019). *Reglamento de Supervisión*. <https://www.oefa.gob.pe/wp-content/uploads/2019/02/Texto-Reglamento-de-Supervisi%C3%B3n-.pdf>

Philips, J. R. (1957). *The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution.*

Price, W. A. y Errington, J. C. (1994). *ARD guidelines for mine sites in British Columbia.*

Reniers, G., Dullaert, W., y Sörensen, K. (2013). *Quantitative risk management: Concepts, techniques and tools.* Springer Science & Business Media.

Rodríguez, C. y Julca, D. (2020). *Gestión del cierre de minas en el Perú: Estudio técnico-legal sobre el alcance de la legislación peruana en el cierre de operaciones mineras.* Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://minsus.net/Media-Publicaciones/gestion-del-cierre-de-minas-en-el-peru/>

Royal Brinkman (s. f.). *¿Cómo se usan las tiras de pH?* Royal Brinkman. <https://royalbrinkman.es/centro-de-conocimiento/cuidado-del-cultivo/como-se-usan-las-tiras-de-ph>

Schlumberger Water Services Chile (2016). *Resultados de los ensayos de permeabilidad in situ sobre pilas de lixiviación, Minera Centinela.* Schlumberger Water Services Chile.

Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile [Sernageomin] (2015). *Guía metodológica para la estabilidad química de faenas e instalaciones mineras.* Sernageomin.

Soilmoisture Equipment Corp. (2008). *Model 2800K1 Guelph permeameter.* Soilmoisture Equipment Corp.

Standards Australia/Standards New Zealand [AS/NZS] (1998). *AS/NZS 5667.11: Water quality sampling – Part 11: Guidance on sampling of groundwaters.* AS/NZS.

Steffen, Robertson and Kirsten (1989). *Hypothetical curve to determine the number of samples required to characterise geological units.*

United States Environmental Protection Agency [EPA] (1978). *Research Triangle Park.* United States Environmental Protection Agency.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1996). *Sampling ambient water for trace metals at EPA water quality criteria levels.* U.S. Environmental Protection Agency.

United States Environmental Protection Agency [EPA] (s. f.). *National field manual for the collection of water-quality data.*

U.S. Geological Survey (s. f.). *National field manual for the collection of water-quality data.* U.S. Geological Survey.

Yeskis, D. y Zavala, B. (2002). *Ground-water sampling guidelines for Superfund and RCRA project managers.* U.S. Environmental Protection Agency.



**Oefa**

Organismo  
de Evaluación  
y Fiscalización  
Ambiental