

**BUENAS PRÁCTICAS
PARA EL USO DEL AGUA
EN LA INDUSTRIA MINERA**

DE MÉXICO

<https://doi.org/10.24850/b-imta-2021-02>



MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

BUENAS PRÁCTICAS PARA EL USO DEL AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA DE MÉXICO

Coordinadores editoriales

Adrián Pedrozo Acuña

José Agustín Breña Naranjo

Compiladora

Mayrén Alavez Vargas

Autores:

Jorge Humberto Salgado Rabadán

Alberto Güitrón de los Reyes

Alexis Cervantes Carretero



MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA

INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

**BUENAS PRÁCTICAS PARA EL USO DEL AGUA
EN LA INDUSTRIA MINERA DE MÉXICO**

<https://doi.org/10.24850/b-imta-2021-02>

D.R. © 2021, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Av. Ejército Nacional 223, Col. Anáhuac, 11320 Ciudad de México

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Blvd. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso,
62550 Jiutepec, Mor., México

Coordinación de Hidrología
Subcoordinación de Planeación Hídrica

Cuidado de edición: Emilio García Díaz

Coordinación gráfica: Marianella Espinosa Lara

Formación y esquemas: Cinthya Berenice Uribe Osorio y César
Plácido Malvaez. Diseño de portada y formación: Mitzi Alejandra
Estrada Román, Adolfo Remigio Armillas y Ana Lilia Torres García.
Diseño editorial y formación: Paola Olmedo Lara, Valeria Richter
Soriano y Gloria Mary Carmen Ríos Beltrán

Impreso en México / Printed in Mexico

Distribución Gratuita. Prohibida su venta

Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.

Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material
contenido en esta obra, sin fines de lucro y citando la fuente.

CONTENIDO

PRESENTACIÓN DE LA SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES	IX
PRÓLOGO DEL SUBSECRETARIO DE FOMENTO Y NORMATIVIDAD AMBIENTAL.....	XI
MENSAJE DEL DIRECTOR GENERAL DEL IMTA.....	XII
RESUMEN EJECUTIVO.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
GLOSARIO	XXI
1 PROCESOS DE LA INDUSTRIA MINERA.....	2
1.1 Fases de un proyecto minero.....	6
1.1.1 Prospección y exploración.....	6
1.1.2 Diseño y planificación de minas	7
1.1.3 Construcción.....	7
1.1.4 Extracción y beneficio.....	7
1.1.5 Cierre y restauración.....	8
2 PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN.....	10
2.1 Monitoreo hidrológico.....	10
2.1.1 Fuentes de abastecimiento de agua en cantidad.....	10
2.1.2 Calidad de los flujos hidrológicos e hidrogeológicos.....	11
2.2 Monitoreo ecológico.....	12
2.3 Buenas prácticas.....	13
3 DISEÑO Y PLANIFICACIÓN.....	16
3.1 Consumo de agua	16
3.1.1 Estimación del consumo de agua en la unidad minera.....	16
3.1.2 Cálculo de la huella hídrica y ecológica.....	16
3.1.3 Evaluación de la disponibilidad en la cuenca	20
3.2 Buenas prácticas.....	21
4 CONSTRUCCIÓN.....	26
4.1 Infraestructura hidráulica.....	26
4.1.1 Sistemas de tratamiento de aguas.....	26
4.1.2 Infraestructura de control.....	27
4.2 Buenas prácticas.....	28
5 EXTRACCIÓN Y BENEFICIO	32
5.1 Balance hídrico en la unidad minera	32

5.2 Seguridad en el manejo de sustancias químicas.....	33
5.2.1 Monitoreo de la calidad del agua	33
5.2.2 Manejo de residuos líquidos y sólidos	34
5.2.3 Inspección y mantenimiento de la infraestructura de control.....	34
5.3 Autoevaluación de la unidad minera	35
5.3.1 Factor de disponibilidad	35
5.3.2 Eficiencia hídrica	36
5.4 Buenas prácticas.....	37
.....	
6 PROCESO DE CIERRE Y RESTAURACIÓN.....	42
6.1 Plan de cierre.....	42
6.2 Evaluación del riesgo	42
6.3 Buenas prácticas.....	43
.....	
7 RECOMENDACIONES	48
.....	
REFERENCIAS.....	52
.....	
ANEXO 1	60
.....	
ANEXO 2.....	62
.....	
ANEXO 3	64
.....	
ANEXO 4	72
.....	
ANEXO 5	74
.....	
ANEXO 6	76
.....	
ANEXO 7	78
.....	
ANEXO 8	80

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. Densidad de estaciones de monitoreo de la calidad del agua recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial	11
TABLA 2.2. Variables para evaluar la fase de prospección y exploración.....	12
TABLA 3.1. Bitácora de la huella hídrica.	18
TABLA 3.2. Variables para evaluar la fase de diseño y planificación.....	21
TABLA 4.1. Variables para evaluar la fase de construcción.	27
TABLA 5.1. Variables a evaluar la fase de extracción y beneficio.	35
TABLA 5.2. Variables a evaluar la fase de extracción y beneficio.	36
TABLA 6.1. Variables para evaluar la fase de cierre y restauración.	43
TABLA 7.1. Integración de variables de diagnóstico por cada fase y tema.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo conceptual de los procesos en la industria minera.....	4
Figura 1.2. Fases de un proyecto minero.	6
Figura 5.1. Balance hídrico de los procesos de la producción minera.	32

PRESENTACIÓN



Nuestro planeta está en crisis. La generación de riqueza y bienestar a costa de nuestro territorio, su biósfera y sus pueblos originarios ha traído costos ambientales y sociales de gran envergadura. Desequilibrios hídricos, pérdidas irreversibles en la biodiversidad, degradación de ecosistemas terrestres y acuáticos así como impactos negativos en la salud de las poblaciones locales son algunas de las consecuencias provocadas por las industrias extractivas a lo largo de los siglos.

La huella ambiental de este tipo de industrias, como lo es la minería, ha estado recientemente bajo escrutinio público y privado, y si bien la incorporación gradual de ciertas tecnologías para disminuir la huella ecológica, energética e hídrica han sido bien recibidas, la magnitud a la cual la minería se ha expandido en las últimas décadas sigue siendo un tema de controversia a nivel internacional.

Es así como en otros países se han empezado a promover mejores prácticas referentes a la planeación y gestión hídrica para proyectos mineros con el objetivo de proveer bienestar social y económico a las comunidades locales, así como garantizar la sostenibilidad ambiental de cuencas y acuíferos. Las buenas prácticas en gestión del agua del sector minero constituyen un nuevo paradigma en nuestro país cuyos objetivos consisten en minimizar riesgos de ingobernabilidad hídrica así como en revertir los daños provocados a los ecosistemas, sistemas hídricos y poblaciones afectadas por la actividad minera.

Desde la SEMARNAT, estamos invitando a la industria minera de México para que acelere la adopción de las mejores prácticas en materia hídrica y en responsabilidad socio-ambiental. Como parte de la transformación del sector ambiental creemos firmemente en que este nuevo paradigma debe y puede ser implementado de manera conjunta entre el gobierno, el sector privado y la sociedad civil en los próximos años.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
María Luisa Albores González

PRÓLOGO



La minería en México tiene una larga tradición que ha impactado la vida cultural y social, así como el medio ambiente. Sus expresiones van desde la minería de “los tontos” o “de los placeres”, que se realizaba a través del lavado de la arena con agua, por medio de un simple balde a orillas de un río; pasando por el beneficio de patio que precisaba la molienda para triturar el mineral y el uso de batanes y martinetes, los cuales se movían con la fuerza de los ríos; hasta la minería por el proceso de cianurización, que, en sus distintas modalidades, hace uso y aprovechamiento del agua.

No toda tradición es rescatable, ni social ni ambientalmente. De sobra son conocidos los horrores del repartimiento, y sus consecuencias en la disminución de la población, y de la rotura de presas como la del Xotol.

Por eso, el gobierno de México tiene como objetivo plantear una nueva relación con la minería, en la cual se ponga al centro a las comunidades, sus hombres y mujeres, así como sus aspiraciones, preocupaciones y necesidades mediante consultas públicas previas e informadas y adecuadas culturalmente. Asimismo, plantea una adecuada regulación ambiental de la actividad minera, incluyendo, entre uno de los elementos más importantes, el cuidado del agua.

De ahí la importancia del trabajo que hoy presenta el IMTA, el cual ofrece una serie de buenas prácticas para discutir, implementar y evaluar la actividad minera.

Subsecretario de Fomento y Normatividad Ambiental
Tonatiuh Herrera Gutiérrez

MENSAJE

Esta publicación sobre el uso del agua en la industria minera de México tiene como propósito promover las mejores prácticas referentes a la planeación y gestión hídrica de esta industria, con el fin de garantizar la sustentabilidad ambiental de cuencas y acuíferos en nuestro país. Es una iniciativa que constituye una nueva forma de relación entre el sector privado, el gobierno y la sociedad, a fin de reducir los riesgos de conflictos hídricos derivados de esta actividad económica.



El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), como la inteligencia hídrica del Gobierno de México, provee este documento como parte de la urgente transformación hídrica del país, a fin de dotar de las vías necesarias para la generación de riqueza bajo un lente de responsabilidad ambiental e hídrica. Avanzamos así en la construcción de un ecosistema de cooperación entre la industria y el gobierno, para hacer del agua el motor de bienestar social y de desarrollo económico equitativo en nuestro país.

**Director General del Instituto Mexicano
de Tecnología del Agua**
Adrián Pedrozo Acuña

RESUMEN EJECUTIVO



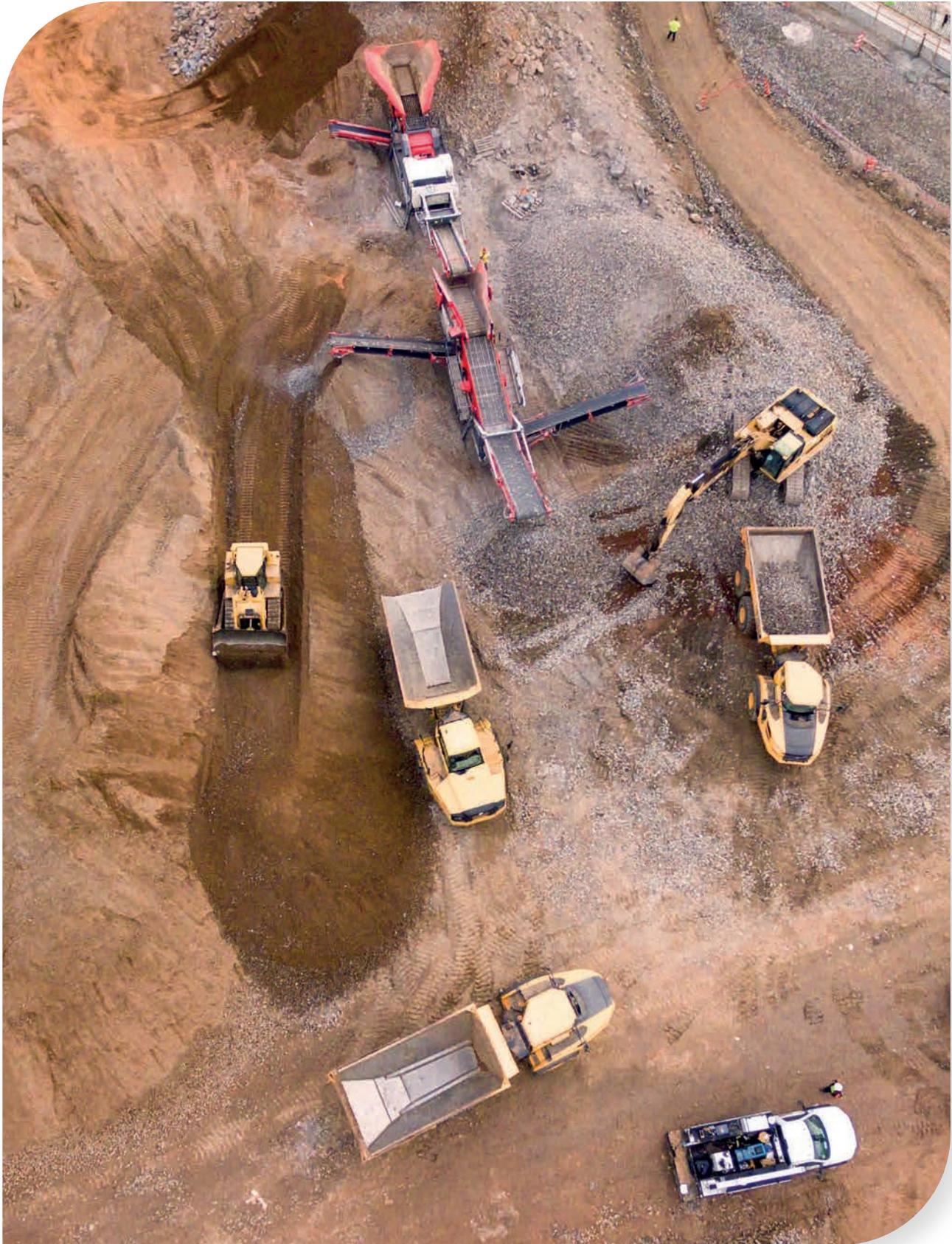
La industria minera metalúrgica en México contribuye con el 8.2 % del Producto Interno Bruto (PIB) industrial y el 2.4 % del PIB nacional (Inegi, 2018). Esta riqueza, sin embargo, tiene costos sociales y ambientales en los sitios donde se desarrolla. Una empresa sin responsabilidad sobre los impactos que genera compromete su credibilidad, prestigio y apoyo por parte de las autoridades, los mercados y la sociedad civil, los cuales son cada vez más exigentes en la implementación de medidas para la protección del medio ambiente. El presente trabajo es un primer ejercicio para orientar la gestión responsable de los recursos hídricos dentro de una unidad minera y reducir el impacto de sus emisiones residuales al medio ambiente.

No se puede mejorar lo que no se mide, de manera que este libro propone métricas que se aplican en las fases de un proyecto minero, desde su exploración y diseño, hasta el cierre y abandono de sus actividades, las cuales tienen su base en la caracterización de la cantidad y calidad de agua consumida y desechada en el proyecto.

Se inicia con una descripción de las fases de un proyecto de minería metálica, para cada una de las cuales se proponen evaluaciones de las condiciones en que se encuentra un proyecto minero o una mina en operación, con el propósito de establecer una línea base respecto a la cual identificar las acciones que permitan eficientar el uso de agua en los procesos y de monitorear la evolución de la cantidad y calidad de los cuerpos de agua en el área de influencia, ya sea como fuentes de abastecimiento o de descarga de las aguas residuales.

Se hacen aportaciones innovadoras, como la evaluación de la huella hídrica de los productos mineros y el monitoreo del área de influencia de la unidad minera.

Las buenas prácticas propuestas en este documento no son vinculantes; sin embargo, apelan al interés de las industrias mineras de mejorar sus prácticas para reducir sus impactos negativos en el ciclo del agua y en el medio ambiente durante el periodo de vida de la unidad minera.





INTRODUCCIÓN



El 19 de noviembre de 2020, durante la inauguración del Foro Virtual de Agua y Minería en México: desafíos para una gestión integrada de agua y territorio, organizado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, María Luisa Albores, estableció la posición que orienta la toma de decisiones en materia ambiental en la actual administración: colocar en el centro la vida, tanto de las personas como de las otras especies con las que compartimos los territorios. En México se sobreponen las riquezas biológica, cultural y de materias primas, de manera que el cambio de paradigmas extractivistas en pos de las intervenciones éticas del ambiente con responsabilidad cobra mayor relevancia hoy más que nunca, como alerta también el informe más reciente del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático¹.

En su *Informe anual 2021*, la Cámara Minera de México² reportó que nuestro país es uno de los diez productores más importantes del mundo de 17 metales y minerales. La extracción de oro, cobre, plata, zinc y hierro aporta 85 % del valor de la producción metalúrgica nacional procedente, casi en igual proporción (82.6 %),

1. *Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, disponible en <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/#FullReport>

2. *Informe anual CAMIMEX 2021*, disponible en https://www.camimex.org.mx/application/files/2916/3095/7239/info_2021.pdf



de los estados de Sonora, Chihuahua, Durango, Zacatecas y Guerrero. Estas cinco entidades federativas presentan actualmente valores de medios a extremadamente altos en los indicadores de riesgo hídrico global, según los datos más recientes del Instituto de Recursos Mundiales³.

La actividad minera implica cierto grado de alteración de la cuenca intervenida, debido a la remoción de la cubierta vegetal, desviación o represamiento de los ríos y modificación de la topografía, entre otros. Estas modificaciones impactan la cantidad y calidad del agua que fluye en la superficie y de manera subterránea, lo cual desencadena desequilibrios ecológicos, ambientales y sociales que se manifiestan en la generación de conflictividad entre las comunidades locales, las empresas y las instituciones gubernamentales involucradas en el área. Esta situación puede derivar en una crisis de gobernanza del agua, con la radicalización de los diferentes actores en defensa de sus intereses, así como el desgaste del tejido social y el deterioro ambiental. Por otro lado, la actividad minera conlleva riesgos asociados a las obras de extracción y a los depósitos de sus residuos que, de no manejarse adecuadamente, pueden incrementar los pasivos ambientales una vez que la mina cierre (Lewinsohn *et al.*, 2017). Estos pasivos pueden llegar a tener costos considerables, dependiendo del tamaño, la localidad, la naturaleza de la contaminación y los recursos que fueron afectados (Saade, 2014). La deuda provocada por los pasivos ambientales difícilmente puede ser absorbida por los gobiernos, principalmente en países del Sur global, como es el caso de México.

Las buenas prácticas en la minería

Las buenas prácticas se refieren a las acciones que contribuyen a reducir los impactos negativos de una actividad productiva. En el caso particular de las industrias mineras, las buenas prácticas tienen antecedente en el proyecto Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable, realizado por el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y el Desarrollo (IIED, por sus siglas en inglés) a solicitud de grandes empresa mineras, el cual tuvo como objetivo identificar la mejor manera en que la minería y los minerales pueden contribuir a la transición global hacia el desarrollo sustentable (IIED, 2002).

³ Atlas de riesgo hídrico, disponible en <https://www.wri.org/aqueduct>

Las buenas prácticas en la industria minera son una serie de pautas con el objetivo de asegurar condiciones favorables para la explotación de recursos minerales (Saade, 2014) desarrollando sus actividades en forma responsable para respetar y proteger su entorno. Estas buenas prácticas pueden clasificarse en tres grupos: a) legal y regulatorio, b) institucional y c) fiscal, en donde los aspectos ambientales son incluidos en las categorías a) y b) (De Sa y Espinasa, 2018). En la perspectiva europea, las buenas prácticas son las actuaciones individuales, tanto en la actividad profesional como en otros ámbitos vitales, orientadas por el respeto al medio ambiente (Ministerio Español de Trabajo y Asuntos Sociales *et al.*, s. f.). Para Chaparro (2007), las buenas prácticas mineras involucran la participación de las comunidades, la vinculación de la industria con las poblaciones, el cuidado del medio ambiente y la creación de nuevas oportunidades de desarrollo.

Muchas empresas mineras internacionales orientan las buenas prácticas hacia la vertiente social, para involucrar a las comunidades afectadas de una manera más activa en la toma de decisiones, tanto en la etapa previa al inicio de los proyectos como en el desarrollo de los mismos, e incluso en la etapa poscierre (Saade, 2014). En México, el corporativo Peñoles relaciona las buenas prácticas con la gestión de residuos industriales líquidos mineros, como son los efluentes generados por la lixiviación natural de los restos o materiales estériles traza depositados, los efluentes generados por el escurrimiento de la mina y las aguas residuales producto del beneficio del mineral (Chaparro, 2007). De acuerdo con el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés) las buenas prácticas para la minería y la biodiversidad requieren ir más allá de la legislación, poniendo el énfasis en la construcción de relaciones sustentables a largo plazo para lograr una participación efectiva de los grupos de interés, de manera que dichas relaciones constituyan inversiones a largo plazo (ICMM, 2006). Estas recomendaciones pueden aplicarse en temas ambientales, particularmente en el del agua.

Hacia la tutela del agua

En materia hídrica, el cambio de paradigma propone transitar de una gestión del agua a escala de la unidad de aprovechamiento hacia un esquema de tutela del agua a escala de cuencas y acuíferos. Esto significa que la responsabilidad empresarial trascien-

da criterios de eficiencia convencionales (funciones de eficiencia y de balance) a favor de internalizar externalidades negativas y aumentar las externalidades positivas para colaborar con los Estados, la sociedad civil, la academia y el ambiente; no solo para contribuir al bienestar social, económico, ecológico e hídrico de las cuencas y los acuíferos, sino para aumentar nuestras capacidades de adaptación ante el cambio climático generalizado, rápido e intensificado que actualmente impera.

En América Latina existen pocos datos publicados sobre la eficiencia y la productividad evaluados a escala de mineral extraído, de unidad minera, de empresa y de la relación de estos parámetros con los balances de la cantidad y calidad del agua y con el ambiente de las cuencas y los acuíferos.

En este panorama, la implementación de buenas prácticas hídricas con responsabilidad socioambiental en México está condicionada por la incorporación de herramientas prácticas de medición y monitoreo, la transformación de los paradigmas de aprovechamiento vigentes y el análisis contextualizado a diferentes escalas.

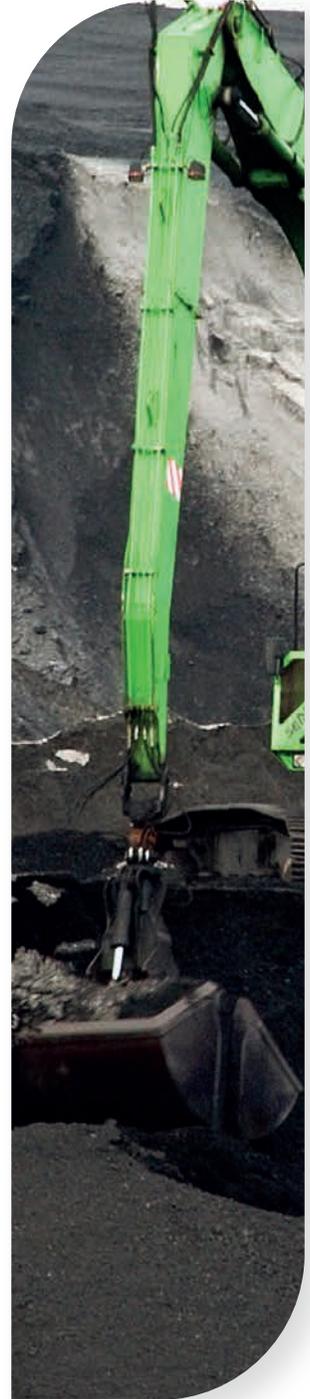
Con el propósito de contribuir a este cambio de paradigma se proponen las presentes *Buenas prácticas para el uso del agua en la industria minera de México*, no de manera vinculante al marco normativo vigente, sino como un llamado al interés de las industrias mineras de mejorar sus prácticas para reducir sus impactos negativos en el ciclo del agua, en el medio ambiente y en las poblaciones humanas durante el periodo de vida de la unidad minera. Este documento es un material para abrir diálogos con las empresas mineras activas en el territorio mexicano, así como con otros actores involucrados, para establecer colaboraciones y probar en campo las orientaciones que aquí se proponen. En una segunda versión se mejorarán todos los aspectos que se identifiquen como perfectibles.

Este documento es una invitación al usuario a pensar que los límites exigidos por las leyes mexicanas en materia de manejo de agua son el mínimo deseado, pero que se aspira a mucho más para que México siga siendo referente en América Latina.

Acerca de este libro

Su objetivo es proporcionar una guía para caracterizar, diagnosticar y mejorar la operación de las unidades y los proyectos mineros en términos del uso del agua. Se proporcionan herramientas para la identificación técnica de variables para la caracterización de una unidad minera y de la cuenca o acuífero donde se pretenda implementar. Asimismo, se propone una métrica para diagnosticar la operación de la unidad minera en sí misma y en relación con la cantidad y la calidad del agua usada por esta industria y su impacto en el balance hídrico de la región donde se lleva a cabo esta actividad. Se proponen métricas para evaluar la disponibilidad, la eficiencia y el riesgo.

La información se estructura de acuerdo con las fases de la vida de un proyecto minero, de manera que, además de la información relevante correspondiente a cada una de ellas, se incorporan las recomendaciones de buenas prácticas específicas para cada fase. Los capítulos se describen a continuación:



Se inicia con la identificación de los procesos de la industria minera y las fases de la vida de un proyecto en este primer capítulo. El capítulo dos se enfoca en la prospección y exploración, etapa en la que son fundamentales el monitoreo de fuentes de abastecimiento de agua, la evaluación de los flujos hidrológicos e hidrogeológicos, el monitoreo ecológico y las buenas prácticas recomendadas para esta etapa inicial. En el capítulo tres se desarrollan aspectos relacionados con el diseño y la planeación, se consideran la evaluación de la disponibilidad en la cuenca y la estimación del volumen anual de agua consumida en las operaciones mineras, variables que aportan elementos para determinar la huella hídrica de cada metal. En el capítulo cuatro, correspondiente a la fase de construcción, se presenta información relacionada con la Infraestructura hidráulica, particularmente aquella referente a los sistemas de tratamiento de agua y la Infraestructura de control. El quinto capítulo describe la etapa de producción, y se enfoca en los usos del agua y en los materiales de apoyo para realizar una evaluación del manejo del agua en la unidad minera en función de los instrumentos de planeación, la infraestructura hidráulica instalada y el monitoreo del agua en cantidad y calidad a través de los diferentes procesos de la producción minera. La sexta parte se centra en el cierre y la restauración de la unidad minera a través del plan hidráulico de cierre. Se concluye con recomendaciones y hallazgos encontrados en el desarrollo del manual.

Es importante reiterar que el objeto de este libro es el uso del agua en la actividad minera, por lo que en cada tópico donde existe una normativa mexicana aplicable a determinando parámetro, esta se menciona como referencia al lector. Sin embargo, incluir la totalidad de los aspectos ambientales relacionados está fuera del alcance de este documento.

La experiencia mundial demuestra que la existencia de obligaciones legales para aplicar buenas prácticas, entre las que destaca la implementación de planes de cierre oportunos financiados adecuadamente, evitaría lamentables consecuencias para los gobiernos, que han tenido que invertir recursos significativos para mitigar los impactos ambientales e indemnizar por daños (Tarango y Cobos, 2020). Las acciones preventivas y correctivas para el manejo adecuado y oportuno de las fases de la unidad minera son determinantes para la gestión del riesgo de desastres.

No obstante, es pertinente insistir en que este documento no emerge de las directrices del marco normativo vigente, sino de la necesidad de generar el cambio de paradigma descrito en las secciones anteriores para fomentar el uso responsable, racional y eficiente del agua en las unidades mineras y en las regiones donde se realiza esta actividad productiva. Esta transformación tiene correspondencia con el interés de las empresas de reducir sus impactos negativos y asegurar la sostenibilidad financiera, ambiental y social de la unidad minera a lo largo de su ciclo de vida, toda vez que relaciona las buenas prácticas en la operación de la unidad minera con las buenas condiciones de la cuenca y sus componentes.



GLOSARIO



Para fines del presente documento se aplican las siguientes definiciones:

Agua fresca. Agua que se adiciona al sistema para recuperar el volumen de agua que se pierde debido a la evaporación, la infiltración y las fugas, entre otras causas.

Agua nativa. Agua que se encuentra en condiciones naturales antes de la instalación de una mina.

Buenas prácticas. Acciones definidas con la participación de los involucrados, estableciendo vínculos con la industria y la población, el cuidado del medio ambiente y la creación de nuevas oportunidades de desarrollo.

Residuos mineros. Son aquellos materiales sólidos, acuosos o en pasta provenientes de las actividades de la exploración, la explotación y el beneficio de minerales o sustancias.

Estabilización química. Proceso que consiste en agregar material ajeno al jal que reduce el potencial de generación de drenaje ácido del mismo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

Galería. Obra minera subterránea.

Jales. Residuos acuosos generados en las operaciones primarias de separación y concentración de minerales (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

Ley. Es el grado de concentración de minerales valiosos presentes en un yacimiento.

Lixiviado. Líquido proveniente de los residuos debido a la reacción química, arrastre o percolación y que contiene componentes que se encuentran en los mismos residuos, ya sea disueltos o en suspensión.

Minería subterránea. Explotación de recursos mineros que se desarrolla por debajo de la superficie del terreno (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Minería superficial o a cielo abierto. Excavación a cielo abierto empleada para la extracción de recursos minerales (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

Planta de beneficio. Lugar donde se realizan los trabajos para la preparación, el tratamiento y la concentración de productos minerales o sustancias para elevar la concentración y pureza de sus contenidos (Cámara de Diputados, 2014).

Presa de jales. Obra de ingeniería para el almacenamiento o disposición final de los jales, cuya construcción y operación ocurren simultáneamente (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2003).

Riesgo ambiental. Es la posibilidad de que se produzca un daño en el medio ambiente debido a un fenómeno natural o a una acción humana. (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, s. f.).

Unidad minera. Delimitación geográfica, amparada por una concesión minera, en la que se desarrollan un conjunto de obras para la exploración, explotación y beneficio de minerales, así como para la disposición final de los residuos mineros.





PROCESOS DE LA INDUSTRIA MINERA



1 PROCESOS DE LA INDUSTRIA MINERA

A diferencia de los procesos industriales de operación fabril, en los que la materia prima se somete a una serie de cambios y transformaciones desde su ingreso a la planta productiva hasta convertirse en producto terminado, los procesos de extracción de metales de la industria minera requieren de procesos que operan simultáneamente para entregar como producto metales refinados; ejemplos de estos son el oro, la plata, el plomo, el zinc, el cobre, el carbón, el mineral de hierro, entre otros.

La explotación de minerales se divide en dos grupos: minerales metálicos y minerales no metálicos. Los métodos de explotación de minerales metálicos se clasifican, a su vez, en dos grupos: la minería a cielo abierto y la minería subterránea. La minería superficial va en aumento debido al incremento en su rentabilidad basada en el desarrollo de tecnologías en equipos de movimiento de tierras, con los que se reducen los costos en la remoción de grandes cantidades de mineral y se soluciona el problema de agotamiento de yacimientos de alta ley, pues al aumentar la capacidad de remover mayor cantidad de mineral para extraer la misma cuantía de metal se incrementa la rentabilidad de explotar yacimientos de baja ley. En ambos métodos de explotación los procesos de beneficio son similares: el mineral es procesado en plantas de trituración, molienda, concentración y refinación (figura 1.1).

Este documento se enfoca en la explotación de minerales metálicos, debido a que sus procesos implican un mayor consumo de agua.





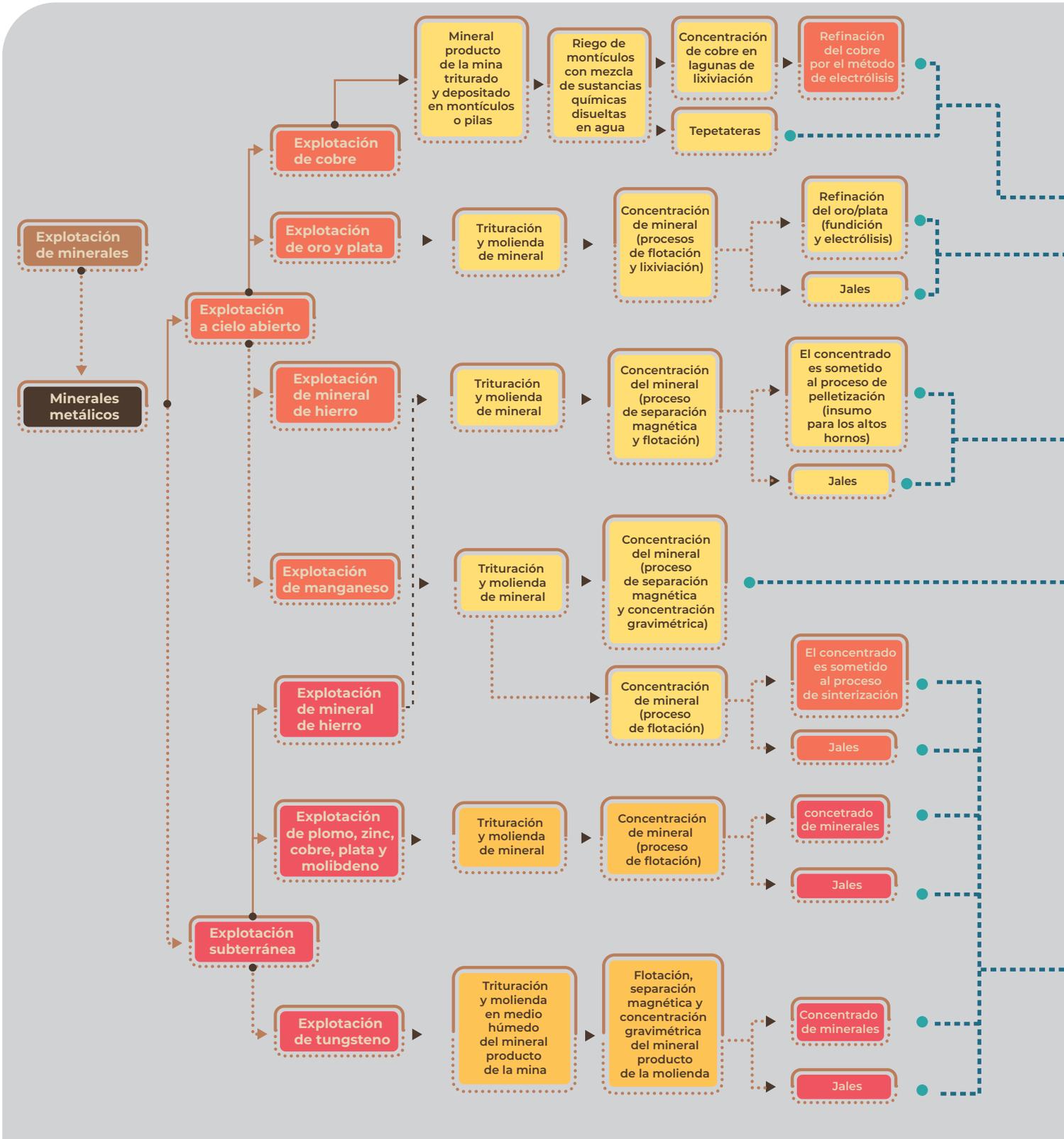
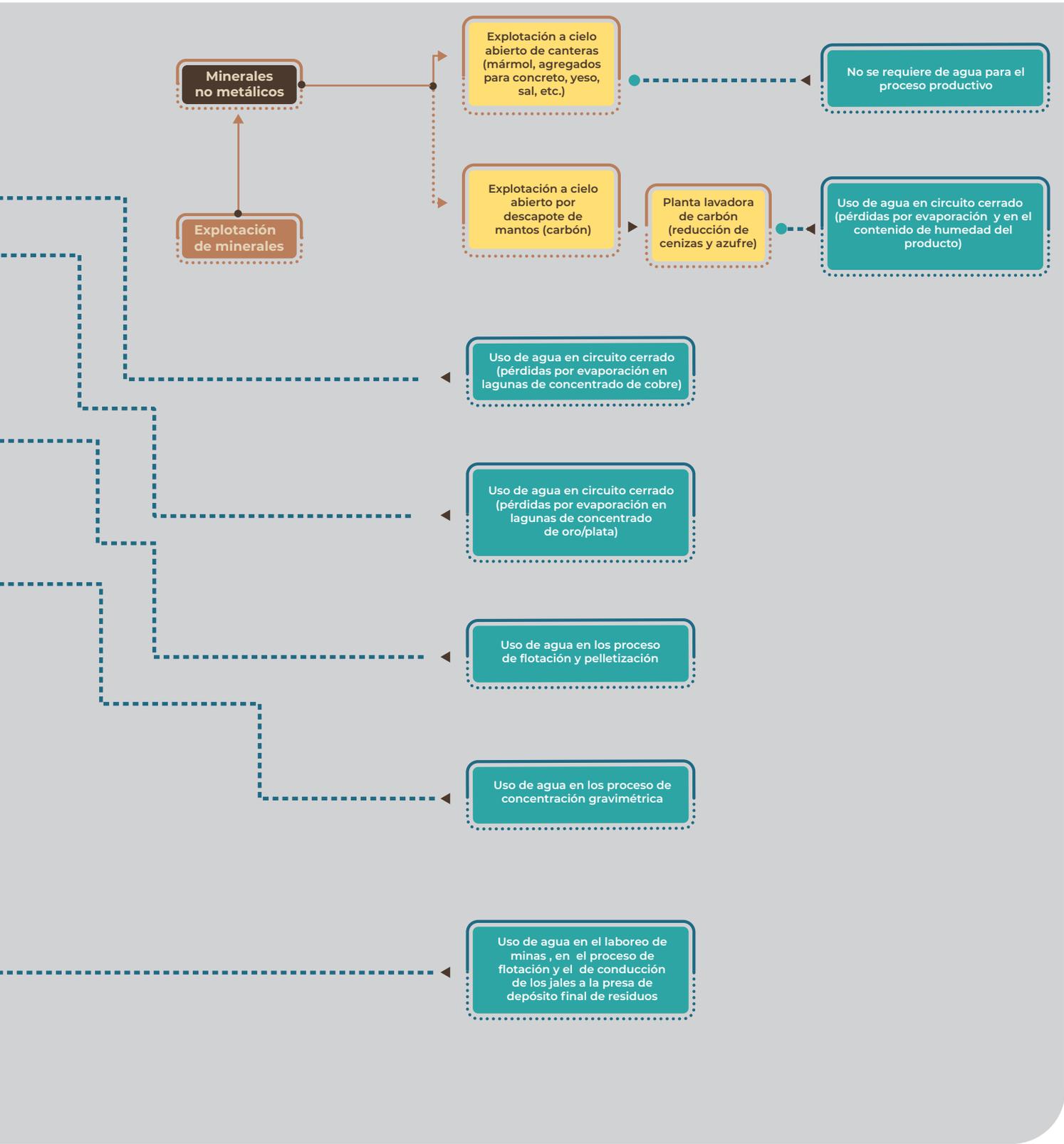


FIGURA 1.1. Modelo conceptual de los procesos en la industria minera.

Fuente: *Elaboración propia.*



1.1 Fases de un proyecto minero

El ciclo de vida de una mina puede durar entre 13 y 50 años, independientemente de las inversiones que se realicen en cada fase (Harraz, 2010). De acuerdo con Morgan (2020), este ciclo de vida puede dividirse en cinco fases: 1) prospección y exploración, 2) diseño y planificación, 3) construcción, 4) operaciones (extracción y beneficio) y 5) cierre de la mina y restauración (figura 1.2).

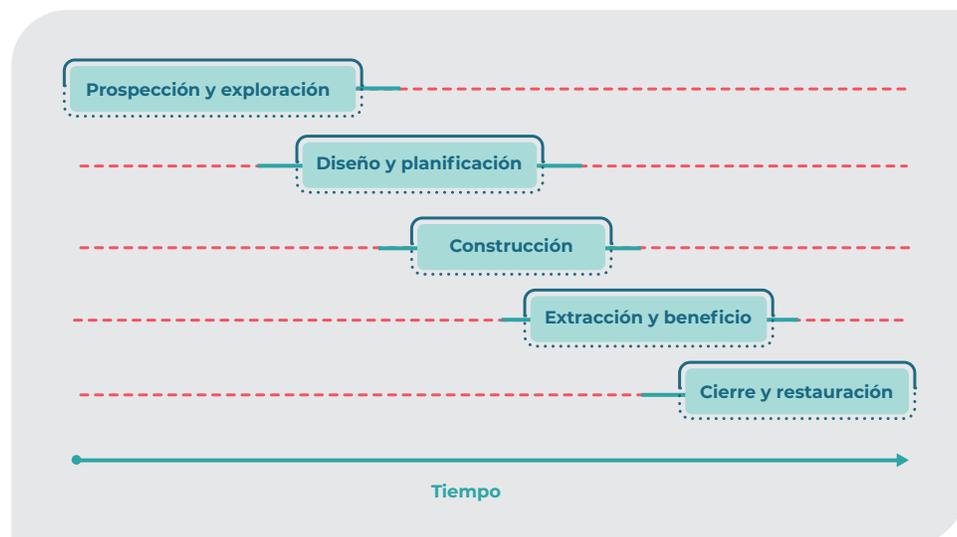


FIGURA 1.2. Fases de un proyecto minero.

Fuente: *Elaboración propia, con información de McLemore et al. (2009).*

1.1.1 Prospección y exploración

Los procesos de prospección y exploración son realizados por las empresas mineras en grandes extensiones territoriales, y consisten, entre otras actividades, en realizar mapeos geológicos; levantamientos topográficos y reconocimientos geofísicos que no requieren apertura de caminos ni apertura de trincheras; muestreos geológicos y geoquímicos; análisis de laboratorio, y análisis geoestadísticos. En la etapa de prospección se realiza el reconocimiento general del yacimiento mineral. Con estas tareas se busca detectar y ubicar anomalías y sitios favorables para la mineralización, así como zonas con probables yacimientos potenciales para la segunda etapa de exploración (Ministerio de Producción y Trabajo, 2019).

La etapa de exploración consiste en hacer un reconocimiento detallado del depósito mineral. Comprende actividades tales como la recolección de la información ambiental básica, la evaluación del uso de tierra y agua; la diversidad biológica; la revisión de cartografía geológica; la realización de perforaciones para la obtención de muestras; los análisis geoestadísticos, la caracterización geoquímica de roca, suelo, agua o medios biológicos; los estudios geofísicos y de percepción remota; fotografía aérea, entre otros (McLemore *et al.*, 2009). La exploración es crucial para la planificación, pues con los análisis preliminares, tanto de la información geológica obtenida como con de los requerimientos tecnológicos para la futura explotación, se realiza la primera evaluación económica del yaci-

miento y constituye el primer paso para determinar si se ejecutará el desarrollo de la mina. Asimismo, es la etapa para analizar y evaluar los posibles impactos ambientales y sociales, por lo que es conveniente que durante esta etapa se establezcan los primeros contactos con los diferentes grupos de interés para su inclusión en el diseño de planes adecuados de implementación y gestión para el ciclo de vida de la mina (Ministerio de Producción y Trabajo, 2019).

1.1.2 Diseño y planificación de minas

El diseño y planificación consiste en la realización de estudios para determinar la seguridad, la viabilidad ambiental y económica y la responsabilidad social de un proyecto minero. Estos estudios pueden basarse en recursos minerales medidos, indicados o inferidos, o en una combinación de estos. Esta etapa incluye un estudio de prefactibilidad basado en un análisis financiero sobre las consideraciones mineras con supuestos razonables, referentes a condiciones técnicas, económicas, ambientales, sociales, comerciales, legales y gubernamentales, así como el análisis de cualquier otro factor que sea relevante, suficiente para que la empresa determine si todo o parte del recurso mineral puede ser clasificado como reserva mineral.

El estudio de factibilidad considera la planificación y diseño de la mina, partiendo de un estudio detallado de su construcción, la extracción mineral y la proyección futura según las especificaciones del mercado. Se incluyen los estudios para la disposición final de los residuos que se generan, incluyendo los jales, el potencial de generar drenaje ácido y la posible liberación de elementos potencialmente tóxicos, además de acciones que se tendrán que implementar para evitar, reducir o mitigar estos problemas durante la operación y el cierre de la mina. Finalmente, se incluye en el estudio de factibilidad la cantidad y calidad del agua utilizada durante su funcionamiento y el posible tratamiento del agua residual (McLemore *et al.*, 2009).

En el estudio de factibilidad se consideran los detalles del cierre y de la rehabilitación de la zona del proyecto, incluyendo elementos ambientales, sociales, económicos y los impactos que éstos conllevan. Se debe contar con información suficiente para hacer un cierre adecuado y anticipar las futuras consecuencias al medio ambiente, los usos futuros del terreno, la salud y la seguridad de las comunidades

humanas vecinas, la viabilidad económica del proyecto y la aprobación de su financiamiento.

La responsabilidad social ha adquirido mayor relevancia en las últimas décadas, toda vez que al fortalecer los esfuerzos de responsabilidad social corporativa se innova en el desarrollo de estrategias para incrementar los beneficios a las comunidades afectadas (ICMM, 2006).

1.1.3 Construcción

El proceso de construcción ocurre después de que la investigación, los permisos y las autorizaciones estén completos. En esta etapa se desarrolla la infraestructura en los sitios mineros, que consiste en la construcción de las instalaciones de la mina y el acondicionamiento de los equipos para el desarrollo de la actividad minera (extracción, procesamiento y transporte de minerales y transformación). También implica la construcción de instalaciones auxiliares (comedores, oficinas, campamentos, talleres), caminos de acceso y otra infraestructura necesaria. Durante esta etapa se toman decisiones que influirán en el futuro desmantelamiento y en las obras de cierre de la mina (Secretaría de Política Minera y Ministerio de Producción y Trabajo, 2019).

En esta etapa también se desarrollan los sistemas de gestión ambiental que incluyen procedimientos organizativos, responsabilidades y procesos para cumplir con las políticas ambientales corporativas en el marco de las regulaciones ambientales vigentes o de los estándares de referencia en los ámbitos de competencia identificados (ICMM, 2006).

1.1.4 Extracción y beneficio

El minado, superficial o subterráneo, está determinado principalmente por las características del depósito mineral y los límites impuestos por las condiciones de seguridad, tecnológicas, medioambientales y económicas. Por lo tanto, el desarrollo de obras en una mina puede consistir en tajos a cielo abierto, galerías y túneles. Una descripción detallada de estas obras puede consultarse en López (1994).

Los procesos en esta fase de producción, de manera general, pueden enumerarse en cuatro etapas: a) extracción del mineral de la mina y transporte a la planta de beneficio, b) trituración y molienda, los cuales se realizan en medio acuoso para obtener un

lodo con una granulometría adecuada para liberar el mineral del material estéril, c) concentración de minerales en la que se somete el lodo a procesos físico-químicos para separar y concentrar los minerales para obtener como producto una pasta con alta concentración mineral, y d) refinación, que implica el tratamiento del concentrado mineral con métodos de fundición o electrodeposición para obtener los metales de alta pureza en barras y lingotes como producto final (Drzymala, 2007).

En esta fase se incluyen las rehabilitaciones progresivas, los cambios operativos y las expansiones de las plantas previstas en la planeación. Cambios en la propiedad o en los alrededores pueden justificar la implementación de estrategias de gestión diferentes. Tal como se considera desde la etapa de planeación, en la etapa de producción se implementan acciones preparatorias para facilitar el cambio de uso de suelo posterior a la explotación minera, se actualizan las estimaciones financieras respecto a la asignación progresiva de recursos y a los cálculos iniciales y se fortalecen las relaciones con las comunidades y grupos de interés.

1.1.5 Cierre y restauración

La quinta y última fase de las operaciones mineras es el cierre y la restauración del sitio, una vez que el yacimiento mineral ha agotado sus reservas. En la etapa de cierre se desmantelan todos los equipos e instalaciones de la mina y las plantas procesadoras, y se implementan las acciones previstas en el plan de cierre previamente elaborado y aprobado por las autoridades correspondientes. El objeto de estas acciones es mitigar, compensar o restaurar los impac-

tos ambientales y sociales que se mantienen una vez que la explotación de la mina finaliza. Muchas de las tareas de cierre pueden comenzar durante la etapa de explotación de la mina, lo más común es que se realice al término de la explotación. El cierre de una mina puede ocurrir por diversos factores: por agotamiento del yacimiento o por condiciones operativas o financieras, entre otras. Independientemente de cuál sea el motivo, el cierre no se realiza con el abandono del sitio minado, sino de forma ordenada siguiendo la implementación progresiva del plan de cierre previsto que garantice la seguridad humana y ambiental, dejando el terreno en condiciones ambientales aceptables para usos posteriores y dando respuesta a todos los grupos de interés externos e internos (Ministerio de Producción y Trabajo, 2019).

En la etapa de restauración se implementa un programa integral de rehabilitación con objetivos claramente establecidos, que pueden incluir, entre otros y de acuerdo con las particularidades del sitio, los siguientes puntos:

- Garantizar la salud pública y la seguridad
- Minimizar los efectos ambientales
- Eliminar residuos y material peligroso
- Preservar la calidad del agua
- Estabilizar el suelo para evitar la erosión
- Restaurar el suelo y la vegetación

Este proceso es de particular importancia desde el punto de vista ambiental, debido a que el objetivo es restablecer los ecosistemas originales. Esto puede llevar varios años e incluso décadas.



PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN

.....



2

2 PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN

La explotación de los minerales metálicos involucra agua en sus procesos, por lo que, de manera paralela a la prospección y exploración geológica, es fundamental conocer la oferta de agua y sus usos en la zona de interés, para así determinar la disponibilidad y su tendencia durante el periodo de tiempo que se estime la vida de la mina.

2.1 Monitoreo hidrológico

El área de prospección es mucho mayor que la posible área de exploración, por lo que es muy probable que las fuentes de abastecimiento de agua sean la cuenca o acuíferos en los que se ubica el proyecto minero. Una caracterización de la cuenca permite conocer las condiciones iniciales en que se encuentra antes de ser impactada por la actividad minera.

Esta caracterización puede realizarse en términos de la existencia de información referente a estudios hidrológicos de lluvia-escorrentamiento, estudios de disponibilidad de agua superficial y subterránea, estudios hidrogeoquímicos y estudios de calidad del agua.

2.1.1 Fuentes de abastecimiento de agua en cantidad

La medición y el monitoreo de las variables hidrológicas está condicionada por la existencia de infraestructura específica, es decir, estaciones climatológicas, hidrométricas y de calidad del agua. Se requiere contar con una red hidrométrica amplia y con periodos largos de observación. Perevochtchikova y García (2006) sugieren que sea de al menos dos estaciones hidrométricas aguas arriba y dos aguas abajo en el cauce del río principal y una o dos estaciones en cada uno de sus afluentes, dependiendo de la escala de estudio y necesidades específicas de cálculo.

Es necesario establecer una línea base en términos hidrológicos, caracterizar las condiciones hídricas regionales¹ y determinar los puntos de monitoreo de calidad y cantidad de agua, realizando mediciones por lo menos una vez al mes y con una densidad de monitoreo similar a aquellas recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial (2010) (tabla 2.1).



¹ En la última década se introdujeron varios índices de riesgo hídricos que pretenden informar a los sectores privado (inversionistas) y público (tomadores de decisiones) sobre el riesgo hídrico en una ubicación específica. La plataforma Aqeduct generada por el Instituto de Recursos Mundiales se ha convertido en el índice más conocido. Su índice básico de escasez hídrica se basa en una estimación de la relación entre el uso del agua anual y la disponibilidad hídrica. TetraTech proporciona una métrica similar, que también incluye proyecciones de cambio climático.

TABLA 2.1. Densidad de estaciones de monitoreo de la calidad del agua recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial (2010), (área en km² por estación).

Unidad fisiográfica	Precipitación		Evaporación	Escurrimiento	Sedimento	Calidad del agua
	No registrada	Registrada				
Costa	900	9,000	50,000	2,750	18,300	55,000
Montañas	250	2,500	50,000	1,000	6,700	20,000
Planicie interior	575	5,750	5,000	1,875	12,500	37,500
Colinas ondulantes	575	5,750	50,000	1,875	12,500	47,500
Islas pequeñas	25	250	50,000	300	2,000	6,000
Áreas urbanas	-	10-20	-	-	-	-
Árida	10,000	100,000	100,000	20,000	200,000	200,000

Fuente: Organización Meteorológica Mundial, 2010.

Para calificar la infraestructura de medición y monitoreo con base en la densidad en el área de influencia (tabla 2.1) se usa una escala con tres niveles: “alta”, “media” o “nula” (tabla 2.2).

2.1.2 Calidad de los flujos hidrológicos e hidrogeológicos

Las obras mineras de gran tamaño, ya sean superficiales o subterráneas, tienen un efecto directo sobre ríos, arroyos y acuíferos, en los primeros ocasiona cambios en el régimen de escurrimiento, y en los acuíferos provoca variaciones y a veces abatimientos en los niveles piezométricos.

La caracterización de la calidad del agua determina la condición hidrogeoquímica del agua nativa, en especial la de aquellos parámetros directamente asociados a la futura generación de lixiviados derivados de las especies minerales del yacimiento. Se requiere de la integración de una base de datos hidrogeológica durante la fase de exploración minera que considere estudios fisiográficos, pedológicos, geológicos, hidrológicos e hidrogeoquímicos (Kuma *et al.*, 2002).

Los estudios hidrogeoquímicos permiten entender un sistema regional de flujo de una cuenca o de un sistema acuífero con áreas de recarga y descarga dado que la composición química de las aguas sub-

terráneas aporta información sobre el comportamiento hidrológico regional (Appelo y Postma, 2005).

Las concentraciones totales y solubles de los minerales en las muestras de agua son cruciales para el establecimiento de una línea base de la calidad de agua antes de ser impactada por la actividad minera. Algunos de los estándares aplicables en relación con la calidad del agua en el sitio del proyecto son:

- NMX-AA-051-SCFI-2016, Análisis de agua-Medición de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Secretaría de Economía, 2016a)
- NMX-AA-008-SCFI-2016, Análisis de agua-medición de pH en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Secretaría de Economía, 2016b)
- NMX-AA-034-SCFI-2015, Análisis de agua-Medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas (Secretaría de Economía, 2016c)
- NMX-AA-036-SCFI-2001, Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba (Secretaría de Economía, 2001)
- NMX-AA-093-SCFI-2018, Análisis de agua-Medición de la conductividad eléctrica en aguas

naturales, residuales y residuales tratadas-Método de prueba (Secretaría de Economía, 2019)

El monitoreo de la calidad del agua es una actividad constante. La medición continua y periódica permite analizar su evolución e identificar el impacto de las actividades mineras en las fuentes de agua aledañas al proyecto, en especial las que se encuentran aguas abajo.

El diagnóstico de los flujos de aguas superficiales y subterráneos se hará en términos de la variación en los cambios en el régimen de escurrimiento y en la variación de la piezometría. Los estudios hidrológicos se evalúan con una métrica definida como “alta”, “media” o “nula”. El criterio para calificarlos está en función del tipo de modelo lluvia-escurrimiento utilizado en el estudio: para un modelo hidrológico distribuido se le asigna una calificación “alta”, ya que estos modelos demandan mucha más información y representan con mayor precisión la física del proceso lluvia-escurrimiento. Para un modelo hidrológico semidistribuido la calificación asignada sería “media”, y “nula” si existe un modelo hidrológico agregado o no existe un modelo hidrológico (tabla 2.2).

2.2 Monitoreo ecológico

Se recomienda establecer un programa de monitoreo ecológico tanto en sistemas acuáticos como terrestres en el área de influencia a lo largo de la vida del proyecto. Un programa de monitoreo ecológico identifica sitios de muestreo acordes a los compo-

nentes a monitorear, parámetros de medición y se realiza con periodicidad constante a escala de meses, estaciones o años en función del ciclo de vida y de las dinámicas de los sistemas ecológicos presentes en el área de influencia del proyecto minero. Las particularidades de cada sitio determinan la selección de parámetros, el nivel de organización y los métodos más adecuados (Goñi et al., 2006). A manera de ejemplo, en el anexo 1 se describen los parámetros para caracterizar y monitorear poblaciones de fauna; sin embargo, la definición del nivel de organización (poblaciones o comunidades) y los grupos biológicos a considerar deben realizarse caso por caso.

De manera similar al monitoreo hidrológico, se busca generar datos que permitan conocer de manera sistemática la evolución de las condiciones ecológicas y la diversidad biológica presentes, no solo para asegurar su persistencia, sino también para identificar alteraciones de manera temprana, pues el comportamiento de ciertas poblaciones o comunidades biológicas son indicadores de la salud ambiental local.

Con las series de tiempo generadas a lo largo de la vida útil del proyecto minero se tendrá un antecedente valioso para el diseño e implementación del programa de restauración o rehabilitación ecológica del área.

La calificación del monitoreo ecológico se realizará con base en su aplicación y estará definido con un “sí” o un “no” (tabla 2.2).

TABLA 2.2. Variables para evaluar la fase de prospección y exploración.

	Variable	Métrica
Prospección y exploración	Monitoreo de la calidad y cantidad de agua	(Alta / Media / Nula) (2 / 1 / 0)
	Evaluación de los flujos hidrológicos e hidrogeológicos	(Alta / Media / Nula) (2 / 1 / 0)
	Monitoreo ecológico	(Sí / No) (1 / 0)

Fuente: Elaboración propia.

La valoración de esta fase del proyecto está dada por la suma de las tres variables, obteniendo valores dentro del intervalo $0 \leq x \leq 5$.

Las actividades de prospección y explotación llevan entre uno y tres años (Griem-Klee y Griem, 2016). Si la valoración de variables analizadas en el diagnóstico está entre dos y cero, la recomendación es realizar acciones para mejorarla, estas acciones van desde la instalación de estaciones de medición hasta la realización de estudios hidrológicos e hidrogeológicos y de monitoreo ecológico.

2.3 Buenas prácticas

En esta fase inicial es importante la participación inicial y efectiva de los grupos de interés para asegurar espacios de diálogo con el fin de:

- Aclarar los objetivos de la actividad minera propuesta en función de las necesidades y preocupaciones de las comunidades, y los compromisos asumidos por la compañía en torno a la biodiversidad y el agua
- Aclarar los objetivos de la actividad minera propuesta en relación con las directrices de las políticas, planes estratégicos y restricciones legales o de la planificación por parte del gobierno
- Identificar posibles alternativas y aclarar sus méritos en términos de valores de la biodiversidad y el agua (ICMM, 2006)

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés) recomienda algunas acciones clave para lograr una efectiva participación de los grupos de interés, los cuales pueden consultarse en el anexo 2. La comunicación adecuada con las comunidades locales para brindar información precisa contribuye al manejo de expectativas y la prevención de conflictos (Ministerio de Producción y Trabajo, 2019). La información de los proyectos de exploración y sus impactos potenciales deben estar disponibles para los residentes del área, las comunidades afectadas y el público general, en formato y lenguaje apropiado (Miranda *et al.*, 2005).

El código de prácticas ambientales para las minas de metal del gobierno de Canadá (Environment Canada, 2009) refiere las siguientes recomendaciones:

- a.** En términos de gestión del agua, una buena práctica es la elaboración de planes que incluyan una gama completa de actividades relacionadas con la exploración, incluida la adquisición de tierras, levantamientos, acceso, campamentos e instalaciones asociadas, desmonte, excavación de zanjas, perforación y muestreo. Además, las buenas prácticas deben abordar la gestión y la calidad del agua, la gestión de desechos, la alteración del suelo, la calidad del aire, la restauración y el cierre.
- b.** Para atender los impactos ambientales permanentes de la fase de exploración, las compañías mineras deben otorgar garantías financieras para cubrir los costos de la limpieza y restauración, así como el monitoreo y mantenimiento de largo plazo.
- c.** Cuando se hayan concluido las actividades de exploración y la empresa no haya planeado un mayor desarrollo del sitio, se deben eliminar las tomas de agua, alcantarillas, rejas y otras estructuras de vías fluviales. Los vertederos de desechos, los pozos de aguas residuales y de lavado y los pozos de barrenación tendrán que estar debidamente tapados. Todas las áreas que hayan sido alteradas deberán ser revegetadas, rehabilitadas o restauradas ecológicamente.

Estas recomendaciones se retoman en las secciones siguientes.



DISEÑO Y PLANIFICACIÓN



3

3 DISEÑO Y PLANIFICACIÓN

El objetivo del diseño y planificación en términos del uso del agua consiste en estimar su consumo con base en la proyección de producción durante el ciclo de vida del proyecto y evaluar este consumo respecto a la disponibilidad hídrica en las cuencas para asegurar que el desempeño durante el ciclo de vida de la unidad no compita con las necesidades de las comunidades humanas o con el aseguramiento del caudal ecológico.

3.1 Consumo de agua

Dentro de los componentes hídrico y ecológico, los tres aspectos más importantes son los siguientes: 1) estimación del volumen anual de agua consumida en las operaciones mineras, 2) huella hídrica y ecológica, y 3) evaluación de la disponibilidad en la cuenca. Se consideran dos escalas en el diseño y planeación: unidad minera y cuenca hidrológica.

3.1.1 Estimación del consumo de agua en la unidad minera

En esta fase se realiza la estimación del volumen de recursos minerales a extraer bajo la siguiente lógica: con la información obtenida en la fase de prospección y exploración del yacimiento mineral y la interpretación geológica se tienen elementos para la estimación de reservas, las cuales son uno de los principales factores que determinan la viabilidad económica y la decisión final de construir la unidad minera. Con estas reservas se puede estimar la producción anual durante el tiempo de explotación del yacimiento mineral. Con esta información y con el dato de consumo unitario de agua por tonelada de mineral procesado se tiene una primera aproximación del volumen de agua que consumirá la unidad minera durante la vida útil estimada.

3.1.2 Cálculo de la huella hídrica y ecológica

La huella hídrica en la industria minera es el volumen de agua utilizado para producir una unidad volumétrica de metal refinado. Los análisis de la huella hídrica son útiles para comparar la eficiencia de la gestión del agua en las operaciones mineras. Tal como las principales empresas mineras revelan, la huella de carbono asociada a sus actividades y cadenas de suministro como parte de sus métricas de sustentabilidad; lo mismo es aplicable a la huella hídrica (Herrebrugh, 2018).

La huella hídrica de un metal se calcula en términos de la cantidad de agua que demanda la industria minera para dicho metal entre la cantidad de metal producido:



$$HH_{pm} = \frac{V_e + V_m + V_c + V_{ed} + V_f - V_{rs} - V_{rj}}{P_m}$$

Donde:

HH_{pm} = huella hídrica del proceso minero (m³/t)

V_e = volumen de agua en la extracción (m³)

V_m = volumen de agua en la molienda (m³)

V_c = volumen de agua en la concentración (m³)

V_{ed} = volumen de agua en la electrodeposición (m³)

V_f = volumen de agua en la fundición (m³)

V_{rs} = volumen de agua de retorno en el proceso de secado (m³)

V_{rj} = volumen de agua reciclada de la presa de jales (m³)

P_m = producción de mineral m (t)

En el anexo 3 se proporciona mayor detalle para estimar la huella hídrica del proceso minero. Se recomienda elaborar una matriz con un formato similar al que se muestra en la tabla 3.1.



TABLA 3.1. Bitácora de la huella hídrica.

Mina/Operación	Cobertura de datos	Tipo de mina	Proceso configurado	Metales	Extracción										
					Agua subterránea			Agua superficial			Agua marina				
					m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)		
Alumbraera	2005-2012	OC	F	Cu-Au	0.56	0.05	6								
Andina	2003-2016	OC-UG	F	Cu-Mo-Ag	0.33	0.09	5	0.79	0.21	8					
Antamina	2012-2015	OC	F	Cu-Zn-Mo-Ag	0.065	0.004	4	0.46	0.08	2					
Bold mountain	2006-2014	OC	C	Au											
Cañón Bingham	1997-2013	OC	F-S-R	Cu-Mo-Ag-Au											
Black mountain	2012-2013	UG	F	Pb-Cu-Ag-Zn	0.01	0	2	2.96	0.13	2					
Bonikro	2011-2016	OC	C	Au	0.28	0.31	2	0.78	0.5	2					
Grupo Cadia	2006-2015	OC-UG	F	Cu-Ag-Au	0.062	0.017	8	0.77	0.46	9					
Cannington	2000-2010	UG	F	Pb-Ag-Zn	0.67	0.08	11								
Chuquicamata	2011-2016	OC	F-HL-S	Cu-Mo-Ag-Au	0.91		1	1.19	0.03	3					
Cobar - CSA	1999-2016	UG	F	Cu-Ag				1.06	0.19	15					
Cadeco norte	2011-2016	OC	F-HL-S	Cu-Mo-Ag-Au	0.13	0.15	5	0.42	0.08	9					
Callahuasi	2003-2015	OC	F-MH	Cu-Mo-Ag	0.74	0.05	7								
Cortez	2006-2016	OC-UG	HM-C-HL	Au	0.3	0.21	8	1.3	0.24	3					
Cowai	2006-2014	OC	HM	Ag-Au	0.28	0.08	5	0.16	0.13	6					
Cracow	2005-2011	UG	C	Au											
Dariot	2002-2003	OC	C	Au											
El Teniente	2002-2016	OC	F-S	Cu-Mo-Ag-Au	0.14	0.1	5		0.32	8					
Ernest Henry	2003-2012	OC-UG	F	Cu-Au	0.62	0.1	5	1.07	0.13	7					
Escondida	2003-2006	OC	C	Cu-Ag-Au	0.8	0.04	6	0.49			0.039	0.029	3		
Eskay creek	2002-2003	UG	F	Au											
Gabriela Mistral	2012-2016	OC	F	Cu	0.11	0.03	6		0	4					
Golden Grove	2005-2014	OC-UG	C	Pb-Cu-Ag-Au-Zn	0.48	0.73	4	0							
Golden Sunlight	2006-2016	OC	C	Au											
Goldstrike	2008-2016	OC-UG	F	Au											
Green Creek	1997-2000	UG	C	Pb-Ag-Au-Zn											
Hernio JV	2002-2016	OC-UG	F-C	Au											
Valle escondido	2010-2016	OC	C	Ag-Au					1.07	3					
Hoit McDermott	2002-2003	UG	HM	Au				1.04							
Kinsevere	2012-2016	OC	F	Cu											
Konihola	2007-2016	UG	HL-C	Cu	24.52	7.97	5		1.9	5					
Lagunas norte	2008-2016	OC	C	Au				4.95							
Lawiers	2002-2003	UG	HM-C	Au											
Lihir	1997-2016	OC	HL	Ag-Au											
Lomas Bayas	2004-2011	OC	F	Cu	0.018	0.01	6		0.01	6					
Lumwana	2012-2016	OC	C	Cu				0.1							
Marigold JV	2002-2003	OC	F	Au											
Río McArthur	2007-2009	OC	F	Pb-Ag-Zn	0.46	0.19	3		0.01	3					
Ministro Halos	2011-2016	OC	HL	Cu	0.58	0.39	2	0.01	0	2					
Morro do Ouro	1997-2000	OC	F-S	Au				0							
Monte Isa (Cu)	2002-2012	OC-UG	F-S	Cu-Ag					0.29	4					
Monte Isa (Pb Zn Ag)	2002-2012	OC	F	Pb-Ag-Zn	1.22		1	0.89							
Monte Lyell	2007-2014	UG	C	Cu-Ag-Au	1.4	0.36	2		0.21	4					
Monte Rawdon	2009-2011	OC	C	Au				2.2							
North Mara	2008-2013	OC	F	Au											
Northparkes	2002-2016	OC-UG	F	Cu-Au											
Ok Tedi	2003-2016	OC	F-HL-S-R-HM	Cu-Ag-Au					0.24	14					
Presa Olimpia	1988-2016	UG	F	Cu-U-Ag-Au	1.6	0.45	28	0.63							
Oyu Tolgol	2013-2016	OC	F-S-R	Cu-Ag-Au	0.56		1								
Palabora	1994-2012	OC-UG	C	Cu					0.31	16					
Patchway	1997-2000	OC	F	Au				0.8							
Peak (NSW)	1997-2000	UG	HL	Pb-Ag-Au-Zn											
Pierina	2002-2016	OC	C	Au											
Plutonic	2002-2003	OC	HM	Au											
Porgera	2008-2015	OC-UG	F	Au					0.09	2					
Prominent Hill	2009-2016	OC-UG	C	Cu-Ag-Au	0.63	0.09	7	0.92	0	2					
Pueblo viejo	2012-2016	OC	F	Au				0							
Rodomiro Tonic	2011-2016	OC	C	Cu-Mo-Ag-Au	0.079	0.016	3		0.002	3					
Rawhide	1997-2000	OC	C	Ag-Au				0.02							
Renco	1997-2000	OC	C	Au											
Ridgeway	1997-1999	OC	F	Au											
Rosbery	2006-2016	UG	HM	Pb-Cu-Ag-Au-Zn											
Rossing	1995-2016	OC	C	U					0.03	22					
Round Mountain JV	2002-2003	OC	HL-C	Au				0.27							
Ruby Hill	2008-2016	OC	F-HL	Au											
Salvador	2002-2016	OC	HM	Cu	0.3	0.14	7		0.33	10					
Sepon	2009-2016	OC	HM-R	Cu				1.22	1.62	6					
Skorpion	2012-2016	OC	HL	Zn				3.53	0.01	2					
Spence	2007-2008	OC	F-C	Cu				1.69							
Telfer	2009-2016	OC-UG	F-HL	Cu-Ag-Au	0.89	0.02	3		0	2					
Tintaya-Antapaccay	2006-2012	OC-UG	C	Cu-Ag-Au				0	0.08	6					
Tagarci-Tutawaka	2004-2016	OC-UG	C	Ag-Au	4.99	2.35	2	0.72	0.46	2					
Totawaka	2008-2013	OC	HL	Au				2.17							
Veladero	2008-2016	OC	HL	Au											
Zaldivar	2008-2014	OC	F-S-R	Cu											
Media					1.46			1.02			0.04				
Mediana					0.52			0.78			0.04				
Desviación estándar					4.45			1.12							

Notas: Tipo de mina: OC - cielo abierto, UG -subterránea. Configuración del proceso: F - flotación, S - fundición, R - refinación, HL - Lixiviación, HM - planta metalúrgica, SD - desviación estándar.

Uso																	
Agua de reuso			Total			Agua fresca			Agua reciclada			Agua reciclada			Descargas		
m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)	%	SD +/-	(No.)	m³/t de mineral	SD +/-	(No.)
			2	0.5	7	0.57	0.03	7	1.44	0.45	8	73.5	1.5	7	0.026	0.008	4
			1.49	0.5	12	1.05	0.11	9	0.69	0.08	12	45.3	3.3	7	0.73	0.51	13
															0.89	0.05	4
						0.47	0.71	7							0	0	6
			1.95	0.47	6	0.75	0.35	6	1.13	0.14	7	61.8	9	6	0.32		1
			0.76	0.56	2	0.52	0.68	2	0.23	0.12	2	13.5	1.1	2	0	0	2
			0.75	0.24	3	0.2	0.05	3	0.55	0.29	3	80.2	16.6	5	0.4	0.03	2
0.14	0.043	9	2.13	0.97	8	0.43	0.16	13	1.64	0.86	8	74.4	11.4	10	0.15	0.22	8
						0.7	0.07	3	10.1		1						
			7.83	0.49	5	1.01	0.13	5	6.82	0.45	5	87.1	1.4	5			
						1.06	0.19	15									
			2.93	0.26	8	0.43	0.03	9	2.49	0.26	8	84.8	1.6	8	0.07	0.14	8
0.004	0.002	5	3.15	0.32	10	0.69	0.04	10	2.46	0.34	10	77.4	1.5	10			
												89.8	2.5	4	0		6
0.006		1				0.45	0.09	6				98	1	1	0	0	2
			1.61	0.07	2	0.96	0.33	7	0.95	0.3	2	76.3	8.8	2			
			5.04		1	3.26	1.61	2	0.63		1	12.6		1	0	0	2
			2.91	0.59	12	1.25	0.29	12	1.67	0.36	12	57.5	3.9	12	1.07	0.42	13
						0.46	0.12	10									
			1.06	0.004	2	0.76	0.03	2	0.28	0.03	6	28.3	2.6	2			
			0.58		1	0.52	0.12	2	0.14		1	24.7		1	5.45	0.12	2
			0.43	0.57	4	0.1	0.06	4	0.33	0.56	4	51.7	44.2	4			
			3.61	0.84	3	1.51	0.19	5	2.37	0.8	5				0.53		1
			1.16	0.08	4	0.56	0.2	8	0.57	0.34	4	48.5	28.4	4	0	0	6
			2.45	0.42	4	1.26	0.29	10	1.05	0.06	4	43.9	5.8	5	0	0	11
			7.97	2.02	4	2.14	0.24	4	5.84	1.87	4	72.2	6	4	3.35		1
			1.5	0.59	3	0.31	0.17	9	1.18	0.45	3	85.5	10.7	5	0.96	0.26	10
			1.47	0.87	4	0.43	0.16	5	1.1	0.86	4	68.4	19	5	0.16		1
			2.05		1	0.92	0.15	2	1.23		1	60.2		1	5.39	0.09	2
												85	6	3			
			9.1	2.57	6	10.43	3.6	9	1.84	1.6	6	17.4	13.7	6	12.08	10.62	8
			1.41	0.14	2	0.02	0.02	7	1.36	0.15	2	97.3	1	4	0.17	0.12	9
			1.67		1	0.64	0.09	2	1.1		1	65.9		1	0.2	0.28	2
						32.9	8.59	7				0	0	8	30.37	4.1	5
			0.14	0.01	2	0.12	0.02	4	0.03	0.002	4	24.4	0.2	2			
			1.18	0.11	4	0.16	0.06	5	1.04	0.09	4	88	2.6	4	0.81	0.51	5
						0.08	0.01	2				0		1			
									5.42	1.47	2				0.04		1
			0.46	0.09	2	0.37	0.08	2	0.09	0.01	2	13.5	11.7	3			
			2.43	0.18	4	0.62	0.15	4	1.8	0.2	4	74.2	6.2	4	0.04		1
			3.09	0.33	5	0.92	0.21	11	2.08	0.26	5	66.1	6.7	5			
			2.52	0.3	2	0.96	0.31	6	1.81	0.08	2	70.1	8.3	2			
			2.38	0.95	4	2.51	0.92	3	0.22	0.21	3	6.8	7.2	3	8.79	4.12	7
			0.96		1	0.15	0.13	2	0.9		1	94		1	0.07	0.08	2
						0.25	0.22	6				100		1	0.01	0.02	5
			1.04	0.09	10	0.6	0.13	16	0.45	0.16	10	43.2	13.8	10			
			2.36	0.89	14	0.63	0.24	14	1.73	0.83	14	70.8	12.1	14			
						1.6	0.45	28									
			2.86	0.54	4	0.44	0.1	4	2.43	0.44	4	85	1.2	4			
			2.99	1.01	11	1.09	0.42	10	2.29	0.79	12	66.5	5.4	8	0.09		1
			2.79	0.66	4	2.3	0.88	4	0.5	0.33	4	19.7	16.4	4			
			3.25	0.3	4	0.89	0.13	4	2.37	0.3	4	72.7	4.3	4			
			0.04		1	0.91	2.46	8	0.01		1	60	55.2	2	0.16	0.28	7
			1.96		1	0.81	0.04	2	1.12		1	57.2		1	0	0	2
			5.24	0.64	3	5.64	0.54	8	0	0	3	0		3	8.2	2.9	7
						0.63	0.09	7									
			3.74	0.33	4	4.36	2.74	5	0.58	0.53	4	15.8	14.4	4	1.53	1.29	4
			0.95	0.31	5	0.11	0.02	5	0.84	0.29	5	88.2	2.7	5			
			2.64	0.67	3	0.2	0.01	4	2.45	0.68	3	92.2	2.7	3			
			4.22	0.98	4	3.18	1.29	4	1.03	0.37	4	26.5	13.2	4			
			0.25	0.12	2	0.05	0.05	3	0.19	0.07	2	78.9	11.7	2			
						19.08	12.27	3							1.61		1
			0.84	0.1	22	0.27	0.03	22	0.57	0.11	22	66.8	5.7	22			
						0.22	0.01	2							0	0	2
						0.44	0.38	7							0	0	5
			2.76	0.71	10	1.56	0.33	10	1.01	0.45	11	37.9	8.5	12	0.29	0.45	13
									5.33	2.82	5				4.06	3.88	4
						1.72	0.04	4	0.23	0.13	2	11.9	6.2	2	0	0	2
0.32	0.04	2	0.36		1	0.32	0.04	2	0.01		1	2.4		1			
			0.97	0.12	5	0.86	0.31	7	0.13	0.08	5	12.9	8.2	6			
			2.57	0.09	5	0.7	0.1	3	1.86	0.04	5	72.6	3.7	7			
			5.99	1.05	3	4.02	1.42	10	0.73	0.67	3	8.4	11.2	5	5.45	1.97	3
						0.61	0.31	6							0	0	5
						0.05	0.013	8				47.8	55.1	4	0.006	0.006	8
						0.15	0.009	6	1.78		1	93	1.4	2	0	0	6
0.12			2.41			1.81			1.56			54.9			2.03		
0.07			2.05			0.63			1.07			65.9			0.16		
0.15			1.96			4.61			1.84			30.8			5.05		

La matriz de la figura 3.1 brinda información acerca del uso del agua por diversas empresas mineras del mundo. Como se puede observar, existe una variabilidad considerable entre diferentes minerales, incluso para proyectos mineros dentro de la misma región. Por ejemplo, la fracción de reúso de aguas de laboreo (reciclada) varía del 0 % (Mina Porgera, Papúa Nueva Guinea, Oro) al 96 % (Mina Spence, Chile, Cobre). Para las minas adyacentes de Radomiro Tomic y Chuquicamata en el norte de Chile, la huella hídrica varía de 0.10 a 1.04 m³/t de mineral, respectivamente, mientras que el reúso de aguas de laboreo también varía de 0.29 a 0.59 m³/t de mineral, respectivamente. De igual manera, existen casos de proyectos mineros que fomentan el buen uso del agua, por ejemplo, en función de la fracción de uso de aguas de laboreo. En las tierras altas tropicales de Papúa Nueva Guinea, la mina Ok Tedi (Cu-Au-Ag) aprovecha el 70 % de las aguas de laboreo o también en la mina Antamina (Cu-Zn-Ag-Mo) en Perú o la mina El Teniente (Cu-Mo-Au-Ag) en Chile, a pesar de las moderadas lluvias.

En lo que se refiere a la huella hídrica, son muchos los factores que podrían explicar la alta variabilidad, como el tipo y dureza del mineral, la configuración del proceso de transformación (mina-molino, mina-pila, la presencia de una fundición o refinería), la calidad del agua, el régimen climático (precipitación y evaporación anual), la densidades de lixiviados durante el procesamiento y disposición de jales, leyes de mineral, edad de la mina, infraestructura y eficiencia de sistemas de tratamiento, costos, normatividad y conflictos sociohídricos prevalecientes.

La huella ecológica es un indicador del impacto total en el ambiente. Este indicador transforma todos los consumos de materiales y energía a hectáreas de terreno productivo (cultivos, pastos, bosques, mar, suelo construido o absorción de CO₂). La estimación del volumen de contaminantes vertidos a cuerpos de agua y la emisión de gases distintos del CO₂, podrían ser integrados para adaptar el cálculo a la industria minera (Doménech, 2006). Estas tareas quedarán pendientes para trabajos subsecuentes.

La estimación del volumen anual de agua consumida en los procesos mineros y la huella hídrica se evalúa con una métrica con base en su realización y estará definido con un “sí” o un “no” (tabla 3.1).

3.1.3 Evaluación de la disponibilidad en la cuenca

La federación, a través de la Comisión Nacional del Agua, publica la disponibilidad de las aguas nacionales superficiales de las 757 cuencas hidrológicas que comprenden las 37 regiones hidrológicas en que se encuentra dividido el país (Secretaría de Gobernación, 2020). De estas, 653 cuentan con disponibilidad de acuerdo con la Conagua (2020).

La estimación del volumen de agua que consume la unidad minera se integra a la ecuación y se determina el impacto en la disponibilidad. Esto aplica para unidades mineras de gran producción de varias decenas de miles de toneladas diarias de mineral.

En el caso de minas con proyección de producción menor, en que su impacto directo sea en la microcuenca, será necesario realizar un balance hídrico con base en la medición de las variables hidrológicas y en el desarrollo de modelos hidrológicos. Los términos del cálculo pueden consultarse en Alvarado-Rodríguez (2017).

La evaluación de la disponibilidad se calificará en función de los insumos utilizados (número de estaciones de medición de variables hidrológicas y el tipo de modelo lluvia-escorrentamiento utilizado en el modelo hidrológico), en tres niveles posibles: “alta”, “media”, y “baja” (tabla 3.2).

TABLA 3.2. Variables para evaluar la fase de diseño y planificación.

	Variable	Métrica
Diseño- planificación	Estimación del agua consumida en las unidades mineras	Sí / No (1 / 0)
	Cálculo de la huella hídrica y ecológica	Sí / No (1 / 0)
	Evaluación de la disponibilidad en la cuenca	(Alta / Media / Baja) (3 / 2 / 1)

Fuente: *Elaboración propia.*

La valoración de esta fase del proyecto está dada por la suma de las tres variables, obteniendo valores dentro del intervalo $1 \leq x \leq 5$.

Si la valoración de las variables analizadas en el diagnóstico está entre tres y uno, la recomendación es realizar acciones de buenas prácticas.

3.2 Buenas prácticas

Las buenas prácticas en esta fase deben mantener la continuidad de la participación de los grupos de interés, en especial los grupos nativos y las comunidades locales, para realizar una evaluación inicial e informada de la factibilidad de la actividad minera analizada. Asimismo, puede contribuir a garantizar que la evaluación de impacto ambiental (EIA) gire en torno a los asuntos que preocupan a los grupos de interés, cuyos miembros agregarán valor al proceso de toma de decisiones.

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, 2006) y el código de prácticas ambientales para las minas de metal del gobierno de Canadá (Environment Canada, 2009), refieren las siguientes recomendaciones:

a. Planificación de la gestión del agua. Realizar e implementar planes de gestión de aguas superficiales específicos del sitio, incluyendo la

identificación de las subcuencas que contienen el área concesionada y las áreas de desechos de la mina, el drenaje y los cuerpos de agua receptores; las estimaciones de los escurrimientos en cada subcuenca en condiciones climáticas normales y eventos de precipitación extrema (es decir, tormenta de diseño); los análisis del régimen local de aguas subterráneas, incluida la dirección y las tasas de flujo, las áreas de recarga y descarga; y la relación con el régimen local de aguas superficiales.

b. Costos de gestión ambiental. Es una buena práctica incluir en el estudio de factibilidad económica los costos anticipados de la gestión ambiental durante las operaciones de la mina, así como los costos de cierre de la mina y los pasivos a largo plazo posteriores al cierre, los cuales deben contabilizarse debidamente en la planificación financiera de la empresa.

c. Uso y reciclaje del agua. Las instalaciones de procesamiento de minerales se diseñan para minimizar el volumen de agua dulce que se utiliza para el procesamiento de minerales mediante el uso de métodos de procesamiento de minerales que requieran menos agua y maximizar el reciclaje de agua para reducir los requisitos de agua dulce y evitar o minimizar el uso de reactivos que requieran tratamiento antes de la

descarga de efluentes. Algunos métodos para recolectar y reusar agua se pueden consultar en Gunson (2013).

d. Desvío de escurrimientos y consolidación de corrientes de aguas residuales. Al planificar el diseño del sitio, considerar en la medida de lo posible consolidar todas las instalaciones que son fuentes potenciales de aguas residuales con características y requisitos de tratamiento similares; desviar todos los arroyos limpios y la escorrentía de drenaje lejos de las áreas de posible contaminación mediante la construcción de zanjas o diques y ubicar los puntos de descarga de efluentes lejos de áreas ambientalmente sensibles.

e. Diseño para eventos climáticos extremos. Se recomienda diseñar las instalaciones de drenaje superficial para manejar condiciones pico al menos equivalentes a una inundación que se produce una vez cada cien años. Este diseño ha de tener en cuenta las proyecciones de un aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos resultantes del cambio climático.

f. Predicción de la calidad de las aguas residuales. Desarrollar e implementar programas específicos del sitio para la predicción de la calidad de las aguas residuales. Este trabajo comienza lo antes posible en el ciclo de vida de la mina y continúa durante las fases de planificación y construcción y operaciones de la mina. Los programas para la predicción de la calidad de las aguas residuales incluyen la identificación y descripción de todos los materiales geológicos que se excavarán, expondrán o alterarán de otro modo por la minería, la predicción del potencial de lixiviación de metales y drenaje ácido de todos los materiales geológicos, incluido el momento y las condiciones durante las cuales se espera que ocurra la lixiviación de metales y el drenaje ácido y la predicción de otros componentes potencialmente dañinos en las aguas residuales de la mina, incluidos los reactivos de procesamiento, como amoníaco, sustancias promotoras de algas, cloruros y pH elevado. El análisis detallado de los resultados de laboratorio y las muestras tomadas *in situ* de la contaminación de agua de mina por la intemperización de minerales expuestos, el riesgo ambiental y su impacto en los cuerpos de agua aledaños puede consultarse en Banwart *et al.* (2002).

g. Identificación y descripción de materiales geológicos. Los programas específicos del sitio para la identificación y descripción de rocas y otros materiales geológicos que serán o han sido movidos o expuestos como resultado de la actividad minera incluyen, para cada material: la distribución espacial del material, así como la masa estimada de material presente, la caracterización geológica del material, incluida su composición mineral y química, la caracterización física del material, incluido el tamaño de grano, tamaño de partícula y características estructurales, incluida la fractura, fallas y resistencia del material, conductividad hidráulica del material, y el grado de oxidación que ha tenido lugar.

h. Predicción de potencial de lixiviación de metales y drenaje ácido. Todas las unidades de roca y otros materiales geológicos que serán o han sido movidos o expuestos como resultado de la actividad minera han de probarse para determinar su potencial de lixiviación de metales y generación

de ácido. El diseño del programa de prueba es adecuado para satisfacer las necesidades específicas del sitio, utilizando una combinación de métodos de prueba estáticos y cinéticos, según corresponda. La descripción del proceso de la oxidación natural de sulfuros minerales que son expuestos a la acción combinada de agua y oxígeno atmosférico, que generan contaminación por la formación de drenajes ácidos de mina, puede revisarse en Santiago *et al.* (2002).

i. Predicción de otros componentes potencialmente dañinos en las aguas residuales de la mina. Para minimizar el riesgo, se requiere instalar capacidades para predecir la presencia de otros componentes en las aguas residuales de la mina que son potencialmente dañinos para el medio ambiente, en particular las concentraciones potenciales de reactivos de procesamiento de minerales (por ejemplo, cianuro) y sus productos de degradación en el procesamiento de aguas residuales, la concentración potencial de amoníaco en las aguas residuales; el pH potencial de las aguas residuales del procesamiento de minerales, ya que el procesamiento a menudo se lleva a cabo a un pH alto. Los métodos de análisis químicos para determinar la calidad del agua, los elementos traza en el agua acidificada y metales pesados en los cuerpos de agua donde descargan las aguas residuales de minas pueden consultarse en Ray y Dey (2020).

j. Disposición de residuos sólidos mineros. Dentro de las recomendaciones para la disposición de residuos están las siguientes:

- Planificación de la disposición de desechos de roca y jales
- Prevención y control de la lixiviación de metales y el drenaje ácido de la roca y los jales
- Selección de ubicaciones para pilas de roca e instalaciones de manejo de jales
- Diseño de instalaciones de manejo de jales
- Estabilidad a largo plazo de las pilas de roca
- Estabilidad a largo plazo de las instalaciones de gestión de jales. El diseño de las instalaciones de manejo de jales responde a la necesidad de permanecer estructuralmente estables

La descripción detallada de cada una de estas medidas puede consultarse en el anexo 4.

k. Sistemas de tratamiento de aguas residuales. Las recomendaciones para el tratamiento de aguas residuales son las siguientes:

- Planificación y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales
- Planificación del manejo del cianuro
- Gestión de productos químicos
- Eliminación de aguas residuales y aguas residuales domésticas

La descripción detallada de cada una de estas medidas puede consultarse en el anexo 5.

l. Cambio climático y adaptación-reducción de carbono. Al planificar todos los aspectos de las operaciones de la mina, particularmente la gestión del agua y la gestión y eliminación de desechos de la mina, han de considerarse los impactos potenciales del cambio climático. Se recomienda consultar las predicciones regionales a largo plazo del cambio climático y tener en cuenta los cambios previstos con respecto a la temperatura, las precipitaciones y los fenómenos meteorológicos extremos. Las medidas para mitigar estos riesgos deben planificarse, construirse y operarse de manera que reduzca o elimine los impactos potenciales asociados con el cambio climático. Las soluciones a los problemas derivados por la competencia por el agua en zonas deficitarias afectadas por el cambio climático pueden revisarse en Timms y Holley (2016).

Es fundamental considerar e implementar estrategias para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera en todas las fases del ciclo de vida de la mina. Las oportunidades de reducción de carbono deberían incluir el uso de equipo pesado y vehículos que sean eficientes en combustible o utilicen combustibles alternativos.

Conocer las concesiones de volumen de agua superficial y subterránea para los diversos usos en la zona evitará un impacto negativo de la concesión minera en el cumplimiento del derecho humano al agua y al saneamiento.

Durante el proceso de la EIA, es clave la recolección rigurosa de datos y mediciones para el establecimiento de la línea de base. Los costos ambientales, incluyendo los asociados a la supervisión por parte del gobierno, la recuperación, el cierre, y el monitoreo y mantenimiento después del cierre de la mina son parte de la EIA. La evaluación de los peores escenarios (ambientales y sociales) y el análisis de impacto más allá de los límites físicos de la mina también son parte de esta EIA, pues de este análisis se deriva la identificación de condiciones de riesgo para las cuales desarrollar estrategias de respuesta apropiadas. Antes del inicio de las operaciones ha de desarrollarse un plan de recuperación que incluya los costos estimados detallados, cuya revisión periódica permitirá actualizar las prácticas de recuperación y costos (Miranda *et al.*, 2005).



CONSTRUCCIÓN

.....



4

4 CONSTRUCCIÓN

La estimación del volumen de agua que consumirán los procesos mineros, realizada en la fase de planeación, permite identificar el tipo y capacidad de las obras hidráulicas, como presas, cárcamos de bombeo, perforación de pozos y obras de captación de agua producto del laboreo de minas, identificación de fuentes alternativas de abastecimiento de agua en casos críticos de disponibilidad en cuencas con estrés hídrico, infraestructura de control y tratamiento de agua.

4.1 Infraestructura hidráulica

Dentro de la infraestructura hidráulica se consideran los sistemas de tratamiento y control. La caracterización en este tema se realiza a nivel de unidad minera.

4.1.1 Sistemas de tratamiento de aguas

La infraestructura de tratamiento comprende tanto la captación y el tratamiento de las aguas residuales domésticas que proviene de las zonas habitacionales de los empleados como de las aguas residuales industriales producto de las operaciones mineras. La caracterización se realizará con base en el tipo y capacidades de las plantas de tratamiento que estará determinado por el tipo de contaminantes a remover. Los sistemas de tratamientos de aguas adecuados se seleccionan con base en el tipo de mineral y los reactivos utilizados en el proceso de beneficio, así como en los elementos químicos contenidos en la mineralogía del yacimiento, debido a que los minerales, al quedar expuestos al medio ambiente, son intemperizados y reaccionan químicamente, alterando la calidad del agua que llega a cuerpos superficiales o subterráneos, con su consecuente impacto (Banwart *et al.*, 2002). Es pertinente instalar un sistema de monitoreo continuo y en tiempo real para medir la calidad de agua entrante y saliente de la planta de tratamiento.

Los sistemas de tratamiento de aguas se diagnostican con base en la adecuación del tratamiento a los elementos contaminantes a remover y estará definido por “alto”, “medio”, “bajo”, o “nulo” (tabla 4.1).

Para conocer la calidad mínima esperada en el efluente puede consultarse la norma vigente que establece los límites permisibles de descargas de agua residual a cuerpos receptores o con condiciones particulares de descarga, según corresponda.



4.1.2 Infraestructura de control

La infraestructura de control consiste en obras de protección ante posibles fallas en las estructuras o debido a la ocurrencia de lluvias y escurrimientos extremos que ocasionen derrames, fugas o infiltraciones de fluidos contaminantes. Se considera como tales a 1) los bordos perimetrales para contener derrames accidentales, 2) los pozos perimetrales de monitoreo para obtener muestras y determinar parámetros hidráulicos del subsuelo de las obras realizadas para disposición final de residuos mineros, lixiviados y almacenamiento de reactivos químicos, 3) los testigos de movimiento instalados para registrar periódicamente los movimientos detectados en las estructuras ante movimientos sísmicos o a condiciones naturales de asentamiento que pongan en peligro la estabilidad de las estructuras. Asimismo, la instalación de sismógrafos, si las estructuras se ubican en una región sísmica.

Las presas de jales y lagunas de lixiviación incluyen obras de retención y derivación de los escurrimientos normales y extremos, sistemas de recuperación de agua para su recirculación al proceso o para medidas de tratamiento para su descarga a cuerpos receptores. Los depósitos de almacenamiento de sustancias químicas han de contar con obras de retención; por ejemplo, diques de contención, como medida de seguridad en caso de derrame. Se debe elaborar un plan de contingencia ante la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos y derrames de residuos peligrosos.

La evaluación de la infraestructura de control se calificará en función de la cobertura a la infraestructura hidráulica primaria y se definirá como “alta”, “media”, “baja” o “nula” (tabla 4.1).

TABLA 4.1. Variables para evaluar la fase de construcción.

	Variable	Métrica
Construcción	Sistemas de tratamiento de agua	(Alto / Medio / Bajo / Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)
	Infraestructura de control	(Alta / Media / Baja / Nula) (3 / 2 / 1 / 0)

Fuente: *Elaboración propia*

Esta fase del proyecto es evaluada con la suma de las dos variables, obteniendo valores dentro del intervalos $0 \leq x \leq 6$.

Las buenas prácticas deben desarrollarse e implementarse, sobre todo si la valoración de variables analizadas en el diagnóstico está entre cero y tres.



4.2 Buenas prácticas

La recomendación principal es contar con un programa de seguridad y monitoreo asociado a los proyectos de infraestructura de tratamiento y de control. El código de prácticas ambientales para las minas de metal del gobierno de Canadá (Environment Canada, 2009) refiere las siguientes recomendaciones:

a. Evitar áreas ambientalmente sensibles. Todas las instalaciones de la mina se diseñan y ubican de manera tal que se eviten áreas ambientalmente sensibles identificadas de manera conjunta con las partes interesadas apropiadas, las comunidades locales y los funcionarios de gobierno.

b. Caminos en el sitio y caminos de acceso. El trazado de los caminos evita los cuerpos de agua y los hábitats de la vida silvestre, también los giros bruscos, para minimizar el riesgo de derrames y accidentes. La ubicación de la ruta ha de considerar el uso final de las carreteras con respecto a mejorar o limitar el acceso continuo del público a áreas naturales y áreas explotadas por parte del público después del cierre. Se diseñan e implementan medidas para prevenir y controlar la erosión de los caminos asociados con las instalaciones mineras. Entre estas medidas pueden mencionarse zonas de amortiguación de al menos 100 m entre carreteras y cuerpos de agua, diseño de pendientes y zanjas de carreteras para limitar el potencial de erosión, incluida la prevención de pendientes superiores al 12 % (5 % cerca de cuerpos de agua).

El diseño y construcción de los caminos que cruzan arroyos privilegian la protección de los ecosistemas acuáticos y sus especies, evitando en particular la sedimentación de los arroyos o el tránsito de las especies.

c. Sistemas de transporte. La selección de las rutas de los sistemas de transporte se fundamenta en limitar los riesgos para el medio ambiente o la salud humana, debido a las partículas en suspensión asociadas a éstos. En la medida de lo posible, los sistemas de transporte, así como las instalaciones de carga y descarga, han de ser de tipo cerrado para prevenir o limitar la liberación de material particulado en el aire.

d. Desbroce de vegetación. Se recomienda restringir al mínimo posible el área despejada; siempre que sea posible, se conservan zonas de amortiguamiento de cubierta vegetal natural de al menos 100 m entre las áreas despejadas y los cuerpos de agua adyacentes, y se minimiza el tiempo entre el desbroce de un área y el desarrollo posterior. Esta condición es similar en la construcción de caminos, con la delimitación de una franja de protección de 100 m como mínimo, la cual se medirá a partir del límite del derecho de vía al límite del hábitat (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2016). Estas medidas se mantienen durante la fase de exploración y viabilidad, particularmente en el contexto del establecimiento de campamentos y caminos de acceso y de desmonte de afloramientos. Cuando sea factible, la vegetación recuperada de las áreas despejadas puede replantarse en hábitats cercanos para su futura reubicación después del cierre de la mina.

e. Preservación y almacenamiento de la cubierta vegetal removida. Desarrollar e implementar procedimientos específicos al sitio para garantizar

que la cubierta vegetal removida, junto con el horizonte orgánico de los suelos excavados en el sitio de la mina durante la construcción, se almacenen para su reutilización futura en la recuperación del sitio. Las instalaciones de almacenamiento deben diseñarse para prevenir o limitar la erosión del material acumulado por la lluvia o el viento. Deben adoptarse medidas para garantizar que el material almacenado no se contamine durante las operaciones de la mina.

f. Control de sedimentos. Desarrollar e implementar planes específicos al sitio para el control de la erosión y sedimentos. Las medidas a considerar durante las fases de planificación, construcción, operaciones y cierre de la mina incluyen:

- Determinar el potencial de erosión del sitio e identificar los cuerpos de agua en riesgo.
- Establecer, en la medida de lo posible, zonas de amortiguamiento de al menos 100 m alrededor de los cuerpos de agua que están en riesgo de sedimentación.
- Remodelación para reducir la susceptibilidad del suelo a la erosión.
- Revegetación y mantenimiento de zonas de amortiguamiento con vegetación adyacentes a cuerpos de agua para el control de la erosión.
- Desviar el drenaje del sitio lejos de áreas despejadas, niveladas o excavadas.
- Usar y mantener barreras o trampas de sedimentos para prevenir o controlar la sedimentación.
- Dirigir la escorrentía superficial de las áreas erosionables a un estanque de sedimentación antes de su descarga al medio ambiente.
- Monitorear y mantener las medidas una vez que estén implementadas para asegurar que sean efectivas.





EXTRACCIÓN Y BENEFICIO



5

5 EXTRACCIÓN Y BENEFICIO

La fase de extracción y beneficio es la etapa de producción de las unidades mineras. Las condiciones de operatividad y uso del agua pueden mejorarse con la implementación de buenas prácticas para reducir el volumen de agua utilizado y controlar los compuestos químicos utilizados, contribuyendo así a reducir afectaciones al medio ambiente y conflictividad social. Esta sección se desarrolla a través de cuatro puntos: a) la realización de un balance hídrico, b) la seguridad en el manejo de sustancias químicas, c) la autoevaluación de la unidad minera y d) la definición de buenas prácticas.

5.1 Balance hídrico en la unidad minera

Una unidad minera consume agua en los procesos de extracción, concentración de minerales, jales y lixiviación. La caracterización de este consumo se realiza mediante el cálculo del balance hídrico a partir de datos medidos de volúmenes de agua utilizados en cada uno de los procesos, incluyendo el volumen de agua drenado producto del laboreo de minas. Dependiendo del material mineralógico procesado, la empresa elaborará un diagrama de flujo similar al de la figura 5.1, y añadirá las cifras correspondientes al consumo de agua. Este análisis se actualiza periódicamente en función de los cambios realizados en los procesos.

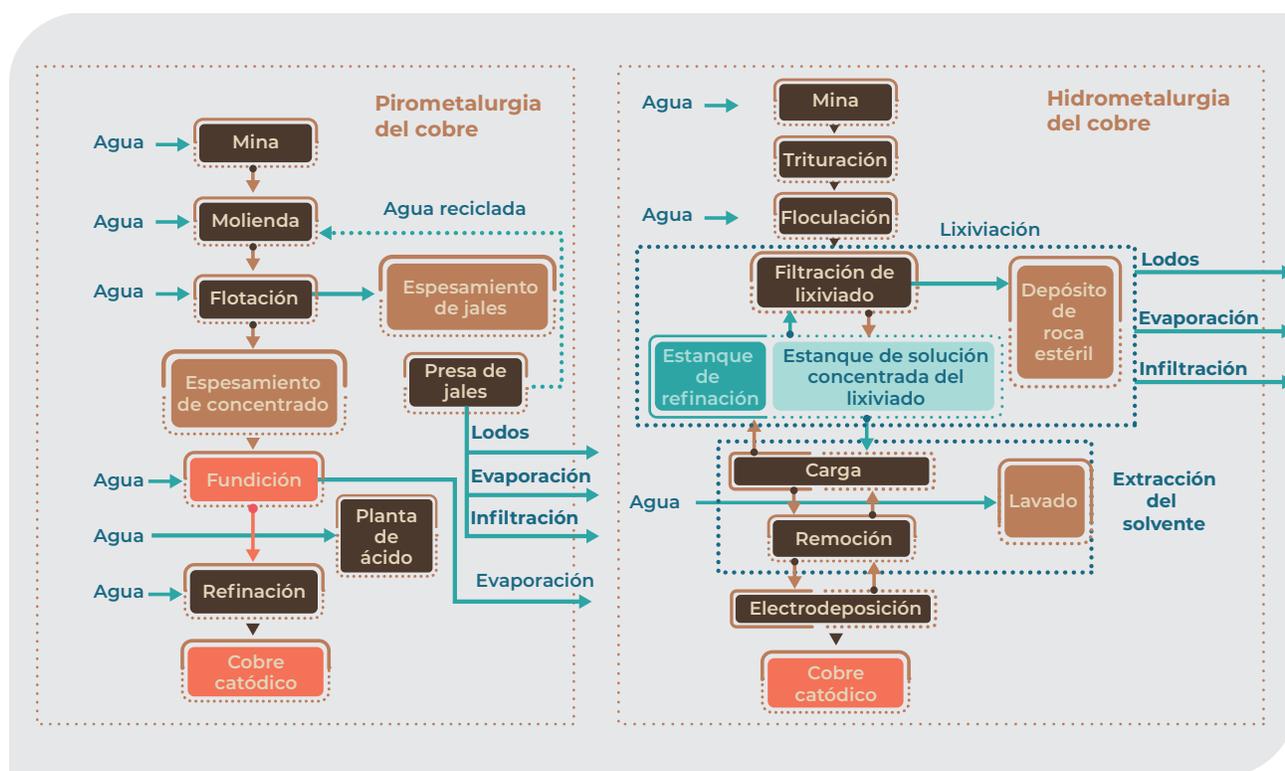


FIGURA 5.1. Balance hídrico de los procesos de la producción minera.

Fuente: Adaptado de Northey y Haque (2013)

El balance hídrico en las operaciones mineras se evalúa con la dicotomía presencia/ausencia y estará definido por un “sí” o un “no” (tabla 5.1).

5.2 Seguridad en el manejo de sustancias químicas

Los procesos de extracción requieren compuestos químicos para la concentración de minerales. Estos compuestos químicos deben ser transportados, almacenados y utilizados de manera adecuada, para lo cual se siguen protocolos de seguridad que reduzcan el riesgo en su manejo.

Por otro lado, la seguridad en las operaciones mineras se aborda mediante el monitoreo de contaminantes en los desechos, en las descargas de aguas residuales y en los lodos depositados en las presas de jales, en el manejo de los residuos sólidos y líquidos, así como en la inspección y mantenimiento de la infraestructura de monitoreo y control.

5.2.1 Monitoreo de la calidad del agua

La efectividad del sistema de tratamiento está dada por la remoción de los elementos tóxicos de los residuos mineros; su monitoreo constante, permitirá identificar posibles riesgos y aplicar acciones correctivas para reducir el impacto negativo de las actividades mineras en las fuentes de agua aledañas al proyecto.

La unidad minera debe contar con una red de monitoreo de la calidad del agua que entra y sale de la mina, así como del monitoreo de la calidad en cada uno de los procesos.

El diagnóstico de esta variable estará indicado como “alto”, “medio”, “bajo” o “nulo” (tabla 5.1), y se asignará en términos del número y operatividad de las estaciones de medición.

Es recomendable que la red de monitoreo se conserve en la etapa de post cierre de la mina para observar los resultados de las acciones de restauración de la zona impactada.



5.2.2 Manejo de residuos líquidos y sólidos

Entre los residuos sólidos y líquidos que genera una unidad minera pueden mencionarse los jales, el mineral de ganga y las descargas de aguas residuales domésticas e industriales, cuya disposición final se realizará de acuerdo con los planes de manejo específicos (la NOM-157-SEMARNAT-2009 incluye una lista más amplia de residuos). La disposición final de los jales y el mineral de ganga puede ser en presas o en relleno de los túneles y obras de desarrollo en la mina ya en desuso.

El manejo y almacenamiento de reactivos químicos, la operación de las presas de jales y los tanques de almacenamiento de lixiviados requieren monitoreo constante, verificando que se cumplan los requisitos de protección ambiental. Se refieren de manera enunciativa, mas no limitativa, algunas de las normas aplicables para el manejo de este tipo de residuos:

- NOM-159-SEMARNAT-2011 (Procuraduría Federal de protección al Ambiente 2016a). Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de cobre
- NOM-157-SEMARNAT-2009 (Procuraduría Federal de protección al Ambiente 2016b). Que establece los elementos y procedimientos para instrumentar planes de manejo de residuos mineros
- NOM-155-SEMARNAT-2007 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2010). Que establece los requisitos de protección ambiental de los sistemas de lixiviación de oro y plata
- NOM-141-SEMARNAT-2003 (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales., 2004). Que establece el procedimiento para caracterizar los jales, así como las especificaciones y criterios para la caracterización y preparación del sitio, proyecto, construcción, operación y posoperación de presas de jales

El diagnóstico del manejo de los residuos se realizará en términos de la identificación de obras de captación para recuperar el agua de los jales una vez depositados en la presa, la aplicación de métodos de estabilización fisicoquímica de las presas de jales, la existencia de un plan de contingencias ante derrames de residuos peligrosos, así como puntos de monitoreo en las obras para disposición final de residuos mineros y el cumplimiento de la normatividad. El diagnóstico será indicado como “alto”, “medio” o “bajo” (tabla 5.1).

5.2.3 Inspección y mantenimiento de la infraestructura de control

La infraestructura de control definida en el capítulo anterior (4.1) debe permanecer en óptimas condiciones, de manera que las acciones de inspección y mantenimiento regular son cruciales para conservar su operatividad ante eventos que comprometan la integridad de la infraestructura principal y pueda detonar riesgos a desastres como derrames, fugas o infiltraciones de fluidos contaminantes. Otro recurso de monitoreo es la teledetección con la ayuda de drones o imágenes satelitales. La frecuencia de este tipo de inspecciones será determinada en el programa de mantenimiento específico.

El diagnóstico se realizará con base en la existencia de programas de mantenimiento realizados *ex profeso*, definido como “sí” o “no” (tabla 5).

La valoración de esta fase del proyecto está dada por la suma de las tres variables, obteniendo valores dentro del intervalo $0 \leq x \leq 8$.

TABLA 5.1. Variables a evaluar la fase de extracción y beneficio.

	Variable	Métrica
Extracción y beneficio	Balace hídrico	(Sí/No) (1/0)
	Monitoreo de la calidad del agua	Alto/ Medio/ Bajo/ Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)
	Manejo de residuos líquidos y sólidos	(Alto/ Medio/ Bajo) (3 / 2 / 1 / 0)
	Inspección y mantenimiento de la infraestructura de control	(Sí/No) (1/0)

Fuente: Adaptado de Northey y Haque (2013)

5.3 Autoevaluación de la unidad minera

Las minas que se encuentran en operación requieren de una evaluación particular. Los proyectos pueden considerar estas métricas en su planeación. En ambos casos se propone realizar evaluaciones de disponibilidad y eficiencia.

5.3.1 Factor de disponibilidad

El factor de disponibilidad es una medida que permite asegurar la disponibilidad de agua en el de ciclo de vida de la mina, entre 15 y 50 años considerando las cinco fases. La fase que requiere de más tiempo es la de producción entre 10 y 30 años (Harraz, 2010).

La disponibilidad de agua en la cuenca y los acuíferos en los que se encuentra la mina debe permanecer durante el ciclo de vida de la mina. Esto debe considerar la estimación del consumo de agua y su crecimiento durante todo el ciclo, así como el crecimiento de los otros usos para el mismo periodo:

$$f_d = \frac{\sum_{i=15}^n \text{Disponibilidad}_i}{\sum_{i=15}^n |\text{Disponibilidad}_i|} \leq 1$$

Donde:

f_d = factor de disponibilidad

Disponibilidad = volumen de agua disponible en la cuenca o acuífero

n = número de años (ciclo de vida de la mina)

5.3.2 Eficiencia hídrica

Establecer indicadores de eficiencia permite conocer el estado del recurso en la empresa y contar con una herramienta cuantitativa y fácilmente comparable que permita evaluar el desempeño con respecto a innovaciones tecnológicas o de gestión de la empresa (Ministerio de Minería *et al.*, 2002).

La eficiencia del uso del agua en las unidades mineras se define en términos de la cantidad de agua total y el agua fresca que se adiciona al sistema:

$$\text{Tasa de recirculación} = \frac{\text{Agua total} - \text{Agua fresca}}{\text{Agua total}} * 100$$

Donde:

Agua total: volumen de agua necesaria para procesar una tonelada de mineral

Agua fresca: volumen de agua que se adiciona al sistema para restituir las pérdidas

El rango de valores que pueden obtener el factor de disponibilidad y de eficiencia hídrica se presenta en la tabla 5.2.

TABLA 5.2. Variables a evaluar la fase de extracción y beneficio.

	Variable	Métrica
Extracción y beneficio	Factor de disponibilidad	$0 \leq x \leq 1$
	Eficiencia hídrica	$0 \leq x \leq 100$

Fuente: *Elaboración propia*

Valores altos en estos indicadores implican altas posibilidades de que un proyecto se desarrolle o una unidad minera siga operando. Para ello se estableció el concepto de viabilidad hídrica, que permite conocer la probabilidad de desarrollar con éxito un proyecto. En las fases de prospección, exploración, diseño y planificación se determina el factor de disponibilidad, mientras que en la fase de producción se evalúa.

El valor de estos indicadores puede mejorarse con la implementación de buenas prácticas.



5.4 Buenas prácticas

Las buenas prácticas en la fase de producción buscan aumentar la viabilidad hídrica y mejorar la eficiencia del uso del agua en la unidad minera, reduciendo pérdidas e incrementando su reciclaje. Las buenas prácticas consideran adaptación a las variaciones estacionales en el flujo de agua superficial, la prevención de posibles daños a la infraestructura, el confinamiento de las aguas residuales con características y requisitos de tratamiento similares y planes de acción para gestionar el agua.

La recomendación de buenas prácticas del código de prácticas ambientales para las minas de metal del gobierno de Canadá (Environment Canada, 2009) son las siguientes:

a. Gestión del agua. Desarrollar modelos hidrológicos en la planificación del sistema de gestión del agua y, si existen, actualizarse y volverse a calibrar. Las mediciones necesarias para completar esta calibración deben incluir: variables climáticas, como precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa y velocidad y dirección del viento; niveles de los lagos; caudal de arroyos y tasas de descarga de efluentes; y construcción de represas, cuando corresponda. La aplicación de un modelo hidrogeológico puede consultarse en Kuma *et al.* (2002).

b. Manejo del agua. Se sugiere desarrollar e implementar programas específicos al sitio para monitorear la calidad del agua recolectada de mina, las posibles fuentes de filtración y la infraestructura para la disposición final de los jales. Como mínimo, estos programas deben describir la geología superficial y del subsuelo, incluidos los acuíferos y acuitardos; identificar y caracterizar los recursos y usos locales del agua subterránea; indicar la ubicación de las estaciones de muestreo de agua de mina y de filtración y de las áreas de desechos de la mina; proporcionar protocolos de muestreo, manipulación y análisis de agua (cuando los análisis sean completados por laboratorios externos, la mina debe tener copias de los protocolos utilizados); y proporcionar una base de datos del agua subterránea que se actualizará a medida que se realiza el muestreo. Un análisis de los desechos mineros como fuente de contaminación y evaluación del riesgo de contaminación en fuentes de extracciones de agua aledañas se puede consultar en Banks *et al.* (2002).

c. Uso de jales y roca como relleno de mina. Los jales y roca estéril requieren ser evaluados para determinar sus características físicas y químicas que garanticen que la alteración química del material no comprometa sus propiedades estructurales para su uso bajo tierra, ni represente un riesgo para el medio ambiente. Cuando sea factible, los jales y la roca estéril pueden usarse como relleno de la mina para reducir las cantidades de estos desechos en contenedores superficiales y para reducir el riesgo de subsidencias del terreno debido a las obras mineras subterráneas.

En minas en las que se hayan utilizado como materiales de relleno residuos potencialmente generadores de ácido es recomendable implementar medidas de monitoreo para evaluar los impactos del material en la calidad del agua de la mina y predecir sus impactos potenciales después de su cierre.

También es necesario evaluar los impactos potenciales sobre la calidad de las aguas subterráneas regionales y los riesgos a largo plazo de la calidad del agua en cuerpos hídricos aguas abajo de la mina después del cierre. Un ejemplo de los efectos de diversas acciones de gestión del agua al respecto y un caso de estudio son analizadas por Hattingh *et al.* (2002).

d. Gestión de instalaciones de disposición de jales. La construcción y operación de las presas de jales deben ser controladas y monitoreadas mediante un procedimiento formal que incluya inspecciones en el manejo de jales con respecto al monitoreo del desempeño estructural de la presa, el manejo y control del agua, la calidad del efluente y procedimientos para el control de polvos.

La construcción de las presas de jales emplearán estrictos estándares de ingeniería, con un diseño adecuado para resistir un evento de inundación máxima probable, para permanecer estructuralmente estables en caso de un terremoto máximo creíble. E incluir sistemas de monitoreo e inspección a largo plazo de las estructuras de contención.

En particular se debe instalar la instrumentación adecuada durante la construcción para facilitar el monitoreo durante las operaciones de la mina y las fases de cierre. Asimismo, las tepetateras deben diseñarse para permanecer estructuralmente estables durante todo el ciclo de vida de la mina y después del cierre. Los datos de estabilidad sísmica local y el riesgo de terremotos deben considerarse en su diseño. La recomendación de buenas prácticas para la construcción de esta infraestructura puede consultarse en el anexo 4.

Estas estructuras deben evaluarse y gestionarse en cada fase del ciclo de vida para determinar los posibles modos y probabilidades de fallas y sus consecuencias. Deben planificarse medidas para reducir estos riesgos y poner en marcha planes de contingencia en caso de daño. Todos los procedimientos relacionados con la gestión ambiental de las instalaciones del manejo de jales deben documentarse claramente, junto con las funciones y responsabilidades de todo el personal que participa en la operación.

Esta documentación debe precisarse, actualizarse y mantenerse durante las operaciones de la mina y las fases de cierre de la mina. Una simulación de la liberación y el transporte de contaminantes debido a la lixiviación de sulfuros en las presas de jales puede revisarse en Gandy y Evans (2002).

e. Monitoreo de tepetateras y presas de jales. Deben diseñarse e implementarse programas de monitoreo de tepetateras y presas de jales específicos del sitio donde se construyen. Las recomendaciones para estos programas son las siguientes:

- Evaluar el potencial de la roca estéril y los jales para la lixiviación de metales y el drenaje ácido.
- Verificar las predicciones hechas durante la fase de planificación de la mina.
- Recopilar los datos necesarios para el modelado.
- Evaluar el nivel de generación de ácido cuando se producen reacciones oxidantes y evaluar la acidez y los productos de reacción que están potencialmente disponibles para migrar.
- Evaluar la efectividad de las medidas que se han implementado para prevenir y controlar la lixiviación de metales y el drenaje ácido.
- Identificar posibles filtraciones superficiales y contaminación de las aguas subterráneas.

f. Manejo de lodos de tratamiento. Los lodos que son un subproducto del tratamiento de efluentes de minas deben manejarse de manera que permanezcan en un estado física y químicamente estable. En este sentido, la compañía minera deberá:

- Caracterizar el lodo de tratamiento para determinar si existen posibles problemas de lixiviación.
- Evitar la eliminación de lodos de tratamiento con desechos potencialmente generadores de ácido.
- Eliminar el lodo en una instalación físicamente segura en condiciones que mantengan la estabilidad química del lodo.
- Tratar y monitorear las aguas residuales de la instalación de manejo de lodos según

sea necesario para garantizar que se cumplan los requisitos reglamentarios.

- En casos en los que se predice que una mina producirá grandes volúmenes de lodo durante un período prolongado, la compañía minera debe considerar el uso de un proceso de tratamiento que produzca un lodo más denso y de menor volumen. Un estudio del drenaje generado por la oxidación natural de sulfuros minerales que son expuestos a la acción combinada de agua y oxígeno atmosférico fue realizado por Santiago *et al.* (2002).

g. Gestión del amoníaco. Las minas que utilizan explosivos a base de amonio deben adoptar las mejores prácticas de gestión para las voladuras y el manejo de estos explosivos para evitar derrames y minimizar los residuos de amonio que quedan después de la voladura, reduciendo así el potencial de contaminación por amonio.

El desarrollo e implementación de planes de control y manejo del amoníaco específicos del sitio ayudan a garantizar que el efluente final no sea extremadamente letal y no tenga un impacto adverso en el medio acuático receptor. Como mínimo, los planes deberán:

- Identificar las posibles fuentes de amoníaco, incluidos los explosivos y la hidrólisis de cianato.
- Estimar la carga de amoníaco e identificarla necesidad de controles adicionales si se justifica.
- Incluir procedimientos para ayudar a mitigar las contribuciones de amoníaco por derrames de agentes explosivos u otras pérdidas.

h. Aguas residuales industriales y aguas residuales domésticas. El agua residual tratada puede ser descargada en cuerpos de agua o bien reincorporadas a los procesos productivos; en esta fase se identificará el programa de reúso del agua residual tratada. De igual manera, cada unidad minera establecerá metas de reúso (% del agua tratada) en función de la calidad del agua residual que estaría ingresando a la planta de tratamiento. Véase el anexo 5.

i. Reducción del consumo de agua. Para implementar mejores prácticas para reducir el consumo de agua de primer uso. Véase el anexo 6.

j. Tecnologías para optimizar el consumo de agua. Véase el anexo 7.

k. Reúso. Recirculación del agua usada en los procesos de extracción y concentración.

l. Recuperación de agua de lluvia. Realizar sistemas de recuperación de agua de lluvia tanto en canteras como en la planta de tratamiento.

m. Uso y reciclaje del agua. Las plantas de beneficio de minerales deben estar diseñadas para minimizar el volumen utilizado para el procesamiento de minerales mediante el uso de métodos de procesamiento de minerales que requieran menos agua, así como para maximizar el reciclaje de agua para reducir la demanda de agua fresca y evitar o minimizar el uso de reactivos que requieran tratamiento antes de la descarga de efluentes.



n. Prevención y control de la lixiviación de metales y el drenaje ácido de roca. Deben establecerse programas específicos para la identificación del sitio y la descripción de rocas y otros materiales geológicos que serán o han sido movidos o expuestos como resultado de la actividad minera. Estos programas deben incluir, para cada material: la distribución espacial del material, así como su masa estimada; la caracterización geológica, incluida su composición mineral y química; y la caracterización física del material, incluidos el tamaño de grano, el tamaño de partícula y las características estructurales incluidas la fractura, fallas y resistencia del material, la conductividad hidráulica del material y el grado de oxidación del material que ha tenido lugar. El análisis de un sistema de flujo de agua subterránea aguas abajo de una presa de jales, con el fin de predecir migración de plumas contaminantes que emanan de una presa abandonada, se puede revisar en Neumann y Sami (2002).

o. Gestión de productos químicos. Los procesos de diseño para nuevas minas y las modificaciones a las minas existentes deben incluir procedimientos para identificar las preocupaciones ambientales potenciales asociadas con los procesos químicos propuestos y los efectos ambientales relacionados.

Para las minas que usarán cianuro en el procesamiento de minerales de oro y plata, el manejo del cianuro debe planificarse de manera consistente con las prácticas descritas en el *Código internacional de manejo del cianuro* (International Cyanide Management Institute, 2008). Evaluar el uso de procesos y productos químicos alternativos, cuando estén disponibles, con miras a mitigar o eliminar los efectos ambientales. Los procedimientos se describen en el anexo 8.



PROCESO DE CIERRE Y RESTAURACIÓN



6

6 PROCESO DE CIERRE Y RESTAURACIÓN

El cierre de minas puede deberse a diversas causas. Cualquiera que sea el caso, debe contarse con un plan de cierre desde la fase de planeación.

En esta última fase, los registros históricos del monitoreo de la cantidad y calidad de aguas superficiales y subterráneas permitirán identificar las alteraciones respecto a la línea base por posibles infiltraciones de las piletas de lixiviación y las presas de jales. En el caso del monitoreo de aguas subterráneas, esto facilitará hacer un comparativo del nivel de la calidad del agua al cierre de la mina con respecto a la línea base. De igual manera, el monitoreo previo al cierre de la mina generará información valiosa para diseñar el plan de cierre del proyecto, mediante una estimación de pasivos ambientales y los costos asociados a la rehabilitación del sitio (Younger y Robins, 2015).

6.1 Plan de cierre

El plan de cierre realizado en las fases de diseño-planificación o producción es un instrumento en actualización permanente a lo largo de la operación, en el que se establecen las condiciones de los depósitos de los residuos mineros y de los cuerpos de agua y las condiciones de estabilidad de las obras mineras. La empresa minera garantizará dicha actualización.

La actualización del plan de cierre debe integrar un programa de mantenimiento de la infraestructura de monitoreo de las estructuras mineras, así como de las estaciones de monitoreo de calidad del agua en fuentes de agua aledañas, por lo que se trata de una fase que considera los dos ámbitos: el de la unidad minera y el de cuenca. Esto permitirá la evaluación de las acciones de remediación implementadas en la etapa de poscierre.

El diagnóstico se realizará con base en la existencia de un plan de cierre actualizado, y estará definido como “sí” o “no” (tabla 6.1).

6.2 Evaluación del riesgo

De acuerdo con Robertson y Blackwell (2014), en la fase de cierre de una mina, el riesgo total (R_t) de cierre es la suma de todas las probabilidades de factores de riesgo individual (R_i) (por ejemplo, 50 %), multiplicada por sus consecuencias (generalmente medidas en dólares). Considera cinco factores de riesgo: 1) el medio ambiente, 2) la seguridad y la salud, 3) la comunidad y el medio social, 3) el uso final de la tierra, 4) el legal y financiero y 5) el técnico. El riesgo total se evalúa con la siguiente ecuación definida como de gestión de riesgo.

$$R_t = \sum_{i=1,2,3,\dots,n}^n R_i$$

En este análisis, el agua está implícita en el inciso uno (el medio ambiente). Sin embargo, se propone considerar la evaluación del agua como un factor de riesgo.

$$f_r = R_a$$

El riesgo agua (Ra) considera la contaminación y agotamiento de fuentes de agua superficial y subterránea posterior al cierre de una mina.

Una evaluación alta de este indicador refiere que la estabilidad de las obras y la calidad del agua en los cuerpos de agua en torno a las obras mineras está comprometida (tabla 6.1).

TABLA 6.1. Variables para evaluar la fase de cierre y restauración.

	Variable	Métrica
Cierre y restauración	Plan de cierre	(Sí / No) (1/0)
	Evaluación del riesgo	$0 \leq x \leq 100$

Fuente: *Elaboración propia*

6.3 Buenas prácticas

El plan de cierre realizado en la fase de planeación se actualiza en esta fase. De no haberse realizado, debe desarrollarse junto con un plan de recuperación. Estos planes incluirán programas de monitoreo y mantenimiento poscierre de toda la infraestructura de la mina, incluyendo trabajos mineros superficiales y subterráneos, jales e instalaciones de disposición de desechos. En términos económicos, el plan debe incluir programas de financiamiento para la realización de estos trabajos.

En el caso de minas a cielo abierto, cuando los materiales generadores de ácido estén expuestos en las paredes de roca de la mina, las compañías deben realizar acciones para reducir el impacto ambiental de la generación de escurrimiento ácido. Las acciones deben incluir la recuperación y diseño para asegurar que el material contaminado o generador de ácido no degrade la calidad de las aguas superficiales o subterráneas. Algunos de estos análisis de escurrimiento ácido se pueden consultar en Robins *et al.* (2002). Los métodos de análisis químicos para determinar la calidad del agua, los elementos traza en el agua acidificada y metales pesados en los cuerpos de agua donde descargan las aguas residuales de minas en operación y abandonadas, pueden consultarse en Ray y Dey (2020).

Ante probables hundimientos, las compañías deben realizar acciones de relleno de obras mineras subterráneas para reducir los impactos negativos en el medio ambiente. Una ventaja adicional de rellenar las obras mineras subterráneas y superficiales es la reducción de la cantidad de desechos y de las estructuras construidas para la disposición de jales (Miranda *et al.*, 2005).

La responsabilidad proactiva de las empresas es fundamental en el paradigma de la tutela del agua, de manera que se espera de ellas respuestas adecuadas

ante contingencias que comprometan las condiciones iniciales del agua superficial y subterránea. Como ejercicios de transparencia, será importante la realización de auditorías ambientales independientes de forma regular, cuyos resultados sean puestos a disposición del público. En este esquema, las comunidades locales podrían participar para supervisar y monitorear independientemente el desempeño ambiental de una mina (Miranda *et al.*, 2005).

Las buenas prácticas posteriores a la etapa de restauración, que consisten en actividades de mantenimiento, vigilancia y medidas de tratamiento de aguas a largo plazo, son indicadas por Younger y Robins (2015).

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM, por sus siglas en inglés) ha desarrollado dos guías de buenas prácticas para el cierre y poscierre de minas para promover tanto la planificación disciplinada e integrada del cierre de minas en general (ICMM, 2019) como de la actividad minera en relación a la diversidad biológica (ICMM, 2006) para aumentar la uniformidad de las buenas prácticas en el sector. Estas guías hacen recomendaciones en aspectos como los riesgos sociales, económicos y financieros que pueden prevenirse con acciones tales como integrar a los involucrados desde el inicio de la definición del plan de cierre, establecer principios de seguridad en la calidad del agua e implementar medidas para la estabilidad ecológica y fisicoquímica de los macizos rocosos y del mineral expuesto.

A continuación, se presentan las recomendaciones generales de este organismo en materia de buenas prácticas para la fase de cierre y restauración:

a. La integración de la biodiversidad en la planificación e implementación del cierre de las minas. Con esta integración se garantiza que las operaciones mineras se cierren de forma ambiental y socialmente responsable, con el objetivo de asegurar el uso sustentable de la tierra una vez que hayan concluido las actividades mineras. En la planificación del cierre se deben establecer objetivos para lograr el restablecimiento de la biodiversidad que estén orientados a procurar que la compañía tenga un marco adecuado sobre el cual basará su programa de rehabilitación.

En la implementación del cierre, la rehabilitación y la prevención de contaminación se refie-

re a las medidas adoptadas para preparar los espacios explotados para los usos post cierre acordados. Implícitamente, esto significa no relajar las medidas de rehabilitación y prevención de contaminación en el largo plazo debido a la presencia de toxinas en el suelo o al drenaje de ácido en las rocas.

b. Planificación e implementación de la rehabilitación. El plan de rehabilitación se desarrolla tomando en cuenta toda la información existente sobre los terrenos, suelos, usos de la tierra, características del material de desecho, hidrología, y otros aspectos de la biodiversidad de relevancia partiendo de la línea base. Además, debe incluirse toda limitación técnica impuesta por dichos elementos y los estudios de la fauna y flora realizados previamente a las actividades mineras, así como los datos de sitios de referencia.

Los planes de rehabilitación deben contener información sobre las condiciones del sitio relacionada con: 1) preparación del sitio, 2) implementación y mantenimiento de las zonas de rehabilitación, 3) evaluación y control continuos de las zonas de rehabilitación.

Los paisajes posteriores al cierre deben ser coherentes con los objetivos del plan de cierre de la mina y el uso previsto del sitio después del cierre. Se privilegia en la recuperación de la cubierta vegetal la reintroducción de especies nativas acordes a la sucesión ecológica factible para la restauración del sitio y su área de influencia.

c. Herramientas que compensan daños producidos a la biodiversidad. Se aplican en el caso en que el daño sea permanente en los ecosistemas. Consisten en la financiación de la protección de una zona de conservación de naturaleza local o la compra de un área equivalente de tierra para su protección o un “pago” u otras formas de soporte para proteger la biodiversidad en otra zona designada.

d. Límites de la responsabilidad por la mitigación, rehabilitación y mejora de la biodiversidad. Se deben establecer los límites de responsabilidad entre los grupos de interés, entre los que se encontrarían la empresa minera, el gobierno, las ONG, las comunidades y otras industrias establecidas en la zona.

La descripción detallada sobre las buenas prácticas de los temas antes expuestos puede consultarse en la GBP (ICMM, 2006).

Por otro lado, el código de prácticas ambientales para minas de metales (CPA) del gobierno de Canadá (Environment Canada, 2009), también recomienda prácticas de gestión ambiental para mitigar el impacto ambiental identificado en la fase de cierre y restauración de una mina. Las recomendaciones del CPA son las siguientes:

a. Evaluación de la revisión de los planes ambientales existentes. Durante la fase de cierre de la mina deben revisarse los planes para abordar el aspecto ambiental. Estos planes que pudieron haberse establecido e implementado en fases anteriores, deben ser revisados y actualizados para asegurarse de que sigan siendo apropiados debido a las condiciones cambiantes previas al cierre de la mina. Los planes que deben ser revisados y actualizados son los siguientes:

- Planes de prevención de la contaminación
- Planes de manejo ambiental
- Planes de seguimiento e inspección de instalaciones ambientales
- Planes de monitoreo ambiental
- Planes de emergencia

b. Costos del cierre de la mina. Los costos anticipados del cierre de la mina deben reevaluarse periódicamente a lo largo del ciclo de vida de la mina. La empresa minera debe asegurarse de que los fondos económicos sean suficientes para cubrir todos los costos de cierre, y el monto de los seguros, así como de instrumentos financieros, deben ajustarse periódicamente como corresponda.

c. Financiamiento del monitoreo, mantenimiento o tratamiento a largo plazo. Después del cierre será necesario en el largo plazo el monitoreo, mantenimiento o tratamiento de efluentes en los sitios identificados. Se deben identificar e implementar mecanismos que aseguren la disponibilidad de financiamiento adecuado y estable para estas actividades a largo plazo. Al determinar el monto requerido de financiamiento, se deben considerar posibles contingencias en caso de cambios en las condiciones económicas, fallas de los sistemas operativos o trabajos de reparación importantes después del cierre.

d. Operaciones suspendidas y minas inactivas. Cada mina inactiva requiere un plan para el cuidado y mantenimiento del sitio, incluyendo el monitoreo y la evaluación continuos del desempeño ambiental del sitio, así como el mantenimiento de todos los controles ambientales necesarios para asegurar el cumplimiento continuo de los requisitos reglamentarios.

e. Aspectos a considerar en el cierre de minas. Desde la óptica ambiental, los elementos a considerar en el cierre de minas son los siguientes:

- Los trabajos en las minas subterráneas y a cielo abierto
- Las instalaciones de procesamiento de mineral e infraestructura del sitio

- El manejo de las presas de jales y tepetateras
- Las zonas de disposición de lodos, así como los requisitos de su eliminación después del cierre
- Acciones para la gestión del agua
- Las obras para disposición de residuos
- Las áreas de exploración

f. Desmantelamiento de minas subterráneas, a cielo abierto y plantas de beneficio de minerales.

En este rubro, las buenas prácticas consideran aspectos como la señalización; la atención de posibles fuentes de contaminación de equipos abandonados; la identificación y la remediación de zonas con riesgo de hundimientos; el relleno de obras subterráneas y minas a cielo abierto que no impliquen riesgos; los análisis hidrológicos para determinar los flujos de agua; la evaluación de la calidad del agua efluente de las minas abandonadas; el aseguramiento estructural de la infraestructura (caminos, redes eléctricas, tanques de almacenamiento, almacenes, etc.) que permanecerá en el sitio después del cierre de la mina, a fin de evitar riesgos a la integridad y la salud de los habitantes; la evaluación de la calidad del suelo ante posible contaminación por residuos químicos, producto de la actividad minera; la disposición en sitios apropiados de los desechos de la demolición de edificios; y la remoción de equipos o su eliminación en sitios apropiados, de acuerdo con los requisitos reglamentarios. En cuanto a este último punto, la recomendación es hacer esfuerzos para reutilizar el equipo en otro lugar o enviarlo para su reciclaje, en lugar de desecharlo en vertederos.

g. Estabilidad física y gestión a largo plazo de tepetateras y presas de jales.

Hay una amplia gama de factores que deben tenerse en cuenta en la gestión de tepetateras y presas de jales. Los principales se refieren a la estabilidad física de estas instalaciones a largo plazo, los riesgos asociados con la lixiviación de metales y el drenaje ácido a largo plazo. Deben realizarse inspecciones detalladas de las tepetateras y las presas de jales para evaluar su comportamiento estructural, identificar los impactos negativos al medio ambiente y los riesgos a la salud

y seguridad de la población en caso de fallas, y se deben desarrollar e implementar un plan de monitoreo y mantenimiento a largo plazo para tepetateras y presas de jales, así como protocolos de control a largo plazo para gestionar los riesgos identificados.

h. Manejo del agua. Durante la fase de cierre de la mina puede haber cambios significativos en la gestión del agua como resultado de reducciones en su uso en el sitio, reducciones en las actividades y la rehabilitación del sitio. Los planes de gestión hídrica durante la operación han de ser consistentes con el plan de cierre de la mina y con los planes de tratamiento de aguas residuales a largo plazo en sitios en los que sea necesario.

i. Monitoreo. El monitoreo es esencial para asegurar el establecimiento de las condiciones previstas para el uso final de la tierra y su uso sustentable. Estos programas de monitoreo operan, como ya se ha insistido en las secciones previas, a lo largo de todo el ciclo de vida de la unidad minera, y serán consistentes con el plan de cierre y el plan de rehabilitación a largo plazo. El monitoreo de los ecosistemas acuáticos y terrestres se sostiene en el tiempo necesario, en tanto prevalezcan las acciones de rehabilitación previstas.

Una descripción detallada de estas medidas y los factores a considerar pueden consultarse en el CPA (Environment Canada, 2009).



RECOMENDACIONES



7

7 RECOMENDACIONES

Los conflictos más recurrentes entre la industria minera y las comunidades son los relacionados con el impacto al medio ambiente (Saade, 2014). La contaminación por residuos mineros es otro factor de riesgo. Los sitios explotados contienen metales pesados, ácidos formados por los minerales y residuos tóxicos químicos usados en el proceso de extracción, como ácido sulfúrico, mercurio y cianuro. En muchas ocasiones, estos residuos son abandonados en el lugar, mientras que en otros casos son arrojados a ríos o mares con consecuencias desastrosas (Alfie, 2015). Estas prácticas, además de poner en riesgo la operatividad de la mina, impactan negativamente la vida acuática y la salud de la población que habita en la zona y que depende de esos recursos. Es una fórmula que no beneficia a nadie y que debe replantearse.

Las buenas prácticas en la industria minera son una serie de directrices que definen la gestión y manejo de acciones con el objetivo de asegurar condiciones favorables del uso del agua en la explotación de recursos minerales. Un programa eficaz de gestión del agua puede incorporar medidas para separar flujos de agua limpia y contaminada con el fin de ayudar a reducir los requisitos para el tratamiento de efluentes; controlar y tratar las pérdidas de filtraciones de las estructuras de contención de residuos; reducir el uso del agua; reciclar el agua para un uso posterior del proceso; y reducir los impactos sobre el régimen de aguas superficiales y subterráneas (Environment Canada, 2009).

Se recomienda la aplicación de estas buenas prácticas en función del diagnóstico realizado con las métricas propuestas. En la tabla 7.1 se integran las métricas y su intervalo para cada fase del proyecto minero o bien, si se trata de una mina en operación, se puede realizar la autoevaluación en la fase de producción.



TABLA 7.1. Integración de variables de diagnóstico por cada fase y tema.

Fase	Tema	Variable	Métrica	Intervalo	
Prospección y exploración	Oferta/disponibilidad hídrica	Monitoreo de fuentes de abastecimiento de agua	(Alta / Media / Nula) (2 / 1 / 0)	0 ≤ x ≤ 5	
		Evaluación de los flujos hidrológicos e hidrogeológicos	(Alta / Media / Nula) (2 / 1 / 0)		
Monitoreo ecológico					
Diseño y planeación	Consumo de agua	Estimación del consumo de agua en la unidad minera	(Sí / No) (1 / 0)	1 ≤ x ≤ 5	
		Cálculo de huella hídrica ecológica	(Sí / No) (1 / 0)		
Construcción	Infraestructura hidráulica	Evaluación de la disponibilidad en la cuenca	(Alta / Media / Baja) (3 / 2 / 1)	0 ≤ x ≤ 6	
		Sistemas de tratamiento de agua	(Alto / Medio / Bajo / Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)		
		Infraestructura de control	(Alto / Medio / Bajo / Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)		
		Balance hídrico	(Sí / No) (1 / 0)		
Extracción y beneficio	Seguridad	Monitoreo de la cantidad y calidad del agua	(Alto / Medio / Bajo / Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)	0 ≤ x ≤ 8	
		Manejo de los residuos sólidos y líquidos	(Alto / Medio / Bajo / Nulo) (3 / 2 / 1 / 0)		
			Inspección y mantenimiento de la infraestructura de control	(Sí / No) (1 / 0)	
			Factor de disponibilidad		0 ≤ x ≤ 1
		Autoevaluación hídrica de la unidad minera		1 ≤ x ≤ 100	
Cierre y restauración	Plan hidráulico de cierre		(Sí / No) (1 / 0)		
	Evaluación del riesgo			-1 ≤ x ≤ 100	

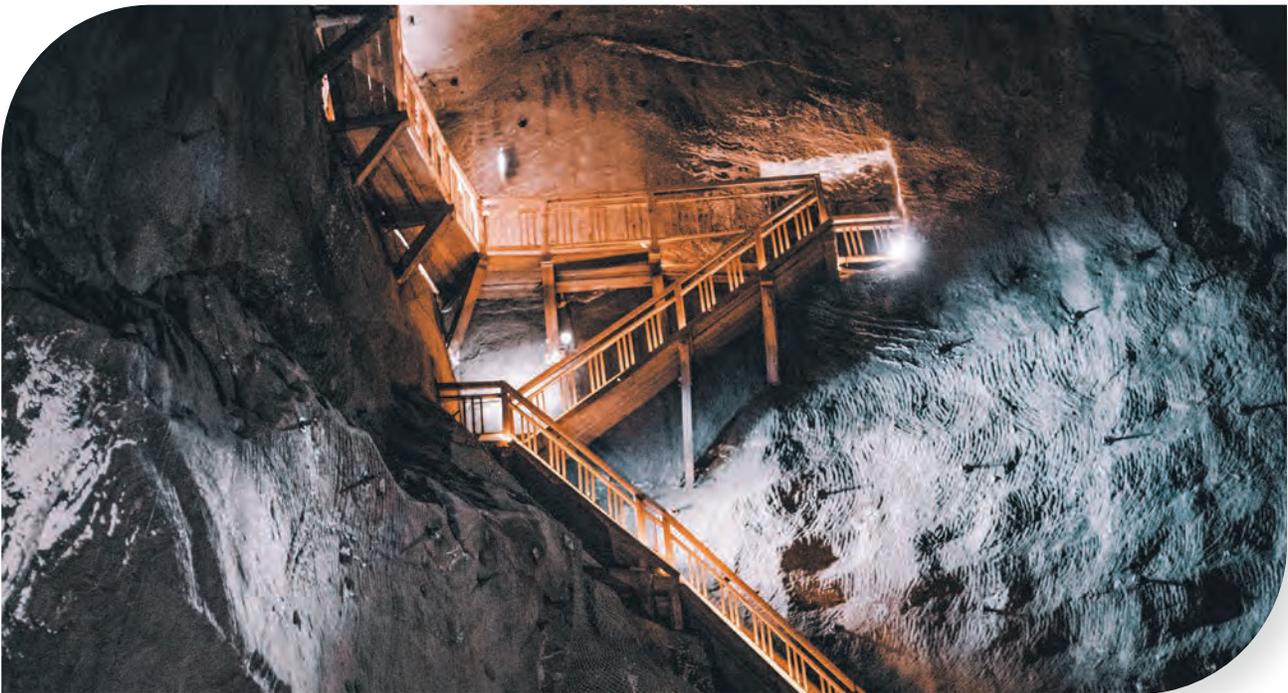
Fuente: *Elaboración propia.*

Si la evaluación en cada una de las fases cae en el intervalo comprendido entre el valor menor y el valor medio, se deben realizar esfuerzos para mejorar sus prácticas y no comprometer la sustentabilidad del uso del agua y el medio ambiente.

Con la aplicación de estas buenas prácticas se genera información que permite precisar los estudios de disponibilidad del agua en la región hidrológica, en la cuenca y en la región hidrológico-administrativa. Asimismo, se aportan elementos para el cálculo de la huella hídrica y ecológica.

Los resultados de la aplicación de buenas prácticas mejorarán en la medida en que se involucre a los interesados, ya sea en la evaluación de las variables con las métricas propuestas o bien incluyendo medidas consensuadas por los involucrados (Reig y Walker, 2021).

El esquema extractivista es insostenible, de manera que, en el cambio de paradigma hacia la tutela del agua, es deseable que las empresas mineras implementen nuevos enfoques que no solo garanticen el acceso al agua para sus operaciones, sino que también ayuden a abordar las preocupaciones por la escasez de agua en una región más amplia y para satisfacer las necesidades de otros usuarios, como las comunidades humanas, los agricultores y el medio ambiente. De esta manera se asociarán externalidades positivas a la actividad minera y aumentarán las probabilidades de obtener licencia social para la operación de la empresa (Salem, 2017).





Referencias

- Alfie, M. (2015). Conflictos socio-ambientales: la minería en Wirikuta y Cananea. Universidad Autónoma Metropolitana. <https://www.redalyc.org/pdf/325/32538023011.pdf>
- Alvarado-Rodríguez, E. (2017). Metodología del cálculo de balance de aguas en operaciones mineras a tajo abierto. I Congreso Internacional de Ingeniería y Dirección de Proyectos III Congreso Regional IPMA – LATNET. https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/4126/Metodologia_calculo_balance_aguas_operaciones_mineras_tajo_abierto.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Appelo, C.A.J., Postma, D. (2005). Geochemistry, groundwater and pollution. https://www.u-cursos.cl/usuario/c19094b1ea89f1f08e243796b671e2e5/mi_blog/r/C...A...J...Appelo_and_D...Postma-Geochemistry_Groundwater_and_Pollution_Second_Edition-Taylor___Francis_%282005%29.pdf
- Banks, D., Holden, W., Aguilar, E., Méndez, C., Koller, D., Andia, Z., Rodriguez, J., Saether, O., Torrico, A., Veneros, R. & Flores, J. (2002). Contaminant source characterization of the San Jose Mine, Oruro, Bolivia. Geological Society of London VOL 198. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.14>
- Banwart, S., Evans, K., & Croxford, S. (2002). Predicting mineral weathering rates at field scale for mine water risk assessment. University of Sheffield, UK. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.10>
- Cámara de diputados. (2014). Ley Minera. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/151_110814.pdf
- Chaparro A., E. (2007). Buenas prácticas en la industria minera: el caso del Grupo Peñoles en México, CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6324/S0700337_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Conagua. (2020). Sistema Nacional de Información del Agua. Consultado en junio de 2021. <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=cuencas&ver=reporte&o=0&n=nacional>
- De Sa, P., Espinasa, R. (2018). Buenas prácticas en la gestión de recursos minerales, Banco Interamericano de Desarrollo. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Buenas_practicas_en_la_gesti%C3%B3n_de_recursos_minerales_es_es.pdf
- Doménech, J.L. (2006). Guía metodológica para el cálculo de la huella ecológica corporativa, Centro Argentino de Estudios Internacionales, Programa Recursos Naturales & Desarrollo. https://elimpactoambiental.files.wordpress.com/2008/11/huella_ecologica_corporativa.pdf
- Drzymala, J. (2007). Mineral Processing, Foundations of theory and practice of mineralurgy, Wrocław University of Technology. <https://www.dbc.wroc.pl/dlibra/publi>

- cation/1969/edition/2070/content?&meta-lang=pl
Electro industrial. (2021, 2 de agosto) Optimización del espesador para reducir los costos de producción. <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2491>
- Environment Canada. (2009). Environmental Code of Practice for Metal Mines. <https://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-eng.pdf>
- Gandy, C. & Evans, K. (2002). Laboratory and numerical modelling studies of iron release from a spoil heap in County Durham. Geological Society of London VOL 198. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.13>.
- Goñi, D., García, M.; Guzmán, D. (2006). Métodos para el censo y seguimiento de plantas rupícolas amenazadas, Pirineos, 161, 33–582006. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2006.v161.2>
- Griem-Klee, S., Griem, W. (2016). Apuntes de geología. <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/01-Introduccion-Exploraciones-Prospeccion.htm>
- Gunson, A. (2013). Quantifying, reducing and improving mine water use. University of British Columbia. DOI: 10.14288/1.0071942
- Harraz, H. (2010). The mining cycle, Tanta University. https://www.researchgate.net/publication/301823198_The_Mining_Cycle
- Hattingh, R., Pulles, W., Krantz, R., Pretorius, C. & Swart, S. (2002). Assessment, prediction and management of long-term post-closure water quality: a case study-Hlobane Colliery, South Africa. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.20>
- Herrebrugh, R. (2018). The blue and grey water footprint of all industrial sectors and domestic water supply for each country annually in the period 1960-2015, Master tesis, University of Twente. <https://www.utwente.nl/en/et/wem/education/msc-thesis/2018/herrebrugh.pdf>
- Hoekstra, A. Chapagain, A. Aldaya, M. Mekonnen, M. (2011). Manual de evaluación de la huella hídrica. Establecimiento del estándar mundial. AENOR Internacional, S.A.U. https://waterfootprint.org/media/downloads/Water_Footprint_Assessment_Manual_Spanish.pdf
- Ingeniería Metalúrgica. (2020). Espesamiento y filtración, Diapositivas de Ingeniería Metalúrgica. Universidad Nacional del Altiplano (UNAP). <https://www.docsity.com/es/espesamiento-y-filtracion/7229030/>
- International Council on Mining & Metals. (2006). Guía de Buenas Prácticas para la minería y la biodiversidad. <https://www.cementosdeandalucia.org/wp-content/uploads/2017/05/Gu%C3%A1-de-buenas-pr%C3%A1cticas-para-la-miner%C3%ADa-y-la-biodiversidad.pdf>
- International Council on Mining & Metals. (2019). Integrated mine closure good prac-

tice guide, 2nd https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2019/guidance_integrated-mine-closure.pdf

International Cyanide Management Institute. (2002). International Cyanide Management Code For The Manufacture, Transport and Use Of Cyanide in the Production of Gold.

http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/Cyanide_code_en.pdf

International Institute for Environment and Development and World Business Council for Sustainable Development. (2002). The Report of the Mining, Minerals and Sustainable Development Project.

<https://pubs.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/9084IIED.pdf>

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2018). Producto interno bruto por entidad federativa.

<https://www.inegi.org.mx/>

Kuma, J. Younger, P. & Howell, R. (2002). Hydrogeological framework for assessing the possible environmental impacts of large-scale gold mines.

<https://sp.lyellcollection.org/content/198/1/121>

Lewinsohn, J., Salgado, R. (2017). La eficiencia en el uso del agua y la energía en los procesos mineros: casos de buenas prácticas en Chile y el Perú. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/43282/S1701066_es.pdf

López A., V. (1994). Manual Para la selección de métodos de explotación de minas, UNAM.

<https://es.scribd.com/document/229480697/Manual-Para-La-Seleccion-de-Metodos-de-Explotacion-de-Minas-1>

McLemore, V., Russell, C., Smith, K. (2009). Sampling and Monitoring for the Mine Life Cycle, Volume 6. Society for Mining, Metallurgy & Exploration.

https://www.researchgate.net/publication/278410251_ADTI-MMS_Sampling_and_Monitoring_for_the_Mine-life_Cycle

Ministerio Español de Trabajo y Asuntos Sociales, Ministerio Español de Medio Ambiente y Fondo Social Europeo. (s. f.). Manual de buenas prácticas.

https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/red-de-autoridades-ambientales-raa/mineria_tcm30-166755.pdf

Ministerio de Producción y Trabajo. (2019). Secretaría de Política Minera, Guía de recursos de buenas prácticas para el cierre de minas, República Argentina,

http://informacionminera.produccion.gob.ar/assets/datasets/Gu%C3%ADa_de_Recursos_Buenas_Practicas_Cierre_de_Minas_2019_SPM.pdf

Ministerio de Minería, Consejo Minero y Consejo Nacional de producción Limpia. (2002). Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Prácticas, Gobierno de Chile.

<https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/04/Buenas-practicas-y-gestion-ambiental.pdf>

- Miranda, M., Chambers D., y Coumans C. (2005). Marco Básico para una Minería Responsable: Una Guía para la Mejora de Estándares. http://www.frameworkforresponsiblemining.org/pubs/Framework_ES_20060601.pdf
- Morgan L. (2020). The Mining Process: 5 Lifecycle Stages Explained from Exploration to Reclamation, CRUX Investor. <https://hs.cruxinvestor.com/hubfs/The%20Mining%20Process-%205%20Lifecycle%20Stages%20Explained%20.pdf>
- Mudd, G., Northey, S. & Werner, T. (2017). Water Use and Risks in Mining. RMIT University. http://water.columbia.edu/files/2018/01/14.2017.Mudd_Report.Water-Use-and-Risks-in-Mining.pdf
- Neumann, I. & Sami, K. (2002). Structural influence on plume migration from a tailings dam in the West Rand, Republic of South Africa. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.23>
- Northey, S. A. and Haque, N. (2013). Life cycle based water footprint of selected metal production. CSIRO, Australia. <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP137374&dsid=DS3>
- Organización Meteorológica Mundial. (2010). Guía del Sistema Mundial de Observación https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5440
- Pacheco-Gutiérrez L. y Durán-Domínguez-de-Bazúa, M., (2007). Uso del agua en la industria minera. Parte 2: Estudio de opciones para reciclar el agua de proceso. https://www.researchgate.net/publication/26594459_Uso_del_agua_en_la_industria_mineraParte_2_Estudio_de_opciones_para_reciclar_el_agua_de_proceso/citation/download
- Perevochtchikova, M. y García, F. (2006). Análisis cualitativo de la red hidrométrica actual del estado de Guerrero, México, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56906103>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2016a, 12 de septiembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-159-SEMARNAT-2011. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-159-semarnat-2011>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente. (2016b, 12 de septiembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-157-SEMARNAT-2009. <https://www.gob.mx/profepa/documentos/norma-oficial-mexicana-nom-157-semarnat-2009>
- Ray, S. and Dey, K. (2020). Coal Mine Water Drainage: The Current Status and Challenges. The Institution of Engineers, India. DOI: 10.1007/s40033-020-00222-5
- Reig, P. Walker, S. (2021). Setting Enterprise Water Targets: A Guide for Companies. Strong C., World Resources Institute. <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2021-05/setting-enterprise-water-targets.pdf?VersionId=IBgyiTWDislJqDqSkjeMJKBFepcAtRg>

- Robertson, S. and Blackwell, B. (2014). Mine lifecycle planning and enduring value for remote communities. *International Journal of rural law and Policy*. DOI: 10.5130/ijrlp.il.2014.3846
- Robins, N., Dumbleton, S. & Walker, J (2002). Coalfield closure and environmental consequence - the case in south Nottinghamshire. *Geological Society of London VOL 198*. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.198.01.07>
- Saade, M. (2014). Macroeconomía del desarrollo, Buenas prácticas que favorezcan una minería sustentable. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37106/S201420301_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Salem, J. Amonkar, Y. Maennling, N. Upmanu, L. Bonnafous, L. Thakkar, K. (2018). An analysis of Peru: Is water driving mining conflicts? *Resources Policy* (Available online 4 October 2018, 101270). <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.09.010>.
- Santiago, A., Puente, I., Lagüela-S. & Veiga-M., (2002). Techniques to correct and prevent acid mine drainage: A review. Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad de Vigo, España. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v81n186.38436>
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Manual para estudios, gestión y atención ambiental en carreteras. <https://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGST/Manuales/Manuales-2016/manual-atencion-ambiental-carreteras.pdf>
- Secretaría de Economía. (2020). Marco normativo que rige las actividades de exploración, extracción, beneficio y cierre en las minas de México. <https://www.gob.mx/se/acciones-y-programas/mineria-legislacion-normatividad-y-convenios-internacionales-6986?state=published>
- Secretaría de Economía. (2019, 25 marzo). Norma mexicana NMX-AA-093-SCFI-2018. *Diario Oficial de la Federación*. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5555012&fecha=25/03/2019
- Secretaría de Economía. (2016a, 07 de diciembre). Norma Mexicana NMX-AA-051-SCFI-2016. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464459&fecha=07/12/2016
- Secretaría de Economía. (2016b, 09 de septiembre). Norma Mexicana NMX-AA-008-SCFI-2016. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5452147&fecha=09/09/2016
- Secretaría de Economía (2016c, 11 de febrero). Normas mexicanas NMX-AA-034-SCFI-2015. *Diario Oficial de la Federación*. http://www.dof.gob.mx/normasOficiales/5959/seeco12_C/seeco12_C.html
- Secretaría de Economía. (2001, 01 agosto). Normas mexicanas NMX-AA-034-SCFI-2001, NMX-AA-036-SCFI-2001, NMX-AA-038-SCFI-2001, NMX-AA-039-SCFI-2001, NMX-AA-044-SCFI-2001, NMX-AA-045-SCFI-2001 y NMX-AA-050-SCFI-2001. *Diario Oficial de la Federación*.

- cial de la Federación.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=761733&fecha=01/08/2001
- Secretaría de Gobernación. (2020, 21 de septiembre). Diario Oficial de la Federación.
https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5600849&fecha=21/09/2020
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2003). NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-141.
<http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/NOM-141-SEMARNAT-2003.pdf>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010, 15 de enero). NORMA Oficial Mexicana NOM-155-SEMARNAT-2007. Diario Oficial de la Federación.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5128126&fecha=15/01/2010#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D155,minerales%20de%20oro%20y%20plata.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2004, 13 de septiembre). NORMA Oficial Mexicana NOM-141-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación.
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=661988&fecha=13/09/2004
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s. f). Guía para la presentación del estudio de riesgo modalidad análisis de riesgo.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/120998/Guia_Estudio_de_Riesgo_Analisis_de_Riesgo_.pdf
- Secretaría de Política Minera y Ministerio de Producción y Trabajo. (2019). Gobierno de Argentina.
http://informacionminera.produccion.gob.ar/assets/datasets/Gu%C3%ADa_de_Recursos_Buenas_Practicas_Cierre_de_Minas_2019_SPM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Explotación Minera. Consultado en junio de 2021.
https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Explotacion-minera.html
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). Impacto ambiental. Consultado en junio de 2021.
https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Impacto-ambiental.html
- Tarango, R., Cobos, A.P. (2020). Problemática jurídico social del cierre de minas en México. Actualidad Jurídica Ambiental, n. 104. https://www.actualidadjuridicaambiental.com/wp-content/uploads/2020/09/2020_09_21_Cobos-Cierre-Minas-Mexico.pdf
- Timms, W. & Holley, C. (2016). Mine site water-reporting practices, groundwater take and governance frameworks in the Hunter Valley coalfield, Australia, Water International, 41:3, 351-370,
DOI: 10.1080/02508060.2016.1173278
- Younger, P. L. and Robins, N. S. (2015). Challenges in the characterization and prediction of the hydrogeology and geochemistry of mined ground.
<https://sp.lyellcollection.org/content/198/1/1>



ANEXOS

.....



ANEXO 1

Ejemplo de monitoreo ecológico. Caso: poblaciones de fauna silvestre

El objetivo es conocer el número de poblaciones existente, su ubicación y delimitación precisa, así como algunos aspectos sobre su hábitat (Goñi *et al.*, 2006). La primera etapa consiste en una prospección básica con las siguientes actividades:

- Localización de las poblaciones conocidas o citadas en la bibliografía, sobre cartografía detallada o fotografía aérea.
- Delimitación precisa sobre base cartográfica de las áreas con presencia y ausencia del taxón, así como áreas no prospectadas, pero con condiciones ecológicas potencialmente favorables para su desarrollo. Mediante trabajo de campo se delimita la posición de los grupos, manchas o tramos donde se observa la especie y se estima el área de ocupación.
- Tamaño poblacional: estimar el número de individuos totales (o reproductores) en términos de órdenes de magnitud (decenas, centenas, millares...)
- Ficha poblacional: hábitat principal y hábitat secundario, especies acompañantes potencialmente competidoras, dinámica de la comunidad animal y vegetal, procesos que condicionan el hábitat, descripción de las amenazas: factores reales y potenciales, y efectos previstos (fragmentación, reducción, declive, etc.)

En un segundo momento se busca determinar el tamaño poblacional y, si es posible, también la estructura. Conviene que el método de censo utilizado se pueda repetir a lo largo del tiempo, para poder detectar tendencias en la dinámica de las poblaciones mediante comparaciones entre censos tomados en diferentes momentos (Goñi *et al.*, 2006). El procedimiento es el siguiente:

- Selección de varias áreas con presencia de la especie, donde exista al menos una fracción poblacional accesible para el observador, ya que puede ser necesario interactuar físicamente para realizar un recuento tras identificar las de forma individual. Siempre que sea posible es recomendable identificar las especies, así como su estado reproductor para posteriormente poder calcular las frecuencias relativas (estructura por estados)
- Búsqueda y recuento de “unidades visuales” en la misma zona accesible, y posteriormente para toda el área de ocupación. Integración de esta información (mediante GPS) del punto o puntos dentro de un sistema de información geográfica.
- Cálculo y aplicación de los factores de corrección (FC). En cada área prospectada según los dos métodos anteriores (de cerca y a distancia), se calcula el cociente entre el recuento directo (total de ejemplares registrados de cerca) y el número de unidades visuales (a distancia). El FC medio obtenido (o en promedio si son varios) se multiplica después por el total de unidades visuales registradas para el conjunto del núcleo o población. Si no se han podido

obtener el FC por la completa inaccesibilidad del núcleo estudiado, se puede utilizar una media de los calculados en el resto de la población.

- Diferentes FC. En ocasiones hay sectores mucho más alejados y poco visibles que otros y áreas con mayor o menor densidad de plantas y animales. Por ello, se pueden calcular varios factores de corrección para diferentes condiciones de observación (distancia, resolución), definiendo explícitamente dichas condiciones o aplicar medias ponderadas de los FC.

Cuando no sea posible detectar individuos mediante medios ópticos, la presencia y abundancia pueden estimarse en función de las observaciones de hábitat potencial, densidad de individuos en puntos concretos y regularidad de presencia en los puntos accesibles (Goñi *et al.*, 2006). El procedimiento para calcular la densidad y el área de ocupación es el siguiente:

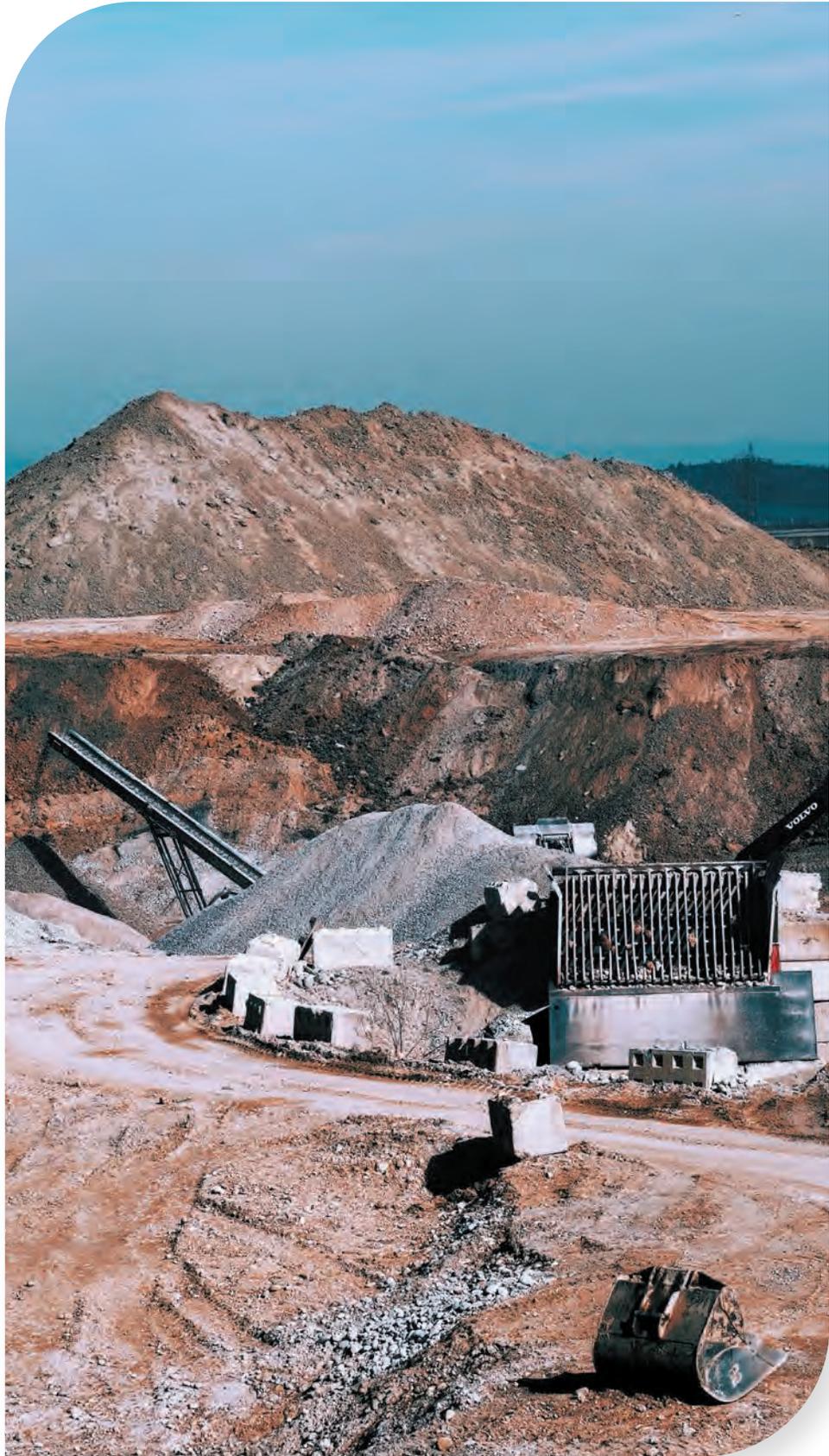
- Muestreo de la densidad. Durante el recorrido de las zonas accesibles se cuentan los individuos presentes y la superficie donde aparecen. Es importante anotar en cada sector algunas características ecológicas generales tales como especies acompañantes, micro topografía, etc. Se obtiene así un conjunto de datos de densidad asociada a cada microambiente y una definición del hábitat potencial.
- Fotografía a escala. Desde el punto que se tenga una mejor visión de la especie, se realizará una fotografía de la misma con alta resolución. En esta fotografía debe de incluirse toda la superficie del hábitat potencial que se asume ocupada por la especie y al menos dos puntos fácilmente reconocibles en fotografía aérea o en mapas topográficos.
- Calibración de la fotografía. Utilizando un sistema de información geográfica, se mide la distancia existente entre dos puntos de referencia elegidos en la fotografía que previamente han sido georreferenciados. Conocida esta distancia, se modifica la resolución de la fotografía para que, al ser incorporada a un SIG como imagen, la medición de distancia entre los dos puntos de referencia de la fotografía se corresponda con la distancia real.
- Estimación del tamaño poblacional. Sobre la fotografía resultante anterior se digitalizan las superficies de hábitat potencial, que se asumirá corresponden al área de ocupación, y ésta se multiplica por la densidad media obtenida para estimar el tamaño de la población. Si se detecta fuerte heterogeneidad, especialmente si se observan áreas con muy distintas densidades de plantas y animales, conviene realizar el cálculo de las densidades y las áreas de ocupación por separado y estimar los tamaños poblacionales de forma ponderada.

ANEXO 2

Participación efectiva de los grupos de interés

El Consejo Internacional de Minería y Metales, que ha recopilado lecciones a lo largo del tiempo relacionadas con la participación de los grupos de interés (ICMM, 2006), recomienda el siguiente enfoque estratégico para lograr su participación efectiva:

- Ir más allá del cumplimiento. Por lo general, la legislación ambiental contiene requisitos para las consultas a los grupos de interés. En tanto se puede cumplir este requerimiento, es importante que las empresas mineras utilicen esta oportunidad para construir relaciones con los grupos de interés, en lugar de realizarlo exclusivamente para cumplir con la obligación legal
- Construir relaciones sustentables a largo plazo y permanentes. Las relaciones con los grupos de interés se deberían considerar como inversiones a largo plazo y, por lo tanto, es importante darse el tiempo para que éstas se desarrollen.
- Garantizar el reconocimiento de las diferencias culturales, en especial, de las comunidades nativas. El diálogo sólo puede ocurrir si una de las partes entiende las perspectivas de la otra y viceversa. La capacitación entre culturas es importante para construir niveles de respeto.
- Considerar la participación de terceros neutrales. Así se pueden superar las asimetrías actuales o percibidas (en términos de poder, recursos, etc.). Lo que también puede servir para desarrollar confianza.
- Desarrollar confianza. La participación efectiva ocurre si hay confianza; esta debe construirse gradualmente, pues es frecuente que esté ausente o sea limitada al comienzo de las interacciones entre los grupos de interés. El punto anterior y los dos siguientes son factores potencialmente importantes para ayudar a desarrollar la confianza.
- Garantizar que los grupos de interés sean escuchados y que las promesas se cumplan.
- Fortalecer la capacitación del personal dedicado a las relaciones comunitarias y garantizarle un estatus adecuado y el respaldo necesario.



ANEXO 3

Evaluación de la huella hídrica del proceso minero

Partiendo de la metodología propuesta por Arjen Hoekstra (2011) para el cálculo de la huella hídrica de un proceso, su evaluación está dada por la expresión:

$$HH_{pm} = \frac{\sum V_{pi} - \sum V_{rj}}{P_m}$$

Donde:

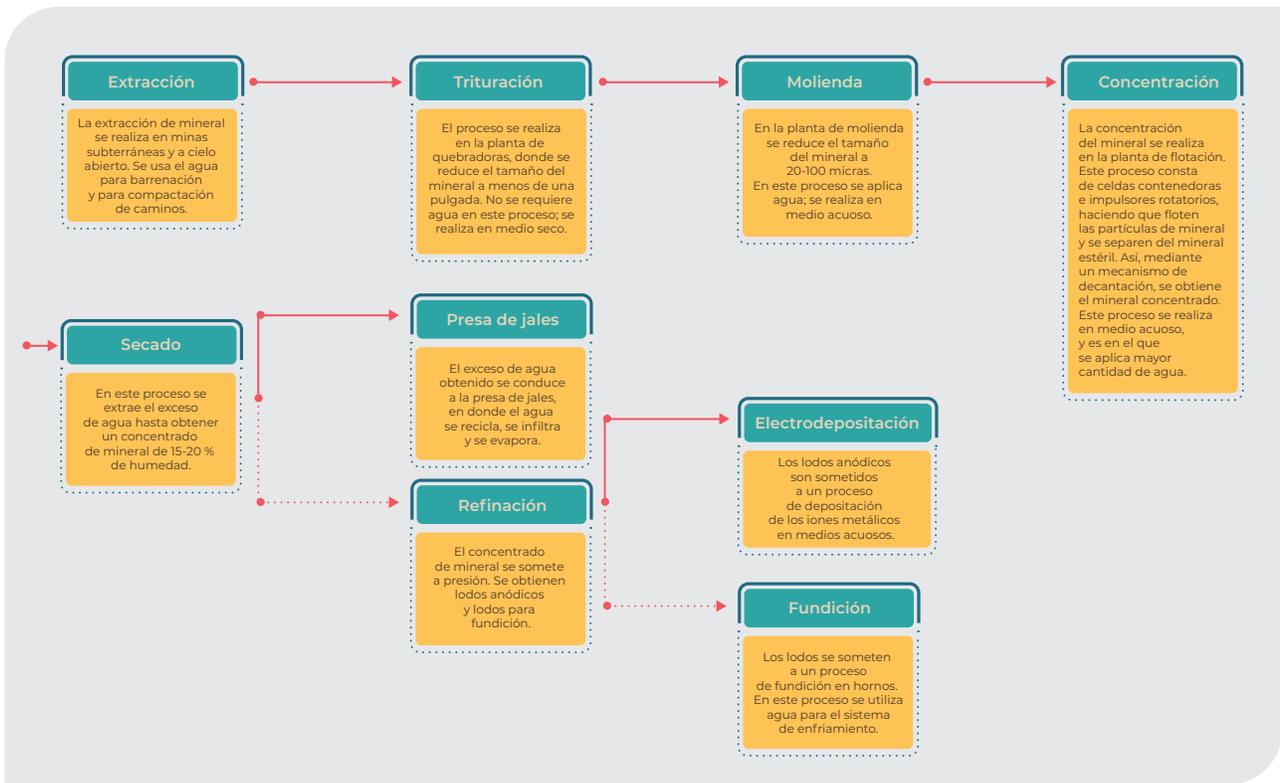
HH_{pm} = huella Hídrica del proceso minero (m³/t)

V_{pi} = consumo de agua en el proceso i (m³)

V_{rj} = volumen de agua de retorno del proceso j (m³)

P_m = producción de mineral m (t)

Tal como se puede observar en la expresión, la huella hídrica del proceso minero de cualquier mineral está dada por la sumatoria de los consumos de agua en cada proceso minero entre la producción de mineral en estudio, por lo que en este caso se analizará la manera de evaluar el consumo de agua en los procesos mineros donde se consume directa o indirectamente.



Uso de agua en procesos mineros.

Proceso de extracción: volumen de agua en la molienda

Para determinar el volumen de agua utilizado en la molienda se consideran los siguientes tres puntos:

- **Tipo de molienda**

Se refiere a que, si se realiza en seco, el porcentaje de humedad que se requiere es de 1 %, mientras que en el tipo de molienda húmedo varía de dependiendo del tipo de volumen y el porcentaje de sólidos en peso.

- **Tipo de molino**

Se refiere a la configuración del molino. Existen dos tipos de molinos: barras y bolas. De dicha configuración depende el porcentaje de humedad que debe contener la mezcla para su molienda.

- **Capacidad del molino**

El tamaño del molino determina el volumen de la mezcla que se molerá. El grado de llenado, en la práctica, está comprendido entre el 40 y el 55 %, habitualmente el 45 %, y lo forman bolas o barras (elementos molidos) y el propio mineral a moler.

Recomendaciones para diferentes tipos de molino:

Tipo de molino	% de agua en volumen	% sólidos en peso (para una densidad de 2.7-3 kg/dm ³)
Barras 1-2 mm	40-45	75-80
Bolas 0.2-0.5 mm	55-60	65-70
Bolas 0.05-0.1 mm	65-70	55-60

Conociendo la capacidad y el tipo de molino se puede estimar el volumen de agua requerido para la molienda a través de la siguiente fórmula:

$$V_m = V_{cm} \cdot 45\% \cdot \%SP \cdot \%AV$$

Donde:

V_m = volumen de agua en la molienda (m³)

V_{cm} = capacidad de molino (m³)

$\%SP$ = porcentaje de sólidos en peso (%)

$\%AV$ = porcentaje de volumen de agua (%)

Si se cuenta con excedentes de agua, restar el volumen de agua que se retorne para su reúso.

Proceso de concentración o flotación: volumen de agua en la concentración

Se divide en tres etapas

- Primaria
- Limpieza
- Agotamiento

El concentrado de la mezcla que se ingresa a las celdas de flotación es de 35 % de pulpa y 65 % de agua, por lo que es necesario conocer la capacidad y el número de las celdas por cada etapa de la flotación.

En cada una de las etapas puede haber más de una celda para llevar a cabo el proceso de flotación, dependiendo de la capacidad de la unidad minera.

Conociendo la capacidad de la celda, el volumen de agua requerido en el proceso de flotación se estima a través de la siguiente fórmula:

$$V_c = V_{cf} \cdot 65\% \cdot N_{cf}$$

Donde:

V_c = volumen de agua en la concentración (m³)

V_{cf} = capacidad de las celdas de flotación (m³)

N_{cf} = número de las celdas de flotación en las tres etapas

Proceso de secado: Volumen de agua recuperado en el secado

Se divide en dos etapas:

- Espesado
- Filtrado

En este proceso, aunque no se utiliza agua, es importante analizar el volumen de agua que se puede reciclar y utilizarlo en los procesos de la molienda o de la concentración.

• Espesado

El espesamiento constituye la separación de las partículas suspendidas en un líquido gracias a la sedimentación por gravedad. El mineral ingresa en el espesador a través del alimentador central en forma de pulpa. Los sólidos se depositan en el fondo del estanque y se acelera este proceso agregando floculante químico. De este modo se consigue que las partículas se aglomeren y así se mantiene una velocidad de deposición mayor que la del fluido que circula hacia arriba (Ingeniería metalúrgica, 2020).

La presión hidráulica, la altura y la masa del lecho son algunos de los puntos de medición críticos, así como la densidad y tasa de circulación del flujo de salida del fondo, la claridad del flujo en la superficie y la tasa de alimentación de sólidos en seco (Electro industria, 2021, tomado de En dress y Hauser Chile, s.f.).

En este proceso sí se cuenta con medición de los volúmenes de agua que salen en el flujo en la superficie (rebose). El volumen de agua contenida en el rebose que sale del espesador se reutiliza en la etapa de filtrado.

• Filtrado

Consiste en extraer el mayor contenido de agua de la pulpa mediante dos tipos de filtro:

- Por presión
- Rotación por vacío

El agua recuperada a través de estos filtros es reutilizada en los procesos previos. El volumen de agua que se puede llegar a recuperar entre las dos etapas del secado (espesor y filtrado) se puede estimar con base en su peso a través de la siguiente expresión:

$$V_{rs} = \frac{W_{ee} - W_{sf}}{\gamma}$$

Donde:

V_{rs} = volumen de agua de retorno en el proceso de secado (m³)

W_{ee} = peso de la mezcla al entrar al espesado (kg)

W_{sf} = peso de la mezcla al salir del filtrado (kg)

γ = peso volumétrico del agua (1,000 kg/m³)

La diferencia del peso de la mezcla que entra al espesador y la que sale de los filtros oscila entre 40 y 45 % (Pacheco-Gutiérrez y Durán-Domínguez-de Bazúa, 2007) .

Es importante identificar si del volumen de retorno obtenido en el proceso de secado se recircula completamente o se manda a la presa de jales. En este último caso no se considera como agua de retorno.

Proceso de presa de jales: volumen de agua recuperado

De las presas de jales se puede reciclar agua proveniente de las mezclas de las colas del proceso de flotación, del espesamiento o del filtrado, cuyas mezclas al irse sedimentando liberan agua, formando lagunas en la presa.

El agua liberada de los jales se bombea para tratarla y reutilizarla en el proceso de flotación.

El agua reciclada de las presas de jales se puede determinar por la siguiente expresión:

$$V_{rj} = C_b \cdot T_b$$

Donde:

V_{rj} = volumen de agua reciclada de la presa de jales (m³)

C_b = caudal de la bomba (m³/h)

T_b = tiempo de bombeo (h)

Proceso de electrodeposición

En la electrodeposición se utiliza el agua para crear el medio acuoso donde se hace pasar la solución rica del metal de interés.

El volumen de agua dependerá de la capacidad de las celdas electrolíticas.

El volumen de agua utilizado en la electrólisis se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{ed} = V_{ce} \cdot N_{ce}$$

Donde:

V_{ed} = volumen de agua en la electrodeposición (m³)

V_{ce} = capacidad de las celdas de electrólisis (m³)

N_{ce} = número de las celdas de electrólisis

Proceso de fundición

El agua que se utiliza en la fundición se requiere para los procesos de enfriamiento.

El volumen de agua dependerá de la capacidad de las bombas de agua utilizadas.

El volumen de agua utilizado en la fundición se calcula mediante la siguiente expresión:

$$V_f = C_b \cdot T_b$$

Donde:

V_f = volumen de agua en la fundición (m³)

C_b = caudal de la bomba (m³/h)

T_b = tiempo de bombeo (h)

Evaluación de huella hídrica gris

La evaluación de huella hídrica gris corresponde al volumen de agua a diluir con el fin de alcanzar la concentración de los parámetros contaminantes en el agua residual y cumplir así con los límites permisibles que indica la NOM-001-SEMARNAT-2021 para descarga de aguas residuales en cuerpos receptores.

Actualmente, la NOM considera 22 parámetros contaminantes, cuyos límites permisibles varían según la región donde se localice la unidad minera y el cuerpo receptor de las aguas residuales.

Parámetros contaminantes

Arsénico	Cadmio	Carbono orgánico total
Cianuro	Cobre	Color verdadero
Cromo	DQO	Enterococos fecales
<i>Escherichia coli</i>	Fósforo total	Grasas y aceites
Huevos de helminto	Mercurio	Níquel
Nitrógeno total	pH	Plomo
SST	Temperatura	Toxicidad
Zinc		

Se requiere realizar análisis de laboratorio para determinar la concentración de los 22 parámetros que enumera la NOM-001-SEMARNAT-2021 de las aguas residuales que permitan identificar el parámetro más crítico.

Asimismo, cabe señalar que los análisis de calidad del agua descargada se realizan de acuerdo con lo establecido en el Artículo 278-B de la Ley Federal de Derechos en materia de Aguas Nacionales, en donde se definen los diferentes tipos de cuerpos receptores y las zonas de descarga en el país.

Tipo de cuerpo Uso del cuerpo

	Uso en riego agrícola (A)
Ríos	Uso público urbano (B) Protección de vida acuática (C)
Embalses naturales y artificiales	Uso en riego agrícola (B) Uso público urbano (C)
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A) Recreación (B)
Aguas costeras	Explotación pesquera, navegación y otros usos (A) Recreación (B) Estuarios (C)
Suelos	Uso en riego agrícola (A) Humedales naturales (B)

Si en la unidad minera en estudio existen descargas de aguas residuales, se determinará su volumen, para lo cual se requerirá la instalación de un medidor de agua.

Ya obtenido el volumen de agua residual y realizados los análisis de laboratorio para conocer la concentración de los distintos parámetros contaminantes se evaluará la huella hídrica gris.

La huella hídrica gris de las aguas residuales está dada por la siguiente expresión:

$$HH_G = \frac{VAR_D \times CC_{AR}}{LMP_{PC}}$$

Donde:

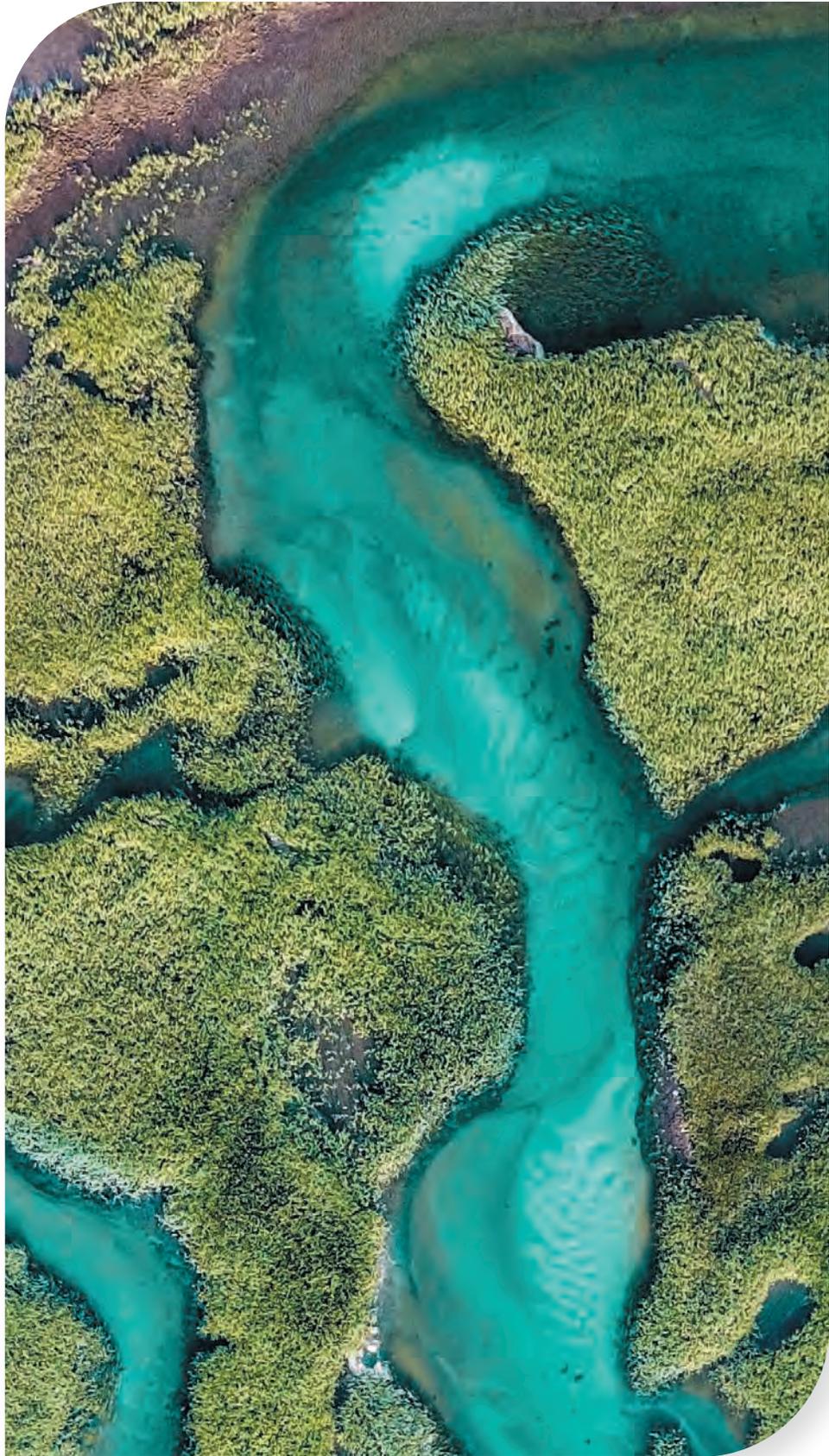
HH_G = huella hídrica gris del proceso minero (m³)

VAR_D = volumen de aguas residuales descargadas (m³)

CC_{AR} = concentración de contaminantes de parámetro más crítico de aguas residuales (mg/m³)

LMP_{PC} = límite máximo permisible del parámetro más crítico (mg/m³)

Dicha huella se podrá analizar con respecto a la producción de un mineral específico.



ANEXO 4

Descripción de buenas prácticas referentes a la disposición de residuos sólidos mineros

Planificación de la disposición de desechos de roca y jales. Los resultados de los programas específicos del sitio para la predicción de la calidad del agua son insumos para la planificación de las prácticas de gestión de la disposición de desechos de roca y jales. En particular donde existe la posibilidad de lixiviación de metales o drenaje ácido. La prevención y el control son consideraciones primordiales en el diseño de tepetateras, instalaciones de gestión de jales e instalaciones de gestión de agua asociadas.

Prevención y control de la lixiviación de metales y el drenaje ácido de la roca y los jales. Al planificar e implementar estas medidas se busca limitar o prevenir tanto la producción de roca con potencial de generación de ácido o lixiviación de metales como la disponibilidad de oxígeno para el material generador de ácido. Algunas de estas prácticas son:

- Eliminar desechos o jales potencialmente generadores de ácido bajo una capa de agua.
- Usar cubiertas compuestas con una capa saturada para limitar la infiltración de oxígeno.
- Mezclar o colocar capas de material potencialmente generador de ácido con materiales neutralizantes.
- Separar material potencialmente generador de ácido o lixiviación de metales de otros materiales para facilitar el manejo eficiente de este material y reducir el volumen de material que necesita ser manejado de una manera que prevenga o controle la generación de ácido y la lixiviación de metales.
- Desviar el agua superficial de las áreas de almacenamiento para minimizar la descarga y los volúmenes de efluentes.

Selección de ubicaciones para tepetateras y presas de jales. La selección del sitio para la construcción de tepetateras e instalaciones de manejo de jales debe considerar los siguientes factores: los flujos de agua superficial y subterránea local y regional; la posible contaminación de agua superficial y subterránea; un esquema de gestión del agua y balance hídrico preliminar; la topografía; los sitios de tepetateras existentes (abiertas o cerradas); los usos de la tierra y los recursos existentes y posibles, incluido el uso de la cuenca hidrográfica receptora y la distancia de las zonas habitadas y de actividad humana; las condiciones ambientales de referencia, incluida la flora y fauna naturales; los impactos potenciales sobre la vegetación, la vida silvestre, la vida acuática y las comunidades aguas abajo; el estado de los cimientos de la presa; el plano de deposición y el volumen y capacidad de almacenamiento; el diseño preliminar de estructuras de contención y gestión del agua; el área de impacto potencial; las posibles liberaciones de partículas en suspensión en el aire; las consideraciones estéticas; y las consideraciones sobre el cierre de

la mina. La selección del sitio ha de estar claramente documentada y justificada, incluida la discusión de sitios alternativos que fueron considerados y rechazados.

Diseño de instalaciones de manejo de jales. Los siguientes factores deben ser considerados en el diseño de instalaciones de manejo de jales: características físicas y químicas del material de jales, incluyendo lixiviación de metales y potencial de drenaje ácido, así como el potencial de licuefacción; la hidrología e hidrogeología, incluidas las condiciones climáticas locales, los fenómenos meteorológicos extremos y las proyecciones de aumento e intensificación como resultado del cambio climático; la geología y consideraciones geotécnicas, así como datos sísmicos y riesgo de terremotos; la disponibilidad y características de los materiales de construcción; y la topografía de la instalación de manejo de jales y áreas adyacentes.

Al diseñar las instalaciones de manejo de jales, el tiempo de retención de las aguas residuales en las instalaciones ha de maximizarse para permitir la sedimentación de los sólidos en suspensión y la degradación natural de contaminantes como el amoníaco y el cianuro.

Al diseñar y construir estructuras de contención para instalaciones de manejo de jales, tales como presas, han de emplearse estrictos estándares de ingeniería.

Es fundamental considerar, durante la fase de diseño y construcción, el monitoreo e inspección a largo plazo de las estructuras de contención para las instalaciones de manejo de jales. En particular, la instalación de la instrumentación adecuada durante la construcción para facilitar el monitoreo durante las operaciones de la mina y las fases de cierre. Como se ha referido anteriormente, el diseño se realiza en apego a las condiciones específicas de la ubicación, como pendientes, actividad sísmica y requisitos de drenaje del sitio, particularmente durante las condiciones de flujo máximo.

Estabilidad a largo plazo de las tepetateras. Las tepetateras estériles deben diseñarse para permanecer estructuralmente estables durante todo el ciclo de vida de la mina y después del cierre, considerando los datos de estabilidad sísmica local y el riesgo de terremotos.

Estabilidad a largo plazo de las instalaciones de gestión de jales. En cada fase del ciclo de vida se evalúan y gestionan los riesgos de las instalaciones de gestión de jales para determinar los posibles modos y probabilidades de fallas y las consecuencias de las fallas. Es importante planificar medidas para reducir estos riesgos y poner en marcha planes de contingencia en caso de avería.

Estabilidad estructural a largo plazo en caso de riesgo a desastres. Las instalaciones de manejo de jales deben estar diseñadas para resistir un evento de inundación máxima probable o para permanecer estructuralmente estables en caso de un terremoto máximo creíble.

ANEXO 5

Descripción de buenas prácticas referentes al tratamiento de aguas residuales

Planificación y construcción de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Se tendrá en cuenta el plan de gestión del agua, los resultados de la predicción de la calidad de las aguas residuales, los planes de eliminación de estériles y jales, los requisitos reglamentarios relevantes para la calidad de los efluentes, así como los indicadores de desempeño ambiental relevantes, incluyendo cualquier objetivo de calidad del agua.

Planificación del manejo del cianuro. (Ver anexo 8). Si se va a utilizar la degradación natural del cianuro como método de tratamiento, la instalación de manejo de jales debe diseñarse de tal manera que el tiempo de retención de la fase líquida sea el adecuado para que ocurra la degradación natural durante condiciones de flujo alto, por ejemplo, durante la escorrentía de primavera.

Eliminación de aguas residuales y aguas residuales domésticas. Cuando las aguas residuales o las aguas residuales domésticas se eliminen en el sitio en lugar de enviarlas a una planta de tratamiento de aguas residuales municipal para su eliminación, se debe construir una instalación de tratamiento de aguas residuales en el sitio. El objetivo de estas instalaciones es prevenir la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, incluidos los suministros de agua potable, y cumplir con las normas aplicables. Los lodos del tratamiento de aguas residuales y aguas residuales domésticas deben eliminarse de manera aceptable. Los lodos se pueden eliminar en el sitio o en un vertedero, se pueden usar como material de cobertura para jales o rocas estériles, o eliminarlos fuera del sitio.



ANEXO 6

Reducción del consumo de agua en la minería

El Ministerio de Minería, Consejo Minero y Consejo Nacional de Producción Limpia del gobierno chileno identifican que entre los principales aspectos que se consideran al diseñar un sistema de gestión del recurso hídrico están la reducción del consumo de agua fresca, lo que implica una disminución en los caudales de aguas residuales y de los costos de tratamiento respectivos (Ministerio de Minería *et al.*, 2002) y los pasos o etapas a seguir para reducir el consumo de agua de primer uso, que son los siguientes:

- Análisis de los registros históricos de los consumos y su relación con los niveles de producción a fin de determinar los requerimientos de agua reales de la planta.
- Análisis de las descargas de aguas residuales para determinar la cantidad y calidad del agua que se pierde en el proceso y que no pasa a ser parte del producto final.
- Análisis y evaluación de las instalaciones y de las actuales metodologías de trabajo para estudiar posibles mejoras y cambios de procedimientos, de equipos, etc.
- Verificación de las pérdidas de agua en las diferentes líneas. Corrección de los problemas detectados y estudio de factibilidad a la implementación de las posibles mejoras.
- Análisis de los posibles circuitos de recirculación de agua, considerando los flujos que provienen de diferentes operaciones y procesos unitarios que podrían ser utilizados en la misma etapa o en otra, de acuerdo con las condiciones requeridas por cada una de ellas.

Los consumos más significativos de agua en la mediana y gran minería del cobre se centran en cinco etapas (Ministerio de Minería *et al.*, 2002), las cuales incluyen los procesos minero-metalúrgicos:

- Evaluar y planificar correctamente las instalaciones asociadas, considerando la capacidad y el potencial de ruptura de estas, la probabilidad y frecuencia con que se presentan flujos diferentes a los de diseño y el impacto de una emergencia sobre el recurso hídrico, dentro y fuera de la faena.
- Realizar mantenimiento preventivo adecuado a las instalaciones.
- Instalar mecanismos de detección oportuna de fugas en las líneas de agua del proceso.
- Monitorear y registrar permanentemente el nivel, calidad y caudal de las estaciones distribuidas.
- Buscar permanentemente la reducción del consumo de agua potable, eliminar las pérdidas en las instalaciones sanitarias e incentivar la maximización de la utilización del agua para consumo doméstico.



ANEXO 7

Tecnologías para optimizar el consumo e incrementar la disponibilidad de agua

Tal como fue descrito en el capítulo introductorio, es fundamental establecer un sistema de medición y monitoreo de la cuenca y la unidad minera que cimiente la cultura de la toma de decisiones basada en datos abiertos para contribuir a la transparencia y el acceso a la información. Con esta base es posible evaluar la aportación que realizan las nuevas tecnologías a la gestión del recurso hídrico. Entre las tecnologías propuestas en América Latina para optimizar el consumo y aumentar la disponibilidad de los recursos hídricos se cuentan las siguientes (Ministerio de Minería *et al.*, 2002):

Tecnologías para optimizar el consumo:

- Control automático del sistema de espesaje. Optimizar la recuperación de aguas a través de un controlador inteligente, aumentando la densidad del jale y disminuyendo así los consumos de agua de la concentradora.
- Monitoreo permanente de consumo. Controlar los consumos de agua por área operativa, realizando además auditorías internas y cobro de multas por sobreconsumo.
- Recirculación de aguas desde tranques lejanos. Recircular aguas claras des de los tranques y depósitos de jales hacia la faena.
- Tratamiento por biorremediación de efluentes contaminados. Utilizar tratamientos biohidrometalúrgicos para precipitar en sales estables los contaminantes presentes en los efluentes de los procesos hidrometalúrgicos, utilizando filtros y prensas para recuperar agua dentro de estos procesos.
- Control de drenaje de sistemas de lixiviación. Utilizar software y materiales adecuados para planificar el drenaje de los sistemas de lixiviación, reduciendo las pérdidas de soluciones por infiltración, fugas o formación de bolsones de mineral saturado.
- Filtrado de jales. Utilizar filtros de banda para secar los jales, aumentando su concentración en peso hasta un 75 % y, posteriormente, conducirlos al depósito a través de correas o camiones.
- Optimización de consumos en mina. Utilizar tecnologías y procedimientos que permitan minimizar el uso de agua en las faenas mineras de carguío de mineral, regadío de caminos y perforación.
- Espesaje extremo. Utilizar espesadores de mayor altura para producir descargas de jales hiperconcentrados, recuperando mayor cantidad de agua, y utilizar el método de tranque inclinado para su depósito.

- Molienda seca y centrifugado neumático. Moler el mineral hasta el tamaño de liberación óptimo de modo que puedan ser separadas por clasificación seca antes de entrar a flotación.
- Eficiencia en el proceso. No es una buena práctica en sí misma, sino un criterio que se implementa en planta para obtener una mejor recuperación.
- Soplado y extracción desde acuífero remanente en depósitos de jales. Extraer el agua presente en la zona saturada de depósitos de jales en operación o abandonados, a través de pozos drenantes y de soplado.
- Utilización de tuberías de drenaje. Utilizar un sistema análogo a los empleados en los embalses de agua y terrenos agrícolas para captar agua de los depósitos de jales..

Tecnologías para aumentar la disponibilidad:

- Embalses superficiales para crecidas. Construir embalses de agua para utilizar los recursos hídricos eventuales provocados por crecidas hidrológicas.
- Recarga artificial de acuíferos. Utilizar zonas geológicas apropiadas para la acumulación subterránea de agua proveniente de crecidas hidrológicas.
- Utilización de agua de mar. Utilizar el agua de mar como fuente de recursos hídricos.
- Captación de neblina. Recolectar agua a partir del paso de neblina con alta humedad a través de una superficie determinada.
- Explotación temporal de recursos hídricos. Ubicar recursos fósiles subterráneos para su posterior explotación en un plazo determinado.

ANEXO 8

Procedimientos para la gestión de productos químicos

Las instalaciones de almacenamiento y contención de sustancias químicas utilizadas en cada mina han de diseñarse y construirse para cumplir con las normas, reglamentaciones y pautas apropiadas de las instituciones reguladoras pertinentes y la política, los objetivos y las metas ambientales de la empresa.

Como mínimo, las instalaciones de almacenamiento y contención de productos químicos deben gestionarse para minimizar la posibilidad de derrames; proporcionar contención en caso de derrames; cumplir con los estándares del sistema de información de materiales peligrosos en el lugar de trabajo; asegurarse de que los materiales incompatibles se almacenen de manera que se evite el contacto accidental y las reacciones químicas con otros materiales; y minimizar la probabilidad de que un derrame pueda tener un impacto significativo en el medio ambiente.

Para las minas que usarán cianuro para el procesamiento de minerales de oro o metales básicos, el manejo del cianuro debe planificarse de manera consistente con las prácticas descritas en el *Código internacional de manejo del cianuro* (International Cyanide Management Institute, 2008). En particular, la planificación del manejo del cianuro debe tomar en consideración:

- Las medidas para minimizar la cantidad de cianuro requerida, reduciendo así el uso de reactivos y limitando las concentraciones en los jales
- El diseño e implementación de medidas de prevención, manejo, mitigación y monitoreo de filtraciones de las instalaciones de cianuro para proteger las aguas superficiales y subterráneas, así como las especies acuáticas asociadas
- El diseño y operación de sistemas de tratamiento de cianuro para reducir las concentraciones de cianuro en los efluentes vertidos al medio ambiente
- El diseño e implementación de medidas de prevención y contención de derrames para tanques de proceso y tuberías
- La planificación e implementación de procedimientos para el desmantelamiento efectivo y seguro de las instalaciones de cianuro

Si se va a utilizar la degradación natural del cianuro como método de su tratamiento, la instalación de manejo de jales debe diseñarse para asegurar que el tiempo de retención de la fase líquida sea el adecuado, para que ocurra la degradación natural durante condiciones de flujo alto, por ejemplo, durante la escorrentía de primavera.

Se deben evaluar continuamente las oportunidades para reducir las cantidades de sustancias químicas potencialmente dañinas utilizadas en la operación de la mina. Esta evaluación debe incluir la selección de equipos y procesos; posibles modificaciones al equipo existente; nuevas tecnologías, procesos y procedimientos; la sustitución de diferentes materiales; el mantenimiento de equipo; y programas de capacitación para personal operador. Sobre la base de esta evaluación se deben implementar medidas para reducir el uso de sustancias químicas potencialmente dañinas, según corresponda.





MEDIO AMBIENTE
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA DEL AGUA