



Energía



20
26

Guías

Minero / Ambientales

BENEFICIO Y
TRANSFORMACIÓN

La Energía de Nuestra Gente



GUÍA MINERO-AMBIENTAL DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN

Ministerio de Minas y Energía

Agencia Nacional de Minería

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

2026

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Ministro de Minas y Energía
Edwin Palma Egea

Jefe de Oficina de Asuntos Ambientales y Sociales
Juan Bernardo Rosado Duque

Director de Formalización Minera
Alexander Reina Otero

Directora de Minería Empresarial
Andrea Feo Mahecha

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible (E)
Irene Vélez Torres

Viceministra de Políticas y Normalización Ambiental
Edith Bastidas Calderón

Director de Asuntos Ambientales Sectorial
y Urbano (DAASU)
Yiovani Palechor Mopán

EQUIPO TÉCNICO MINISTERIO
DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Karen Viviana López
Sergio Rodrigo Hernández
Alfonso Laso Beltrán

AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

Presidenta
Lina Beatriz Franco Idárraga

Vicepresidente de Seguimiento,
Control y Seguridad Minera
Jimmy Soto Díaz

EQUIPOS MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

Equipo Oficina Asuntos Ambientales y Sociales
Oscar Iván Silva Hernández (Coordinador de Gestión Ambiental)
Ivette Johanna Gómez Bustos

Equipo Sentencia Ventanilla Minera
Juan Camilo Ospina Salcedo
Cristhian Octavio Hernández Marín
Olga Lucía Mellizo Ortiz
Juan Mercado Castillo

Equipo de Dirección de Minería Empresarial
Edna Margarita Gonzáles
Ligia Esperanza Pérez
Luis Guillermo Vega

Equipo Dirección de Formalización Minera
Carlos Eduardo Bermúdez Ocampo
(Coordinador de Formalización de las Actividades Mineras)

Luis Alexander Sarmiento Vásquez
(Coordinador de Fomento a la Minería
Sustentable y Seguridad Minera)

Leidy Marícel Cuellar Solano
Sandra Milena Sánchez
Elsa Yadira Laiton Sotelo

EQUIPOS MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Karen Viviana López
Sergio Rodrigo Hernández
Alfonso Laso Beltrán

EQUIPO AGENCIA NACIONAL DE MINERÍA

Mónica María Muñoz
Susana Patiño Chía
Osvaldo Corredor Molano
Andrés Arturo Méndez
Katheryne Alexandra Erazo
Fabio Antonio Gutiérrez Camacho
Wilson Ferney Vélez Giraldo
Yeimi Andrea Pedraza Huertas

Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes	3
2. Objetivo	5
3. Ámbito de aplicación de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación	7
4. Marco jurídico	10
5. Consideraciones preliminares	14
6. Aspectos para considerar en los procesos de beneficio y transformación de minerales	17
6.1. Estudio de las asociaciones del mineral	18
6.2. Descripción de operaciones de beneficio	18
6.2.1. Trituración	19
6.2.2. Molienda	20
6.2.3. Clasificación	21
6.2.4. Concentración	22
6.2.5. Lavado	24
6.2.6. Homogeneización	24
6.3. Descripción de procesos de transformación	24
6.3.1. Procesos hidrometalúrgicos	25
6.3.2. Procesos pirometalúrgicos	27
6.3.3. Electrometalurgia	29
6.3.4. Procesos de aglomeración	30
7. Componente ambiental en el marco del beneficio y transformación de minerales	32
7.1 Componente ambiental para proyectos mineros en etapa de explotación amparados en un título minero, contrato de concesión o beneficiarios de procesos de formalización que incluye las operaciones de beneficio y transformación	34
7.2 Componente ambiental para plantas de beneficio y transformación que procesan minerales auríferos por fuera de los títulos y que prestan sus servicios a terceros.	35
7.2.1. Consideraciones especiales para plantas de beneficio de oro dentro de áreas con títulos mineros existentes	36



7.3	Componente ambiental para plantas de beneficio y transformación como siderúrgicas, cementeras y plantas concreteras fijas cuya producción de concreto sea superior a diez mil (10.000) metros cúbicos/mes.	36
7.4	Componente ambiental para operaciones de beneficio y transformación de minerales que no requieran del trámite de licencia ambiental	37
8.	Demanda, uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales renovables	38
9.	Seguimiento y monitoreo ambiental	41
9.1	Informe de Cumplimiento Ambiental	43
	Economía circular y las mejores técnicas disponibles en el proceso de beneficio y transformación del mineral	44
9.2	Informe de Cumplimiento Ambiental. Autoridad ambiental	50
10.1	Casos de éxito de economía circular en proyectos mineros	51
10.2.	Las mejores técnicas disponibles y prácticas mineras aplicables a operaciones de beneficio y transformación	51
11.	Mitigación y adaptación al cambio climático en las plantas de beneficio y transformación	57
11.1	Mitigación: producir con menos huella	58
11.2	Adaptación: operar de forma resiliente	58
	Referencias	59



Listado

de Tablas

Tabla 1 Permisos de uso, aprovechamiento o afectación
de los recursos naturales renovables

40

Listado de Figuras

Figura 1	Aspectos generales de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación	2
Figura 2.	Actores asociados en la aplicación de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación	9
Figura 3.	Normas minero-ambientales de la etapa de beneficio y transformación.	13
Figura 4.	Obligaciones contractuales principales.	15
Figura 5.	Maquinaria del proceso de trituración.	19
Figura 6.	Molino de bolas	20
Figura 7.	Molino autógeno	20
Figura 8.	Sistema de criba vibratoria y trommel	21
Figura 9.	Equipos de clasificación en fluido.	21
Figura 10.	Equipos para concentración por gravedad.	22
Figura 11.	Celda de flotación en funcionamiento	23
Figura 12.	Separador magnético de banda cruzada	23
Figura 13.	Tanques para lixiviación por agitación mecánica	26
Figura 14.	Tinas para lixiviación	26
Figura 15.	Proceso de fundición	28
Figura 16.	Planta cementera	29
Figura 17.	Proceso de electroobtención en el procesamiento de cobre	30
Figura 18.	Briquetas de carbón	30
Figura 19.	Pelets de mineral de hierro	31
Figura 26	Esquema temático del Informe de Cumplimiento Ambiental elaborado por el concesionario minero.	43
Figura 27	Oportunidades de circularidad frente a la cadena de valor minera	46
Figura 28	Orientación para las acciones de gestión de recursos	47

Introducción

La presente actualización de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación contiene aspectos aplicables a estas operaciones, siendo un instrumento orientador de consulta para todas las escalas de la minería. Su objetivo es promover la realización de actividades de beneficio y transformación de manera responsable, implementando las mejores técnicas disponibles, para asegurar, de esta manera, prácticas sostenibles en el sector.

La actualización de la citada guía se fundamenta en los avances técnicos y normativos generados a partir del año 2002, en línea con la sentencia del Consejo de Estado del 4 de agosto de 2022, que promueve la protección del ambiente y la gestión sostenible de recursos, en la cual se establece:

ORDENAR al Ministerio de Minas y Energía y al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que, en el término de (1) año, contado a partir de la ejecutoria de esta providencia, actualicen las guías minero-ambientales y los términos de referencia con el propósito de ajustarlos a lo dispuesto en el artículo 19 de la Ley 1753 de 2015. (Colombia, Consejo de Estado, Sala de lo Contencioso Administrativo, Sección Primera, 2022)

Así mismo, esta actualización se enmarca con los lineamientos del Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia, potencia mundial de la vida” (Colombia, Departamento Nacional de Planeación, 2023) y lo establecido en las normas minero-ambientales.

Para la actualización de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación, expedida bajo el amparo de la normatividad minera vigente en el 2001 y adoptada en el 2002 mediante la Resolución 18-0861, emitida por los ministerios de Minas y Energía y de Medio Ambiente (actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), fueron incluidas las normas, los manuales y las políticas expedidas a la fecha y que se encuentran vigentes. Adicionalmente, se incluyen conceptos técnicos relacionados con la economía circular y las mejores técnicas disponibles, en pro de ejecutar las actividades mineras de forma responsable con el ambiente.

Así mismo, la guía menciona los términos de referencia para las actividades de beneficio y transformación que se van a desarrollar, adaptándose a las características específicas de cada proyecto minero, incluyendo los tipos de minerales y los métodos tecnológicos de beneficio y transformación.”, pero en el contenido del documento no se encuentran ni términos de referencia, ni discriminación de información por tipos de minerales; así mismo no se identifican orientación para la aplicación de métodos tecnológicos de beneficio y transformación

Esta guía proporciona una orientación para implementar el modelo de economía circular, optimizando el aprovechamiento de recursos en las actividades de beneficio y transformación. En este sentido, contempla acciones para una minería responsable y sustentable que permita la conservación de los ecosistemas, la protección de comunidades, el ordenamiento del territorio alrededor del agua, la prevención, la compensación, la mitigación y la corrección —si es del caso— tanto de impactos ambientales como de conflictos sociales, económicos y culturales, ajustándose con políticas nacionales y regionales en materia minero-ambiental, de-

rechos humanos, género, participación comunitaria, desarrollo económico y gestión del riesgo, cumpliendo así con el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 “Colombia, potencia mundial de la vida”, Ley 2294 de 2023.

La guía también contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, destacando aspectos como el fin de la pobreza, el trabajo decente, el crecimiento económico, la innovación y la producción y consumo responsables.

Para la aplicación de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación, se sugiere:

- ✓ Disponer de un equipo interdisciplinario, para abordar las diversas necesidades del proyecto, adaptándolas a las situaciones técnicas mineras, ambientales, territoriales y socioeconómicas.
- ✓ Complementario a la información primaria, se puede emplear información secundaria existente de organizaciones mineras o no gubernamentales, academia y expertos de diferentes áreas.

Paralelo a esta guía se actualizaron las guías minero-ambientales de exploración y explotación. Así mismo, se elaboró una guía minero-ambiental y una cartilla para los procesos diferenciales de formalización y pequeña minería.

En la Figura 1 se presenta de forma general los pasos para tener en cuenta durante el proceso de beneficio y transformación.

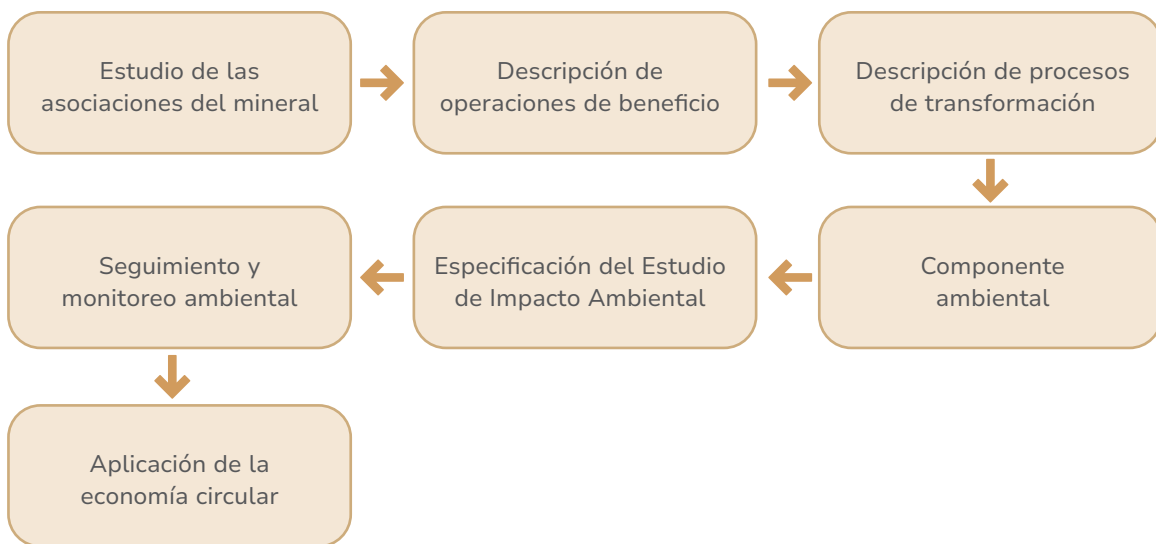


Figura 1 Aspectos generales de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación
Fuente: Elaboración propia.

¹ Los Objetivos de Desarrollo Sostenible, también conocidos como “Objetivos Globales”, fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como un llamamiento universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que para el 2030 todas las personas disfruten de paz y prosperidad.

² Remitirse a la Resolución 143 del 27 de marzo del 2013, la cual establece los términos de referencia para los trabajos de exploración minera y el Programa Mínimo Exploratorio.



1

Antecedentes

Cada tarea
de m

ARIS MINING

Desde la adopción inicial de las guías minero-ambientales en el marco de la normatividad minera y ambiental vigente, y su implementación mediante la Resolución 18-0861 de 2002, expedida por los ministerios de Minas y Energía y de Medio Ambiente, se han logrado avances significativos en la consolidación de instrumentos jurídicos, técnicos y ambientales. Entre ellos se destacan la ley 685 o Código de Minas, términos de referencia para elaborar el Documento Técnico Minero, el “Estándar colombiano para el reporte público de resultados de exploración recursos y reservas minerales”, los lineamientos para la preparación, presentación y evaluación de estudios ambientales, los manuales para la identificación de áreas de influencia, el Plan de Gestión Social, la guía de buenas prácticas mineras, los sistemas de información geográfica, entre otros.

Estos desarrollos han sido fundamentales para el fortalecimiento y evolución de la actividad minera en el país, al ser aplicables a todo tipo de minerales, y adaptables a las condiciones particulares de los proyectos de cualquier escala.

Estos instrumentos han tenido como propósito central optimizar la planificación y ejecución de las actividades mineras. Por ello, se han incorporado las mejores técnicas disponibles, las prácticas ambientales responsables y los conceptos de economía circular.

En el marco del fortalecimiento de las capacidades para el desarrollo del sector, el Ministerio de Minas y Energía, ha creado el Centro de Aprendizaje Minero, un micrositio en internet que ofrece información y formación en temas claves como asistencia técnica, gestión ambiental y social, gestión de calidad y altos estándares, mitigación del riesgo, seguridad y salud en el trabajo, operación de maquinaria, entre otros temas³.

³ Se encuentra información técnica disponible en la página web del Centro de Aprendizaje Minero (Colombia, Ministerio de Minas y Energía, s. f.).



2

Objetivo

Orientar el desarrollo de las actividades de beneficio y transformación hacia la adopción de buenas prácticas, la aplicación de las mejores técnicas disponibles, el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales y la adecuada planificación y el ordenamiento del territorio, con el fin de promover la gestión minera, ambiental, social integral, así como la incorporación de la economía circular.





3

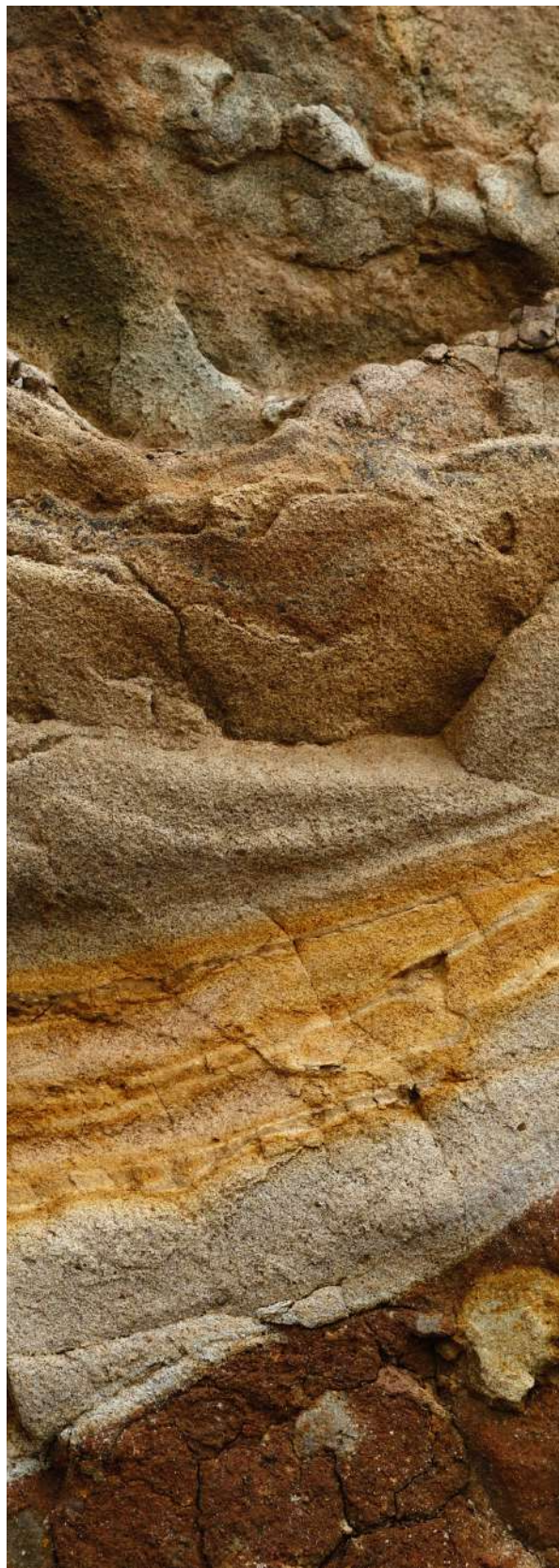
**Ámbito de
aplicación de
la Guía minero-
ambiental de
beneficio y
transformación**

Las operaciones de beneficio y transformación del mineral hacen parte de la etapa de explotación; por lo tanto, en la elaboración de los instrumentos minero-ambientales, como el Programa de Trabajos y Obras y/o instrumento técnico aplicable y el Estudio de Impacto Ambiental (documento requerido para solicitar la licencia ambiental global), se deben incluir los aspectos consignados en esta guía, como también considerar los manuales y términos de referencia definidos por el Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, las Corporaciones Autónomas Regionales, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales, entre otras entidades relacionadas. Esta guía puede ser entendida como para el uso de aquellos que pueden acceder a la etapa de transformación y beneficio. De igual manera, lo planteado en esta guía es aplicable para las plantas de beneficio y transformación que procesan minerales auríferos y presten sus servicios a terceros. Para estos casos, se establece la obligatoriedad de estar inscritos en el Registro Único de Comercializadores de Minerales (RUCOM), así como cumplir los requisitos para la comercialización del mineral a beneficiar.

La inscripción en el RUCOM es una condición para la comercialización legal de minerales, que aplica tanto para quienes generan un producto minero —material triturado, concentrados, barras, lingotes, etc.— desde su planta de procesamiento y desean venderlo, como para quienes compren minerales a un tercero para aplicarles procesos de beneficio o transformación posteriores.

Quienes estén cobijados por una figura de explotador minero autorizado serán clasificados en el RUCOM bajo la figura de “explotador” y la autoridad minera se encargará de la actualización de su listado. Por otra parte, quienes se dedican a la comercialización o tienen un contrato de operación aparecen bajo la figura de “comercializadores” y deben renovar su inscripción en RUCOM cada año, generando un certificado de renovación en el sitio web de la Agencia Nacional de Minería (Colombia, ANM, s. f.).

De acuerdo con lo anterior, el Decreto 1073 de 2015, artículo 2.2.5.6.2.2, detalla los criterios necesarios para que las plantas de beneficio, aquellas dedicadas a la compra de minerales de terceros, puedan registrarse en el RUCOM. Posteriormente, el artículo 2.2.5.6.2.3, del mismo decreto, define las responsabilidades y obligaciones que deben cumplir las plantas de beneficio una vez estén inscritas en el RUCOM, asegurando así su operación conforme a la normativa vigente.



En la Figura 2 se describen los actores y la función que debe cumplir cada uno de ellos en la etapa de beneficio y transformación de un proyecto minero.



Figura 2. Actores asociados en la aplicación de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación
Fuente: Elaboración propia, con base en la Ley 685 de 2001 y el Decreto 1076 de 2015.

A man with a short haircut and a grey shirt is smiling while pouring an orange liquid from a green bowl into a funnel. The funnel is placed over a container, and the liquid is dripping out. The background is a blurred outdoor setting with a fence and trees. The right half of the image is covered by a semi-transparent orange overlay.

4

Marco jurídico

La **Figura 3** contiene dos esquemas con los lineamientos asociados a las normas mineras y ambientales respectivamente, aplicables a la etapa de explotación.

LINEAMIENTOS DEL SECTOR MINERO

2011 -2012	• Se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 "Prosperidad para todos" • RUCOM mediante el Decreto 2637 DE 2012
2013 - 2014	• Se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país; se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación, y se dictan otras disposiciones • Se adoptan las condiciones de las pólizas minero-ambientales (Agencia Nacional de Minería).
2015	• Se emite el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 "Todos por un nuevo país" • Se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo • Se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía • Se definen los aspectos técnicos, tecnológicos, operativos y administrativos para ejercer la labor de fiscalización minera • Se adopta el glosario técnico minero • Se expide el Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas
2016 - 2017	• Se establece la clasificación minera • Se adoptan términos de referencia para el Programa Mínimo Exploratorio, los trabajos de exploración y el Programa de Trabajos y Obras
2019	• Se adopta un nuevo Formato Básico Minero • Se adopta el "Manual de suministro y entrega de la información geológica en el desarrollo de actividades mineras"
2020	• Se establecen las condiciones y periodicidad para la presentación de la información sobre los recursos y las reservas minerales existentes en el área concesionada.
2021	• Se establecen los lineamientos para el desarrollo de la actividad de fiscalización de proyectos de exploración y explotación • Se adoptan los términos de referencia aplicables para la elaboración de los programas y proyectos de gestión social en la ejecución de los proyectos mineros.
2022	• Se establecen los lineamientos para el desarrollo de la actividad de fiscalización de proyectos de exploración y explotación • Se adoptan los términos de referencia aplicables para la elaboración de los programas y proyectos de gestión social en la ejecución de los proyectos mineros.
2023	• Se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 "Colombia, potencia mundial de la vida" • Se adopta el protocolo de entrega de información geológica por parte de los titulares mineros y propietarios de minas al Banco de Información Minera

LINEAMIENTOS DEL SECTOR AMBIENTAL

2005 - 2006

- Se adoptan los manuales para evaluación de estudios ambientales y de seguimiento ambiental de proyecto y se toman otras determinaciones.
- Se reglamenta la prevención y el manejo de residuos o desechos peligrosos.
- Se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.

2009- 2010

- Se establece el procedimiento sancionatorio ambiental.
- Se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.
- Se establecen los usos del agua y residuos líquidos.

2012 - 2013

- Se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos.
- Se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.
- Se reglamenta el permiso de estudio para la recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de elaboración de estudios ambientales.
- Se establece la disposición para la comercialización, eliminación y reducción del uso del mercurio.

2015 - 2016

- Se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental de proyectos de explotación minera.
- Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua.
- Se establecen los lineamientos para el manejo, aprovechamiento y establecimientos de guaduales y bambusales.

2017

- Se adoptan los términos de referencia para la elaboración de los Estudios de Impacto ambiental-eia, para las nuevas plantas de beneficio de oro por fuera de títulos mineros y la reubicación de las existentes.
- Se adoptan los criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades de licencia ambiental o instrumento equivalente.
- Se adopta la norma de calidad del aire ambiente.

2018 - 2019

- Se señala los casos en los que no se requerirá adelantar trámite de modificación de la licencia ambiental o su equivalente, para aquellas obras o actividades consideradas cambios menores o de ajuste normal dentro del giro ordinario de los proyectos del sector minero.
- Se adopta la actualización del Manual de compensaciones ambientales del componente biótico.
- Se adopta la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales, y se toman otras determinaciones.
- Se emite la Estrategia Nacional de Economía Circular.

2021	• Se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas tratadas al suelo.
2022 - 2024	• Se establecen las especificaciones técnicas que deben contener los productos de la cartografía. • Se emite la propuesta de lineamientos técnicos de políticas de buenas prácticas para estandarizar los procesos de economía circular en la actividad minera y en drenajes ácidos mineros. • Se establece el listado de especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino costera. • Se modifica el procedimiento sancionatorio ambiental.

Figura 3. Normas minero-ambientales de la etapa de beneficio y transformación.
Fuente: Elaboración propia, a partir de la normatividad nacional.

El Anexo 1. “Marco jurídico” reporta la normativa en materia minero-ambiental que se encuentra vigente a la fecha de edición de la Guía minero-ambiental de beneficio y transformación, donde se relaciona el tipo de acto administrativo, la descripción, el componente y su aplicación.



Consideraciones preliminares

Las actividades de beneficio y transformación son el conjunto de procesos que tienen por objeto modificar la naturaleza de los minerales, ya sea por medios físicos, químicos o mecánicos.

Finalizada la etapa de exploración, el concesionario deberá disponer de la aprobación del Programa de Trabajos y Obras (PTO) por la autoridad minera y del otorgamiento de la licencia ambiental por la autoridad ambiental competente (Ley 685 de 2001, artículos 84, 281 y 282).

El PTO es un instrumento que contiene, entre otros elementos, la descripción de las obras, los equipos y los procesos para el beneficio y la transformación de los minerales extraídos o, si es el caso, la descripción de aquellos procesos que se aplican al mineral in situ.

Las actividades mineras ejecutadas por el concesionario, en particular en la etapa de explotación, que incluye el beneficio y transformación, son objeto de fiscalización, seguimiento y control por parte de las autoridades minera y ambiental respectivamente, las cuales verificarán, entre otros aspectos, los que aparecen enunciados en la Figura 4.

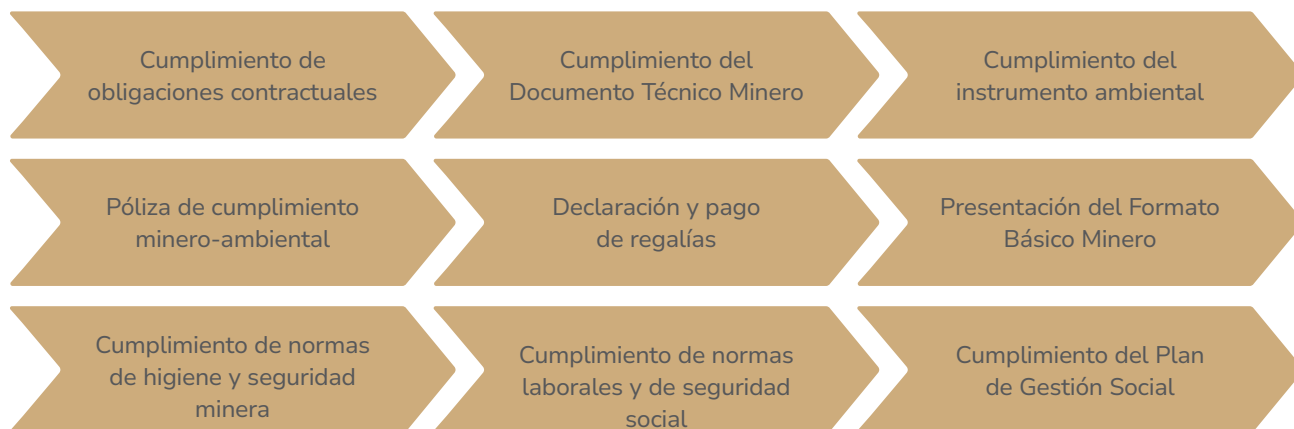


Figura 4. Obligaciones contractuales principales.

Fuente: Elaboración propia, con base en la normatividad.

• Para tener en cuenta... •

El beneficio y la transformación del mineral es un proceso fiscalizado por la autoridad minera cuando está contemplado dentro del instrumento técnico del título minero

Ante el incumplimiento de alguna de las anteriores obligaciones, las autoridades minera y ambiental requerirán al concesionario para que rectifique o presente su defensa, y en caso de no respuesta o de una que sea insatisfactoria, se procederá con una sanción de multa, la cancelación del título minero, la declaratoria de caducidad del contrato minero o la revocatoria de la licencia ambiental (Ley 685 de 2001, artículos 287 y 288).

Cuando los procesos de beneficio y transformación no estén considerados en las actividades

aprobadas en el PTO o instrumento técnico aplicable (Decreto 2655 de 1988, artículos 75 y 76)⁴, o estos se realicen por fuera del área titulada, no serán objeto de fiscalización por parte de la autoridad minera.

Sin embargo, con la autoridad ambiental se presenta el caso contrario, ya que esta realiza el control y seguimiento de la licencia ambiental o de los trámites ambientales que sean otorgados para los siguientes casos:

- ✔ Plantas de beneficio y transformación que hacen parte de un proyecto minero que cuenta con un título minero.
- ✔ Plantas de beneficio y transformación que procesan minerales auríferos y prestan sus servicios a terceros.
- ✔ Plantas de beneficio y transformación de cualquier otro mineral y que prestan sus servicios a terceros.
- ✔ Siderúrgicas, cementeras y plantas concreteras fijas.



⁴ El Programa de Trabajos e Inversiones era el instrumento técnico aplicado a los títulos mineros previo a la adopción del PTO, que le sustituyó.



6

**Aspectos para
considerar en
los procesos
de beneficio y
transformación
de minerales**

En esta etapa de la cadena de valor del negocio minero se aplican diferentes procesos al mineral extraído de la corteza, con el fin de crear distintos tipos de productos mineros. Acorde con el tipo de productos mineros que se decida obtener, se generan diversas condiciones de costos, en infraestructuras requeridas, de logística, comerciales, de cumplimiento normativo, entre otras, para el proceso de beneficio y la posterior comercialización de los productos. Por lo anterior, es importante tener claro hasta qué momento de la cadena productiva se desea llegar y qué ventajas o desventajas implica tal decisión.

En el presente capítulo se especifican algunas de las operaciones más comunes del beneficio de minerales y los procesos de transformación aplicados a estos.

6.1. Estudio de las asociaciones del mineral

El glosario técnico minero, adoptado mediante la Resolución 40599 del 2015, del Ministerio de Minas y Energía (MME), define que la geometalurgia:

Se refiere a la relación existente entre el comportamiento metalúrgico del mineral que es tratado en la planta de beneficio y las características geológicas que afectan dicho comportamiento, tales como las especies mineralógicas presentes, la dureza, grado de fracturamiento, entre otros. (Colombia, MME, 2015e, p. 38)

Los depósitos minerales varían en dimensiones, calidad y volumen, dependiendo, entre otros aspectos, de su geología y génesis. De igual manera, suelen presentar conjuntos de minerales íntimamente asociados entre sí.

El muestreo de un depósito mineral permite identificar cuáles serían los minerales con un potencial interés económico para su extracción, qué materiales representan ganga o estéril, y cuáles son sus propiedades físicas y químicas, pues esta información es el insumo fundamental para el adecuado diseño y la planificación de los procesos a los que será sometido el mineral una vez sale de la mina. El éxito en los procesos de beneficio y transformación parte necesariamente de conocer, de manera apropiada, las características del mineral y cómo cambian estas a medida que avanzan los frentes de producción en la operación minera.

6.2. Descripción de operaciones de beneficio

Podemos entender el beneficio de minerales como el “conjunto de operaciones empleadas para el

tratamiento de menas y minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados con el uso de las diferencias en sus propiedades” (Colombia, MME, 2015e, p. 13). A continuación, se describen las principales operaciones.



• Ten presente que... •

De acuerdo con el glosario técnico minero, el beneficio de los minerales comprende los procesos de molienda, trituración, lavado, concentración y otras operaciones similares a las que se somete el mineral extraído para su posterior utilización o transformación (MME, 2015e, p. 13).

6.2.1. Trituración

Es la operación unitaria orientada a la “reducción inicial del tamaño del mineral hasta un grado que permita su molienda” (Colombia, MME, 2015e, p. 72).

La reducción de tamaño, como se plantea en Colombia, Ministerio de Minas y Energía & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia, MME & MADS, 2002), ocurre acorde con la granulometría y la utilización buscada, lo que permite clasificar este proceso en:

- ✔ **Trituración primaria:** realizada comúnmente con trituradoras de quijadas, trituradoras giratorias y trituradoras de impacto.
- ✔ **Trituración secundaria:** proceso en el que se suelen utilizar trituradoras giratorias, trituradoras de rodillos y trituradoras de cono.
- ✔ **Trituración de usos especiales:** se ejecuta principalmente con trituradoras de martillos o trituradoras de rodillos dentados, proceso que se aplica en ciertos materiales blandos o de carácter especial (véase Figura 5).



Figura 5. Maquinaria del proceso de trituración. a. trituradora de impacto, b. trituradora de quijadas y c. trituradora de cono

Fuente: a Mazlum (2019a); b. Mazlum (2019b); c. Xiao (2014).

6.2.2. Molienda

Es la “operación de reducción de tamaño de un mineral realizada posteriormente a la trituration; puede ser de tipo primario o secundario según el tamaño requerido del producto” (Colombia, MME, 2015e, p. 51) para los procesos subsiguientes.

La molienda puede darse en medio seco o húmedo. En este sentido, los molinos se clasifican dependiendo de si trabajan por percusión (molinos de pisones), fricción (molinos de disco), o fricción y percusión (molinos rotatorios con cuerpos moledores sueltos, como barras o bolas) (Colombia, MME & MADS, 2002) (véase Figura 6).



Figura 6. Molino de bolas

Fuente: © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.

Existen, además, la molienda semiautógena, “en la cual el medio moledor está compuesto por trozos grandes del mismo material que se intenta moler y bolas de acero”, y la molienda autógena, que es el “proceso de reducción de tamaño llevado a cabo en un cilindro rotatorio en el cual el efecto moledor es causado por la fricción mutua entre las partículas de mineral” (Colombia, MME, 2015e, p. 51). En la Figura 7 se presenta un molino para la molienda autógena.



Figura 7. Molino autógeno

Fuente: lamgold (2013).

6.2.3. Clasificación

Es una operación unitaria, que consiste en la separación de los componentes de una mezcla de partículas de minerales en dos o más fracciones de acuerdo con su tamaño, forma y densidad. Cuando se realiza en medio húmedo, la operación también depende de las propiedades del fluido en el que se encuentran las partículas, y de las características reológicas de la pulpa. (Colombia, MME, 2015e, p. 18)

Esta segregación permite obtener grupos de partículas más uniformes que en la mezcla original.

Los métodos de clasificación emplean diferentes propiedades físicas o volumétricas de las sustancias minerales. Asimismo, los equipos usados para clasificación se agrupan en dos clases (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 37):

✓ **Equipos que utilizan series de mallas:** se basan en la superposición de mallas de mayor a menor abertura, que permiten el paso de las partículas cuyo tamaño es menor al espacio de la malla y retienen aquellas partículas de mayor tamaño. Estos equipos pueden ser fijos, vibratorios o rotatorios. Son ejemplos de esta clase de equipos las zarandas, las cribas vibratorias y los trommels (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 37; Darling, 2011, p. 1481) (véase Figura 8).

✓ **Equipos de clasificación en fluido:** estos funcionan a partir de la velocidad relativa que obtienen las partículas dentro de un fluido, principalmente agua, cuando estas se someten a una fuerza externa. En esta categoría figuran equipos como los clasificadores de espiral, los hidrociclones o las norias (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 37) (véase Figura 9).



Figura 8. Sistema de criba vibratoria y trommel
Fuente: Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.



Figura 9. Equipos de clasificación en fluido. a. Un clasificador de espiral y b. un hidrociclón
Fuente: © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.

6.2.4. Concentración

Se define como: “Operación unitaria en la cual se busca eliminar material que no es de interés económico con el fin de disminuir el volumen de mineral a procesar. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas o fisicoquímicas de los minerales” (Colombia, MME, 2015e, p. 21).

En la separación del mineral de interés económico de la ganga o material estéril, la elección del mecanismo para la concentración está definido principalmente por los tipos de minerales presentes y la complejidad de su asociación.

A continuación, se identifican algunos de los procesos más comúnmente usados para la concentración de minerales.

✓ **Concentración por gravedad:** es un método de separación de sólidos en un medio fluido, a menudo agua o aire, que “aprovecha la diferencia en el peso específico entre los minerales a separar” (Colombia, MME, 2015e, p. 21).

Las mezclas de minerales susceptibles de separación por métodos de gravedad son aquellas en las cuales los minerales valiosos y la ganga difieren apreciablemente en gravedad específica (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 37). En este sentido, se deben incluir otros aspectos de los materiales a separar, como son el tamaño de las partículas y su morfología, ya que estos influyen en su velocidad de asentamiento y, por ende, en la efectividad de la técnica.

Los ejemplos de equipos que aplican este mecanismo de concentración serían: las esclusas estriadas, el cono Reichert, las mesas vibratorias, los JIG, los concentradores de espiral y los concentradores centrífugos de tipo Falcon o Knelson (Darling, 2011, pp. 1507-1512) (véase Figura 10).



Figura 10. Equipos para concentración por gravedad. a. Esclusa minera, b. concentrador JIG, c. mesa vibratoria y d. concentrado centrífugo.

Fuente: a, b y c. © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia. d. Sepro Mineral Systems (2006).

✓ **Flotación:** es un “proceso de concentración mediante el cual las partículas de un mineral son inducidas a adherirse a las burbujas creadas por un agente espumante presente en la pulpa, que las hace flotar” (Colombia, MME, 2015e, p. 35). Este proceso suele aplicarse en asociaciones de minerales que por sus características no son aptos para separarse de manera adecuada por otros métodos. Se basa en las diferencias de respuesta, de afinidad o aversión al agua, que se induce con la aplicación de reactivos específicos en la superficie de diversas especies de minerales y rocas contenidas en una suspensión acuosa, a la que se inyecta aire, con el fin de generar la adherencia de los materiales de interés y, de esta forma, lograr su separación selectiva. En la flotación influyen propiedades como la granulometría, la densidad de la pulpa, la temperatura, el pH del agua y la dosificación adecuada de los reactivos (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 38) (véase Figura 11).



Figura 11. Celda de flotación en funcionamiento

Fuente: © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.

✓ **Separación magnética:** se denomina así al “proceso en el cual los minerales magnéticamente susceptibles son separados de los minerales de la ganga mediante la aplicación de un campo magnético fuerte; los minerales de hierro son comúnmente tratados por este método” (Colombia, MME, 2015e, p. 66). (véase Figura 12).



Figura 12. Separador magnético de banda cruzada

Fuente: Fachab (2019).

Este proceso se basa en la condición de partículas colocadas en un campo magnético que son atraídas (paramagnéticas) o rechazadas (diamagnéticas). Para propósitos prácticos, los sólidos paramagnéticos son considerados en tres categorías: altamente magnéticos, débiles magnéticos y no magnéticos (Darling, 2011, pp. 1533-1540).

El proceso puede darse en vía seca o húmeda, además de usar magnetos de alta o baja intensidad. Aunque la definición varía, la baja intensidad es usualmente considerada al estar por debajo de 2000 Gauss, y la alta intensidad puede extenderse hasta los 20 000 Gauss.

Los separadores magnéticos de baja intensidad, tanto secos como húmedos, pueden contener electromagnetos o magnetos permanentes, siendo los últimos favorecidos por su menor costo de operación y alta confiabilidad (Darling, 2011, pp. 1533-1540).

6.2.5. Lavado

Proceso en el cual se busca eliminar los lodos presentes en algunos minerales; muy utilizado para eliminar lodos presentes en materiales de construcción, principalmente en arena [...] Proceso aplicado a menas, carbón o triturados con el fin de eliminar impurezas o polvo, mediante la aplicación de fluidos. (Colombia, MME, 2015e, p. 43)

La operación de lavado se utiliza, por ejemplo, en los tornillos lavadores o en las zarandas vibratorias y estacionarias, en las que el agua a presión se emplea para la separación de materiales, donde se disgregan sólidos y se separan los materiales gruesos de los finos (Colombia, MME & MADS, 2002, pp. 35-36).

6.2.6. Homogeneización

Normalmente se realiza en silos, donde se almacenan productos de molienda y se da su mezcla con mecanismos de alimentación por gravedad. Este proceso puede realizarse tanto en vía seca como en vía húmeda.

La homogeneización de materia prima es indispensable para garantizar condiciones de operación en procesos como la fabricación de clinker, coque o en la producción de materiales de la construcción, donde es común la heterogeneidad de los materiales manejados (Colombia, MME & MADS, 2002, pp. 36-37).

6.3. Descripción de procesos de transformación

El concepto de transformación minera se presenta en el glosario técnico minero como el “conjunto de operaciones fisicoquímicas o metalúrgicas a que se somete un mineral después de ser beneficiado, para obtener un primer producto comercial utilizable por la industria y el consumidor” (Colombia, MME, 2015e, p. 72).

Los procesos de transformación aplicados a cada mineral dependen de sus características particulares, de la tecnología seleccionada y de los costos asociados.

En la transformación de minerales es posible destacar procesos de hidrometalurgia, pirometalurgia, electrometalurgia y procesos de aglomeración, los cuales se exponen en esta sección

• Sabías que... •

La transformación minera se entiende como “la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial del cual resulta un producto diferente no identificable con el mineral en su estado natural” (Colombia, MME, 2015e, p. 72)

6.3.1. Procesos hidrometalúrgicos

La hidrometalurgia es una “rama de la metalurgia extractiva que estudia la obtención de metales o compuestos a partir de minerales o fuentes secundarias mediante procesos que tienen lugar a bajas temperaturas en medio acuoso u orgánico” (Colombia, MME, 2015e, p. 39). Incluye una diversidad de procesos que presentan la disolución de metales desde las menas y concentrados, y la subsecuente recuperación de compuestos metálicos o metales relativamente puros. Estos procesos integran varios aspectos relevantes:

1. El método de lixiviación: agitación, autoclaves, botaderos, in situ, percolación, etc.
2. El agente lixivante: bacterias, cianuro, cloro, tiourea, etc.
3. El método de recuperación: cementación con zinc, adsorción con carbón activado, entre otros (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 38).

La lixiviación es el proceso “mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado” (Colombia, MME, 2015e, p. 44). En este sentido, se requiere una adecuada preparación previa del material para asegurar aspectos que pueden influir en la efectividad del proceso, como son garantizar el grado de liberación de las partículas, asegurar un tenor adecuado en el concentrado a procesar, o eliminar las sustancias presentes en el material que podrían afectar la obtención del elemento de interés (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 38).

Los métodos más comunes para el proceso de lixiviación son:

✔ **“Lixiviación a presión:** disolución selectiva de un mineral en medio acuoso ácido o básico, mediante la aplicación de altas presiones y temperaturas. El proceso se realiza en equipos denominados autoclaves” (Colombia, MME, 2015e, p. 44)

El proceso se desarrolla por encima del punto de ebullición atmosférico para mejorar la cinética de la reacción. Se aplica principalmente cuando el objetivo es solubilizar elementos deseables, recuperar la fracción de la solución y rechazar los sólidos residuales. El proceso puede operar en condiciones alcalinas o ácidas, y suele incluir el uso de un agente oxidante (Dunne et al., 2019, p. 1239).

✔ **Lixiviación in situ:** se aplica a la mena cuando es directamente fracturada y lixiviada en el frente donde se explotó (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 39).

✔ **Lixiviación por agitación:** en esta se agrega el agente lixivante y la pulpa se agita de manera continua, ocurriendo comúnmente a temperatura ambiente y a presión atmosférica. Suele realizarse en tanques con agitación mecánica, aunque existen alternativas como la agitación neumática y el mezclado por chorro. Esta resulta apropiada para materiales con alto tenor (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 39) (véase Figura 13).



Figura 13. Tanques para lixiviación por agitación mecánica

Fuente: © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.

- ✓ **Lixiviación en botaderos y en pilas:** la primera se trata de la lixiviación que se aplica a parte de la mineralización con un tenor por debajo del requerido para la concentración, por lo que este material suele ser considerado como estéril, descartarse y no ser llevado a la planta de beneficio en el funcionamiento rutinario de una operación minera. A su vez, la lixiviación en pilas se da en mezclas del mineral de interés con tenores usualmente mayores a los de botaderos, que se apilan de forma predeterminada en áreas sobre una base preparada para la recolección de la solución (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 39).
- ✓ **Lixiviación por percolación:** “la solución lixivante y las aguas de lavado pueden circular por efecto de la gravedad a través de las partículas de mineral en el interior de un tanque o en el suelo y disolver el metal de interés” (Colombia, MME, 2015e, p. 39).

En esta técnica, la solución lixivante se mueve hacia arriba y hacia abajo a través de los poros del mineral, el cual ha sido reducido de tamaño y dispuesto en tanques para este proceso (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 39) (véase Figura 14).



Figura 14. Tinas para lixiviación

Fuente: © Archivo del Grupo de investigación Observatorio ÍGNEA – Universidad Nacional de Colombia.

- ✔ **Biolixiviación:** también denominada “lixiviación biológica”, es un “proceso de recuperación de metales de minerales de bajo tenor que se basa en liberar una solución de los metales con la utilización de bacterias” (Colombia, MME, 2015e, p. 39), para ayudar en las cinéticas de disolución. La biolixiviación es semejante a un proceso convencional de lixiviación, pero es catalizado biológicamente. Su aplicación principal se da en el procesamiento de minerales sulfurados (Dunne et al., 2019, p. 1267).

Otras operaciones unitarias involucradas en los procesos de la hidrometalurgia son:

- ✔ **“Separación líquido-sólido:** es la remoción del metal que lleva la solución impregnada del residuo de lixiviado” (Colombia, MME, 2015e, p. 66).
- ✔ **“Purificación:** es la remoción de las impurezas de la solución que llevan los metales. Las impurezas se retiran para prevenir problemas en la precipitación, la extracción eléctrica o para otros procesos de recuperación del metal” (Colombia, MME, 2015e, p. 61).
- ✔ **Clarificación:** es el “proceso de clarificar el agua sucia con la remoción de los materiales suspendidos” (Colombia, MME, 2015e, p. 18). Está pensado para garantizar una solución libre de sólidos, mediante la adición de floculantes en espesadores o por filtración, teniendo factores de control como las propiedades de sedimentación, la eficacia de la filtración y la mineralogía (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 40).
- ✔ **Precipitación:** se refiere al “proceso de obtención de un elemento o compuesto a partir de una solución que lo contiene, por efecto de un cambio en sus condiciones termodinámicas (temperatura, fusión, composición)” (Colombia, MME, 2015e, p. 59). Es una operación en la que, mediante la adición de ciertos reactivos a la solución, se logra que el metal contenido dentro de esta pase de un estado líquido a sólido, pudiendo separarse de forma parcial o completa (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 40).

6.3.2. Procesos pirometalúrgicos

La pirometalurgia es la “parte de la metalurgia extractiva que estudia los procesos de obtención

de metales a partir de sus minerales mediante el uso de temperaturas elevadas” (Colombia, MME, 2015e, p. 57). Abarca las operaciones de procesamiento que utilizan altas temperaturas, creadas por energía eléctrica o quema de combustibles, para producir metales refinados a partir de minerales o sus concentrados.

La separación efectiva y la recuperación de metales refinados por métodos pirometalúrgicos dependen, entre otros aspectos, de la reactividad de los componentes minerales a fundentes, oxidantes y reductores, y de las diferencias en fusibilidad y densidad de los productos formados.

Dentro de las operaciones de pirometalurgia más comunes se encuentran:

- ✔ **Calcinación:** es un proceso en el que se pretende “remover el agua, el dióxido de carbono y otros gases que se encuentran químicamente unidos a un mineral. Cuando el proceso se realiza en atmósfera reductora, se puede presentar también una pre-reducción [sic] de algunos elementos químicos del mineral” (Colombia, MME, 2015e, p. 15). Implica calentar una sustancia normalmente en estado sólido, a alta temperatura, con un suministro limitado de aire u oxígeno. Su propósito es eliminar componentes volátiles e impurezas, o transformar el material en una forma más deseable, para su posterior procesamiento (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 41; Dunne et al., 2019, p. 1445).

- ✔ **Deshidratación:** es un proceso o reacción que puede observarse durante el calentamiento de sustancias minerales, caracterizado por el desprendimiento de sustancias que contienen volátiles o entidades capaces de generarlos. Estos volátiles pueden ser anhídrido carbónico (procedente de carbonatos), agua, halógenos, mercurio, entre otros. (Colombia, MME, 2015e, p. 26)
- ✔ **“Fundición:** proceso pirometalúrgico mediante el cual un metal es llevado del estado sólido al líquido” (Colombia, MME, 2015e, p. 36). La mayoría de los metales tiene puntos de fusión elevados, por lo que es común la adición de fundentes en el proceso. En la Figura 15 se muestra un momento del proceso de fundición.



Figura 15. Proceso de fundición
Fuente: Codelco (2007).

- ✔ **Secado:** es una “operación mediante la cual se elimina el agua superficial de los minerales” (Colombia, MME, 2015e, p. 65). Es el proceso de transferir calor a un material para evaporar la humedad residual, siendo una manera de reducir su peso (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 41).
- ✔ **Tostación:** proceso que implica la “oxidación de un sulfuro metálico mediante su calentamiento en presencia de aire u oxígeno, lo cual produce un óxido que puede ser posteriormente reducido a la forma metálica” (Colombia, MME, 2015e, p. 72). Es un proceso donde se dan reacciones sólido-gas, a alta temperatura, y se ejecuta para purificar componentes metálicos.

Igualmente, en esta misma categoría se pueden incluir los procesos de:

- ✔ **Coquización:** proceso pirometalúrgico mediante el cual se obtiene coque a partir del carbón, a través de una combustión incompleta de este último” (Colombia, MME, 2015e, p. 22). La importancia del coque radica en que es un elemento indispensable en la fabricación de acero. En la producción de coque se pueden destacar como etapas más importantes la preparación del carbón, su manejo, el cargue a los hornos, la coquización, el descargue y la preparación posterior del producto. La calidad de este dependerá de las propiedades fisicoquímicas del carbón utilizado como materia prima (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 42).

✓ **Clinkerización:** el clinker “es el producto de la cocción, a altas temperaturas, de carbonatos, silicatos y óxidos de hierro y de alúmina que al ser molidos finamente con otros materiales genera cementos portland, especiales y blancos” (Colombia, MME, 2015e, p. 19). Genéricamente, los procesos para su obtención son vía húmeda y vía seca (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 42). En la Figura 16 se muestra una planta cementera.



Figura 16. Planta cementera
Fuente: Handakiln (2016).

6.3.3. Electrometalurgia

Es una “Rama de la metalurgia extractiva que estudia los procesos de disolución, precipitación o refinación de metales mediante el uso de corriente eléctrica” (Colombia, MME, 2015e, p. 29).

Estos procesos pueden ser agrupados en dos principales subdivisiones, dependiendo de cómo se use la corriente eléctrica: procesos electrotérmicos, que usan la corriente eléctrica como fuente de calor, y procesos electrolíticos, que se sirven de la corriente eléctrica para transportar iones metálicos desde ánodos o electrólisis por deposición en cátodos.

De igual manera, entre las operaciones de electrometalurgia se hallan:

✓ **Electroobtención:** Es el proceso de obtener o recuperar metal electrolíticamente de una solución que contiene metal disuelto. El proceso de electroobtención se utiliza para recuperar aluminio, cobre, oro, magnesio, manganeso, níquel, plata, zinc y otros metales a partir de líquidos a escala comercial. Para el aluminio y el magnesio, el proceso de electroobtención implica altas temperaturas y ambientes de sales fundidas. Para cobre, oro, magnesio, manganeso, níquel, plata y zinc, esta se realiza en líquidos acuosos a base de agua. (Moats y Free, 2019, p. 1369) (véase Figura 17)



Figura 17. Proceso de electroobtención en el procesamiento de cobre
Fuente: Pizarro (2015).

✓ “Electrorrefinación: proceso de refinación de un material metálico mediante la aplicación de corriente eléctrica” (Colombia, MME, 2015e, p. 29). “Es el proceso que sigue a la fundición para separar los metales y retirar las impurezas con el fin de obtener productos comerciales [...] se emplea a menudo para purificar cobre, níquel, plomo, oro y plata de otros metales” (Colombia, MME & MADS, 2002, p. 42).

En el caso del oro, por ejemplo, la mayor parte de los lingotes se refinan con pirometalurgia mediante el proceso de cloración Miller, para producir una pureza de hasta 99,6 %. No obstante, para el oro de alta pureza (99,99 %), necesario para la acuñación, se requiere refinamiento electrolítico. La electrorrefinación de oro mediante el proceso Wohlwill elimina trazas de plata, cobre, zinc y elementos del grupo del platino (Dunne et al., 2019, p. 1399).

6.3.4. Procesos de aglomeración

La aglomeración es el método de formar masas a partir de partículas finas. La mayoría de los productos minerales son aglomerados por algunos procesos básicos, como son:

✓ **Briquetización:** se trata de la compactación de partículas finas que forman pequeños bloques uniformes, a partir de la aplicación de alta presión sobre estas (Battle et al., 2014, p. 104) (véase Figura 18).



Figura 18. Briquetas de carbón
Fuente: Asian Development Bank (2019).

✔ **Peletización:** proceso de aglomeración mediante el cual se forman bolas de mineral fino con el uso de una sustancia aglomerante. En ocasiones incluye una etapa final de cocción para aumentar la resistencia mecánica y la porosidad de los pelets” (Colombia, MME, 2015e, p. 55) (véase Figura 19).



Figura 19. Pelets de mineral de hierro
Fuente: Bukharov (2009).

✔ **Nodulización:** es la creación de formas redondeadas mediante la aplicación de un movimiento de rotación u oscilaciones, pero sin el uso de presión (Battle et al., 2014, p. 105).

✔ **Sinterización:** es un proceso de aglomeración de partículas finas que se unen mutuamente para formar trozos grandes debido a la fusión incipiente de sus bordes por efecto de la alta temperatura” (Colombia, MME, 2015e, p. 55). Se trata de un tratamiento térmico diseñado para conformar masas de mayor tamaño a par-

tir de un mineral fino, en el que el material se oxida a altas temperaturas hasta que se ablanda y los finos (partículas pequeñas de tamaño milimétrico y micrométrico) se aglomeran (Battle et al., 2014, pp. 104-105).

Cerrando este capítulo, se recomienda al lector que desee profundizar en los conceptos expuestos remitirse a bibliografía especializada, como son los manuales de la Society for Mining, Metallurgy and Exploitation, tanto el Manual de ingeniería de minas (Darling, 2011) como el Manual de procesamiento de minerales y metalurgia extractiva (Dunne et al., 2019).

Así mismo, es importante tomar en cuenta que la selección y la determinación de la secuencia de operaciones de beneficio y transformación no solo varían acorde con el tipo de mineral de interés que se procese, como, por ejemplo, para obtener oro, cobre o níquel se utilizan procesos distintos, sino que también pueden cambiar de una determinada especie mineral a otra, aunque ambas sean menas del mismo metal, como pasa con el procesamiento de cobre a partir de óxidos y de sulfuros. Adicionalmente, se debe tener presente cual es el tipo de producto minero que se espera obtener, como podría ser en el caso de que se desee un concentrado polimetálico para comercializar, donde habrá una serie de operaciones unitarias distinta a cuando se pretende llegar a un producto intermedio más elaborado, como sería un lingote o un cátodo metálico.

Por último, en la implementación de estos procesos se debe contar con profesionales capacitados en el campo, como pueden ser ingenieros de minas, ingenieros metalúrgicos o ingenieros químicos, por mencionar algunos perfiles profesionales afines.



7

Componente ambiental en el marco del beneficio y transformación de minerales

Para el desarrollo de las actividades de beneficio y transformación de minerales, se requiere de diferentes trámites ambientales, según sea el caso.

Los trámites ambientales son los permisos, las autorizaciones y las concesiones para el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, los cuales deben ser solicitados ante las autoridades ambientales competentes. Así mismo y en algunos casos los trámites ambientales corresponden a la solicitud de la respectiva licencia ambiental.

De acuerdo con el Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.9.1, los proyectos, las obras o las actividades que requieren licencia ambiental o un plan de manejo ambiental estarán sujetos a evaluación, seguimiento y control por las autoridades ambientales competentes, estos procesos tienen como objetivo verificar la eficacia de las medidas de manejo implementadas, asegurar el cumplimiento de los términos y las condiciones de la licencia, y evaluar los impactos en los medios biótico, abiótico y socioeconómico. Además, se revisan los impactos acumulativos en áreas específicas, se verifica el cumplimiento de permisos y normativas ambientales, y se imponen medidas adicionales para manejar impactos ambientales no previstos.

Las autoridades llevarán a cabo visitas interdisciplinarias al sitio del proyecto y deberán pronunciarse sobre lo evidenciado en las mismas, sobre los informes de cumplimiento ambiental y tener en cuenta quejas y reclamos de las comunidades del área de influencia. Así mismo las autoridades ambientales deberán tener en cuenta las contingencias ambientales que se presenten asociadas a las actividades de beneficio y transformación.

A continuación, se listan y describen los casos, en el marco del beneficio y transformación de minerales para los cuales se requiere licencia ambiental o trámites para el uso, aprovechamiento o afectación de recursos naturales renovables:

- ✔ Proyectos mineros en etapa de explotación amparados en un título minero, contrato de concesión o beneficiarios de procesos de formalización que incluye las operaciones de beneficio y transformación.
- ✔ Plantas de beneficio y transformación que procesan minerales auríferos por fuera de los títulos y que prestan sus servicios a terceros.
- ✔ Plantas de beneficio y transformación como siderúrgicas, cementeras y plantas concretoras fijas cuya producción de concreto sea superior a diez mil (10.000) metros cúbicos/mes
- ✔ Operaciones de beneficio y transformación que no requieran del trámite de licencia ambiental

7.1 Componente ambiental para proyectos mineros en etapa de explotación amparados en un título minero, contrato de concesión o beneficiarios de procesos de formalización que incluye las operaciones de beneficio y transformación

Finalizada la etapa de exploración, el titular minero podrá optar por continuar o no con las etapas siguientes establecidas en el contrato de concesión minera. Si decide continuar, se procederá a la etapa de construcción y montaje. Para ello, es necesario disponer previamente del otorgamiento de la licencia ambiental global correspondiente, la cual incluirá las concesiones, las autorizaciones y los permisos para el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables. Así mismo, esta licencia incluirá las actividades de extracción del mineral, beneficio y transformación, y cierre y postcierre, además de las labores adicionales de exploración que requieran ser desarrolladas durante la etapa de explotación.

Esta licencia ambiental contemplará entre otros documentos el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y el plan de manejo ambiental este último incluye las medidas para prevenir, mitigar, corregir y/o compensar los impactos ambientales producidos por cada una de las operaciones o actividades desarrolladas en el proyecto minero.

De acuerdo con lo anterior, se debe tener en cuenta lo siguiente para operaciones de beneficio y transformación que se realicen en proyectos de explotación minera:

- ✔ Se debe identificar claramente en la cartografía el sitio de ubicación de las plantas de beneficio y transformación del mineral.
- ✔ Se debe realizar la cuantificación y caracterización química de los materiales sobrantes, entre ellos metales pesados y sustancias químicas peligrosas que puedan surgir del proceso de beneficio y transformación.
- ✔ Describir las operaciones unitarias implementadas en el procesamiento de minerales (tritución, procesamiento, lavado, filtración, separación magnética, concentración por gravedad, oxidación por presión, lixiviación, flotación, recuperación, refinación fundición, aglomeración, etc.; en el caso de oro no se permite el uso del mercurio), indicando los procesos a utilizar para la recuperación final y la identificación de productos principales y subproductos con elevado valor mineralógico y los subproductos con posibilidad de generar fuerte impacto ambiental.
- ✔ En el caso de efectuar operaciones de lixiviación con cianuro, establecer la movilización de otras sustancias y otros metales, que forman complejos con el cianuro, e identificar y cuantificar a través de los balances de masa respectivos la presencia de los mismos.
- ✔ Describir las alternativas para el tratamiento y disposición de colas de proceso y su análisis para la selección de la opción que presente menor impacto ambiental y menor riesgo ambiental.
- ✔ Planteamiento de alternativas para la ubicación, diseño y manejo de relaves o colas, suministrando la información que permita evaluar y comparar las diferentes opciones bajo las cuales sea posible el manejo de estas colas (escombreras, pilas, tanques, entre otras), y además aportar los elementos requeridos para la adecuada interpretación y evaluación por parte de la autoridad ambiental.
- ✔ Si dentro de las alternativas se proyecta la construcción de una presa, se deben allegar los diseños tanto en planta como en perfil, considerando la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves disponible en el centro de aprendizaje minero.

- ✓ Asimismo, se deben detallar las posibles alternativas de transporte de los relaves o colas y su para su posible aprovechamiento, detallando sus especificaciones técnicas.
- ✓ Análisis geotécnico que verifique las condiciones de soporte y estabilidad de las pilas de lixiviación.
- ✓ Establecimiento de los porcentajes de producción de los minerales por las diferentes operaciones mineras; es decir, establecimiento del balance de recuperación de oro y otros metales por medios físicos y el porcentaje recuperado de cada uno por medios químicos.

Para el caso específico del manejo residuos mineros producto de las operaciones de beneficio y transformación de minerales se deben tener en cuenta las orientaciones dadas por el artículo 12 de la Ley 2250 de 2022 la que la adicione, modifique o sustituya y sus actos reglamentarios.

7.2 Componente ambiental para plantas de beneficio y transformación que procesan minerales auríferos por fuera de los títulos y que prestan sus servicios a terceros.

Para la operación de las plantas de beneficio y transformación de mineral aurífero que ofrecen este servicio a terceros, no es obligatorio contar con un título minero; no obstante, deberán solicitar la licencia ambiental y elaborar su estudio de impacto a partir de los términos de referencia para la elaboración de los estudios de impacto ambiental para las nuevas plantas de beneficio de oro por fuera de títulos mineros y la reubicación de las existentes, conforme a lo establecido en la Resolución 0751 de 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, o aquellos que se adicionen, modifiquen o sustituyan.

El sitio en el que se instalará la planta de beneficio debe ser compatible con los usos del suelo definidos en el instrumento de ordenamiento territorial, conforme a la Ley 1658 de 2013, artículo 9. En lo que respecta a las prohibiciones de nuevas plantas de beneficio de minerales auríferos: “Se prohíbe la ubicación de nuevas plantas de beneficio de oro que usen mercurio y la quema de amalgama de mercurio y oro, en zonas de uso residencial, comercial, institucional o recreativo” (Colombia, Congreso de la República, 2013).

Además de la licencia ambiental para la planta de beneficio y transformación del oro, se deberá demostrar la procedencia lícita del mineral a procesar, para lo cual se deberá contar con la inscripción en el Registro Único de Comercializadores de Mi-



nerales.

7.2.1. Consideraciones especiales para plantas de beneficio de oro dentro de áreas con títulos mineros existentes

En algunos casos, las plantas de beneficio y transformación de minerales auríferos pueden ubicarse dentro del área de un título minero previamente otorgado, pero pertenecer o ser operadas por personas distintas al titular del derecho minero. En estas situaciones, la autoridad ambiental podrá otorgar licencias ambientales independientes, siempre que se demuestre la viabilidad técnica y ambiental de los proyectos y se garantice que sus operaciones pueden coexistir sin interferencias ni impactos ambientales acumulativos.

El Estudio de Impacto Ambiental deberá incluir la descripción detallada de la localización de la planta, su relación espacial con el área del título minero, la identificación de posibles interacciones con las actividades existentes y la evaluación de los impactos sinérgicos o acumulativos. Así mismo, se deben definir medidas de manejo ambiental para la prevención, mitigación, corrección y/o compensación que aseguren la gestión de los impactos ambientales potenciales y la claridad en las responsabilidades ambientales de cada proyecto. Estas deberán estar coordinadas entre los titulares licenciados.

Cuando la planta de beneficio no haga parte de las actividades licenciadas del título minero, deberá tramitar una licencia ambiental independiente, elaborando su EIA conforme a los términos de referencia vigentes para nuevas plantas de beneficio de oro ubicadas por fuera de títulos mineros o para la reubicación de las existentes.

La autoridad ambiental competente establecerá las condiciones específicas de operación, procurando la coordinación entre el titular minero y el operador de la planta de beneficio, la compatibilidad de usos del suelo y la gestión conjunta de los aspectos ambientales comunes. En todo caso, la coexistencia de proyectos deberá regirse por los principios de prevención, coordinación institucional, responsabilidad diferenciada y protección integral del ambiente.

7.3 Componente ambiental para plantas de beneficio y transformación como siderúrgicas, cementeras y plantas concreteras fijas cuya producción de concreto sea superior a diez mil (10.000) metros cúbicos/mes.

Las siderúrgicas, cementeras o concreteras por la naturaleza de sus procesos y operaciones realizan el beneficio y transformación de minerales en grandes instalaciones, de acuerdo con el Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.2.3.2.3 requieren licencia ambiental global, la cual debe ser tramitada ante la Autoridad Ambiental competente.

Para el trámite de la licencia ambiental y tomando como referencia el artículo 2.2.2.3.3.2. del decreto 1076 de 2015 el solicitante de la licencia ambiental deberá utilizar los términos de referencia, de acuerdo con las condiciones específicas del proyecto que se pretenda desarrollar.

Cuando el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible no haya expedido los términos de referencia para la elaboración del citado estudio de impacto ambiental las autoridades ambientales los fijarán de forma específica para cada caso dentro de los quince (15) días hábiles siguientes a la presentación de la solicitud.

7.4 Componente ambiental para operaciones de beneficio y transformación de minerales que no requieran del trámite de licencia ambiental

Para este caso se contemplan operaciones como



por ejemplo el beneficio y transformación de minerales que puedan desarrollarse en:

- ✓ Patios satélites de acopio de minerales
- ✓ Plantas en donde se realice el aprovechamiento de residuos mineros por parte de terceros.
- ✓ Plantas satélites de coquización
- ✓ Plantas móviles de trituración de minerales

Para las operaciones de beneficio y transformación anteriormente enunciadas se deberán tramitar y obtener los permisos, las concesiones y las autorizaciones ambientales según aplique para el uso, aprovechamiento y/o afectación de los recursos naturales renovables. Estos deberán ser tramitados ante la autoridad ambiental de su jurisdicción.

En el capítulo 8 “Demanda, uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales renovables”, se desarrollan con mayor detalle estos permisos.

Para algunos de los casos de beneficio y transformación aquí relacionados deberá tenerse en cuenta algunos desarrollos normativos nacionales o regionales. Por ejemplo, para el caso de la operación de patios de acopio de carbón, la Corporación Autónoma Regional de Boyacá ha establecido normativa específica como por ejemplo la resolución 2880 de 2022 “Por medio de la cual se sustituye la Resolución 4327 del 16 de diciembre de 2016, y se actualizan los requisitos de cumplimiento para la inscripción de patios de acopio de minerales, ubicados en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá- CORPOBOYACA.



8

**Demanda, uso,
aprovechamiento
o afectación
de los recursos
naturales
renovables**

Para todos los casos de beneficio y transformación de minerales se deberá analizar la pertinencia y aplicación del trámite de los permisos, las autorizaciones y las concesiones necesarios para el uso, el aprovechamiento o la afectación de los recursos naturales renovables.

En la Tabla 1 se presentan la descripción de los posibles permisos de uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales renovables.

• Recuerda que... •

Los Formularios Únicos Nacionales se expidieron mediante Resolución 2202 del 29 de diciembre de 2005 por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), modificada parcialmente por la Resolución 1058 del 2021, emitida por el mismo ministerio

Concesión de aguas superficiales	Es el permiso que se otorga para el uso o aprovechamiento de las aguas de nacimientos, quebradas, ríos, lagos, lagunas, ciénagas, pantanos, para abastecimiento doméstico o no doméstico • Sabías que... • ✓ Para las concesiones de agua se debe presentar el Programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua, conforme a lo establecido en el Decreto 1090 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. ✓ Los usuarios del recurso hídrico tienen la obligación de pagar una tasa por uso, de acuerdo con el Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Permiso de prospección y exploración de aguas subterráneas	Es el permiso que se otorga a una persona natural o jurídica para realizar perforaciones de prueba en busca de aguas subterráneas para su posterior aprovechamiento
Concesión de aguas subterráneas	Es el permiso que se otorga para el aprovechamiento de aguas subterráneas en predios propios y ajenos
Permiso de vertimientos	Es el permiso que se otorga para descargar, en un cuerpo de agua o al suelo, las aguas residuales generadas en el proyecto • Sabías que... • Para el permiso de vertimientos se deberá presentar el Plan de Gestión del Riesgo y la Evaluación Ambiental del Vertimiento, según lo establecido en la Resolución 1514 de 2012 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Permiso de ocupación de cauce	Es el permiso que se otorga para la ocupación del cauce de una corriente o depósito de agua, con la construcción de obras permanentes o transitorias ————— Sabías que... ————— <i>Para el permiso de ocupación de cauce se debe presentar un estudio hidrológico y el diseño hidráulico de las obras que se van a implementar</i>
Permiso de emisiones atmosféricas para fuentes fijas	Es el permiso que se otorga para realizar emisiones al aire dentro de los límites permisibles establecidos por las normas ambientales respectivas ————— Sabías que... ————— <i>En el Decreto 1076 de 2015, artículo 2.2.5.1.7.2, se listan las actividades, las obras o los servicios, públicos o privados, que requerirán permiso previo de emisiones atmosféricas</i>
Permiso de aprovechamiento forestal	Es el permiso que se otorga para realizar la extracción de productos maderables. Existen tres tipos de aprovechamiento: único, persistente o doméstico
Permiso de recolección de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de elaboración de estudios de impacto ambiental	Es el permiso previo que se otorga para la recolección temporal o definitiva de especies de flora y fauna, con el fin de realizar una correcta determinación taxonómica para llevar a cabo la elaboración de estudios ambientales

Tabla 1 Permisos de uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales renovables

Fuente: Elaboración propia, con base en la normatividad ambiental.

En lo que respecta a la obtención de los permisos, las concesiones y las autorizaciones para el uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, si bien en el Formato Único Nacional para la solicitud o modificación de la licencia ambiental se tiene un ítem de “Relación de permisos y trámites ambientales requeridos”, es necesario presentar los formularios vigentes y existentes para cada permiso ambiental que se requiera⁵.

Para obtener detalles específicos sobre los requisitos y la información necesaria para solicitar permisos y autorizaciones relacionadas con el uso, aprovechamiento o afectación de los recursos naturales, se puede consultar el documento dispuesto en el Anexo 2. “Permisos ambientales”.

⁵ Estos formularios están establecidos y regulados mediante la Resolución 2202 del 29 de diciembre de 2005, la cual ha sido modificada parcialmente mediante la Resolución 1058 del 7 de octubre de 2021, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Cualquier modificación o sustitución posterior de estos formularios debe ser considerada.



9

Seguimiento y monitoreo ambiental

Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua

El Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (PUEAA) es un requisito esencial para todas las concesiones de agua solicitadas, en conformidad con la Ley 373 de 1997 y el Decreto 1090 de 2018, modificado parcialmente por la Resolución 1257 de 2018.

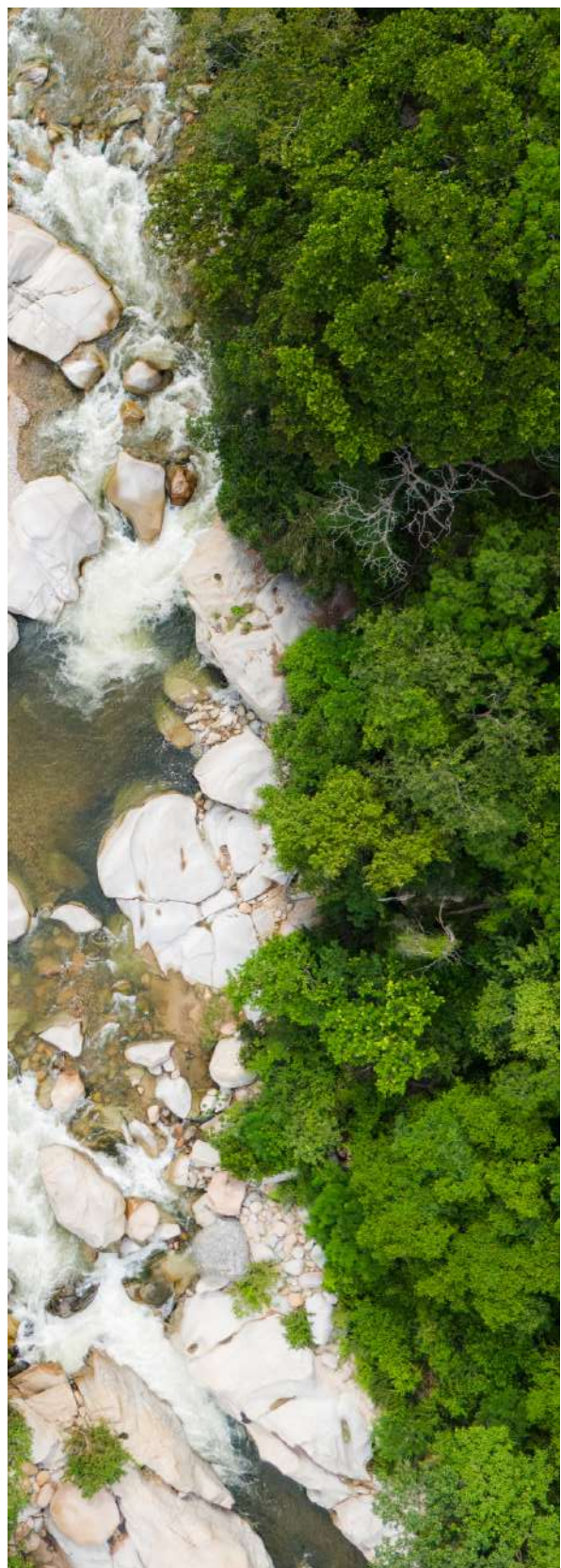
El PUEAA deberá incluir una serie de medidas o acciones diseñadas para facilitar la medición y la reducción de pérdidas de agua, así como promover el ahorro de este recurso. Estas acciones deben estar claramente definidas con objetivos específicos, metas e indicadores de desempeño anuales, y deben proyectarse en un periodo de tiempo de cinco años.

Para la correcta implementación y adaptación de dicho plan, se sugiere consultar y seguir las orientaciones proporcionadas por las Corporaciones Autónomas Regionales o ANLA, en caso de que tengan lineamientos propios para la presentación del PUEAA.

• Ten presente que... •

La estructura y el contenido para elaborar el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua se encuentran establecidos en el Decreto 1090 de 2018, modificado por la Resolución 1257 de 2018 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, o cualquier normativa posterior que la modifique, reemplace o derogue

Este control y seguimiento tiene dos actores: el titular minero y la autoridad ambiental que otorgó la licencia ambiental o el permiso respectivo.



9.1 Informe de Cumplimiento Ambiental

El Informe de Cumplimiento Ambiental es un documento que deben presentar los titulares de licencias ambientales. Este informe es fundamental para demostrar el cumplimiento de las condiciones establecidas en la licencia y del instrumento de manejo ambiental

En la Figura 26 se presenta el esquema del Informe de Cumplimiento Ambiental.



Figura 26 Esquema temático del Informe de Cumplimiento Ambiental elaborado por el concesionario minero.
Fuente: Adaptada de Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005a).

Se deberá entregar el informe empleando los formatos que se describen en el Manual de seguimiento ambiental de proyectos, conforme a la Resolución 1552 de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2005a).



10

**Economía circular y
las mejores técnicas
disponibles en el
proceso de beneficio
y transformación del
mineral**

La economía circular es una estrategia innovadora de diseño, producción y creación de valor agregado que beneficia a las empresas, la sociedad y el ambiente, reemplazando el esquema clásico de producción de la “economía lineal”, donde solo se extraen recursos, se producen bienes, se consumen y al final se desechan (Colombia, Ministerio de Minas y Energía —MME—, 2021a, p. 7).

En este orden de ideas, la economía circular describe un proceso económico que se basa en modelos comerciales. Además de generar conciencia en el uso y reúso de materiales, modifica el modelo actual de producción por uno que pueda contribuir mayormente a la economía del país, optimizar el uso de insumos, incrementar la vida útil de los productos y, sobre todo, aportar al control de la problemática ambiental, a partir de la recirculación y la reutilización de materiales.

Por lo tanto, este nuevo modelo de la producción de bienes y servicios sostenibles es el objetivo de la economía circular, que contribuye al crecimiento económico, ambiental, reduciendo de esta forma el uso de materias primas y recursos naturales, como lo son el agua, el carbón, los árboles, entre otros, con el fin de prolongar su ciclo de vida e incrementar la rentabilidad financiera.

En la Figura 27 se presentan las oportunidades de circularidad frente a la cadena de valor minera.

• Sabías que... •

El Ministerio de Minas y Energía (2020a, 2020b y 2022b) construyó una propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de economía circular en la actividad minera. Este es un modelo que busca promover la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía, mostrando casos de aplicación de economía circular a nivel nacional e internacional, y el paso a paso que orienta la implementación en cada una de las etapas de los proyectos mineros

Diseño sin desperdicio	Reducir los residuos mediante la eficiencia de los recursos y el uso de materiales y suministros circulares que permitan opciones de reutilización, creación de subproductos o reciclaje al final de su vida útil, en lugar de su envío a disposición final. Esto puede aplicarse en el diseño de minas (por ejemplo, diagramas) y operaciones. Esto también aplica a las empresas de productos metálicos.
Extender los ciclos de vida	Los metales son materiales circulares que permiten la fabricación de productos duraderos y de larga duración, ideales para la reutilización, la reparación, la modernización, la re fabricación o el reciclaje. Esto incluye la creación de mecanismos para que todos los materiales permanezcan en circulación al mayor valor posible durante el mayor tiempo posible.

Utilizar los residuos como recurso	Buscar la valorización de todos los residuos. En minería, esto podría incluir la re extracción de relaves o la búsqueda de maneras de maximizar el valor de los subproductos. Aplicar tecnologías y cambios en los procesos, así como nuevas alianzas o productos, para alcanzar estos objetivos.
Facilitar la regeneración	La industria minera y metalúrgica depende de la naturaleza y la impacta. Como guardianas de las tierras y cuencas hidrográficas cuencas hidrográficas en las que operan, las empresas mineras tienen la responsabilidad de comprender su huella, mitigar el impacto y maximizar las oportunidades para contribuir a resultados positivos para la naturaleza.
Operar en sistemas (Enfoque sistémico)	La participación y la colaboración con sistemas más amplios, incluyendo el intercambio de información entre cadenas de valor, para facilitar la simbiosis industrial. Una economía circular basada en la maximización del valor de los materiales de alta calidad será más compleja, involucrará a más proveedores locales e incluirá la participación de más partes interesadas que el modelo lineal.
Captura y valor compartido	El valor creado y capturado debe compartirse entre las cadenas de valor para garantizar que la transición circular sea efectiva y duradera. No se debe crear valor para una parte de la cadena de valor a expensas de otra.

Figura 27 Oportunidades de circularidad frente a la cadena de valor minera
Fuente: Adaptada de Colombia, Ministerio de Minas y Energía —MME— (2022b, p. 9).

La norma técnica colombiana NTC-ISO 59004:2024 “Economía Circular. Vocabulario, Principios y orientación para la implementación” establece algunas orientaciones para la gestión de recursos en el marco de la economía circular que pueden ser aplicables a las operaciones de beneficio y transformación de minerales:

ACCIÓN	DESCRIPCIÓN
Rechazar	Hacer que las soluciones sean redundantes al abandonar su función o al ofrecer la misma función con una solución radicalmente diferente.
Repensar	Reconsiderar decisiones de diseño y fabricación. Hacer un uso más intensivo del servicio (por ejemplo, mediante el uso compartido o poniendo en el mercado productos multifuncionales)
Abastecer	Seleccionar recursos recuperados o renovables, obtenidos o producidos de manera sostenible. Utilizar recursos que puedan reciclarse fácilmente o devolverse a la biósfera. Reconsiderar formulaciones.
Reducir	Aumentar la eficiencia en la fabricación o el uso del producto consumiendo menos recursos naturales y materiales.
Reparar	Renovar un producto defectuoso o dañado para que pueda utilizarse en su función original.

Reusar	Reusar un producto desechado que aún esté en condiciones de funcionamiento y cumpla su función original.
Restaurar	Renovar a una condición útil durante la vida útil esperada con características de calidad y desempeño similares.
Remanufacturar	Restaurar un artículo, a través de un proceso industrial, a una condición como nueva desde una perspectiva de calidad y desempeño.
Reutilizar con un nuevo propósito	Adaptar el producto o sus partes para un uso en una función diferente a la que fue originalmente destinado sin hacerle modificaciones mayores a su estructura física o química.
Cascadas	Trasladar materiales recuperados de un bucle a otro para optimizar los flujos de insumo a través de ciclos adicionales, a menudo con una calidad y cantidad decrecientes. Al adoptarse para materiales biobasados, las cascadas implican el uso repetido de recursos renovables con una calidad decreciente, con tratamientos finales como compostaje, recuperación de energía o biodegradación, y el retorno seguro del material al medio ambiente.
Reciclar	Recuperar y procesar materiales para obtener la misma (nivel alto) o menor (nivel bajo) calidad a través de actividades como recuperación, recolección, transporte, segregación, limpieza y reprocesamiento.
Recuperar energía	Generar energía útil a partir de recursos recuperados.
Reminar	Minar o extraer de rellenos sanitarios o plantas de residuos puede ser posible en algunos casos si las actividades de minería y extracción son gestionadas de forma sostenible.

Figura 28 Orientación para las acciones de gestión de recursos
Fuente: NTC-ISO 59004 de 2024

Beneficio y transformación de metales y economía circular

De acuerdo con el International Council on Mining and Metals al igual que la minería, las etapas de beneficio y transformación de minerales metálicos se generan residuos que deben gestionarse, pero su principal contribución a la economía circular se basa en el procesamiento de residuos y metales secundarios. Las fundiciones primarias suelen utilizar chatarra junto con concentrados primarios, produciendo metales con diferentes cantidades de contenido reciclado. También existen fundiciones secundarias que se especializan en materiales secundarios para garantizar el control del proceso.

Usos de algunos de los residuos mineros

- ✓ La roca estéril se utiliza como relleno y los relaves o colas en la construcción de carreteras o a veces como materia prima para cemento y hormigón, o reprocesada posteriormente para extraer minerales y metales.
- ✓ Los relaves o colas de manganeso se utilizan en agroforestería, edificios y materiales de construcción, revestimientos, resinas, vidrio y esmaltes.
- ✓ Los relaves ricos en arcilla se utilizan para fabricar ladrillos, baldosas y cemento.
- ✓ La escoria se utiliza a menudo en la construcción de carreteras o en conjunto con el hormigón y cemento.
- ✓ El lodo rojo de bauxita es un residuo alcalino sólido producido en refinerías de aluminio se utiliza como enmienda del suelo, en el tratamiento de aguas residuales y como materia prima para vidrio, cerámica y ladrillos.
- ✓ El agua de mina (escorrentía) se utiliza para la supresión de polvo y el procesamiento de minerales, usos industriales y agrícolas, como refrigerante y a veces como fuente de agua potable.
- ✓ Los lodos del tratamiento de drenaje ácido de rocas, ricos en hierro, se comercializan para su uso en pigmentos.
- ✓ Las fundiciones suelen incluir plantas de ácido para convertir el dióxido de azufre en ácido sulfúrico, un producto químico industrial muy útil.
- ✓ Los estériles producto de la explotación de piedras preciosas puede ser utilizado como uno de los materiales para la pavimentación de vías terciarias.
- ✓ Los relaves o colas resultantes del beneficio de los concentrados polimetálicos puede ser mezclada con concreto y aditivos para ser incorporado en las paredes de los túneles de la actividad minera y dar estabilidad.

En los procesos de beneficio y transformación de minerales es necesario caracterizar la cadena productiva de la planta de beneficio, ya que esto permitirá identificar cómo los materiales ingresan, cómo se utilizan y cómo finalmente salen de la organización, lo cual contribuye a entender en qué punto de la cadena de valor de la organización los materiales se convierten en residuos y sus causas, lo que a su vez permite a la organización identificar posibilidades de prevención de residuos y tomar medidas de recircularidad. Asimismo, la organización puede ir más allá de la reducción y resolución de los impactos negativos cuando se han generado residuos y avanzar hacia la gestión de estos como un recurso aprovechable (Colombia, MME, 2021a, p. 35).

Tayebi-Khorami et al. (2019), consideran que dos de los retos más importantes que actualmente enfrenta la industria minera son la disminución progresiva de las leyes o tenores de metales en los depósitos y el aumento de los tonelajes manejados en las operaciones, pues estos se relacionan de manera directa con la generación de desechos mineros y sus riesgos, una situación que se seguirá agravando cada vez más bajo el modelo de economía lineal convencional, imperante dentro del sector.

Los autores consideran que es necesario contemplar enfoques alternativos relacionados con la disminución de la generación de desechos, como puede ser el uso de relaves espesados, mejorar la rehabilitación de áreas explotadas, o el reciclaje y reprocesamiento de rocas y relaves mineros. En este sentido, mencionan que

[...] la economía circular articula la importancia de los sistemas de circuito cerrado que reducen la necesidad de extracción y procesamiento de nuevos recursos [...] dentro del sector de la minería y los metales, seguir el principio de reducción de residuos de las 3R (reducir, reutilizar, reciclar) puede suponer una contribución significativa. (Tayebi-Khorami et al., 2019, p. 8)

El modelo de economía circular promueve la eficiencia en el uso de materiales, agua y energía. Adicionalmente, incorpora tres principios, que de manera general consiste en:

1. Procurar el ecodiseño de los productos, de modo que aumente la vida útil.
2. Mantener los materiales en circulación contribuyendo a la economía.
3. Promover la eficiencia de los sistemas de producción de productos y recursos circulares, eliminando en el diseño los factores externos negativos; por ejemplo, “la energía requerida para este ciclo productivo debería ser renovable por naturaleza” (Colombia, MME, 2021a).

Los beneficios de las energías renovables en proyectos mineros reducen los costos operativos; protegen contra los precios volátiles de las materias primas cuando la fuente de energía se basa en combustibles fósiles; ayudan a diversificar el riesgo de suministro de energía; reducen las emisiones de gases de efecto de invernadero; disminuyen el ruido local y la contaminación del aire; mejoran el acceso a la energía en regiones remotas, cuando el proyecto minero no esté conectado a la red de energía y puedan aprovecharse para electrificar a las comunidades aledañas; mejoran las ventajas competitivas y propician la instalación de proyectos de energía renovables en sitios mineros recuperados para obtener cuotas de arrendamiento de tierras y respaldar el cierre de minas en la región (Giz et al., 2018).

Los proyectos de circularidad conservan ciertas características, de la que destaca la posibilidad de incrementar el valor de una materia prima.

Adicionalmente, el modo de gestionar los residuos producidos debe ser visualizado como una oportunidad para el desarrollo de formas innovativas, que no solo permiten transformarlos en materia prima económicamente viable, sino que también pueden evitarse los costos de su adecuada disposición bajo el esquema actual (Mendiola, 2019, citado en Colombia, MME, 2021a, p. 151). Sin embargo, requerimientos de personal técnico y tecnología para el desarrollo de proyectos circulares pueden ser altos y pueden generar limitantes para niveles de producción bajos.



No obstante, el titular minero o beneficiario del otorgamiento de la licencia ambiental deberá implementar las acciones de seguimiento y monitoreo (auditorías ambientales internas) que le permitan identificar el grado de cumplimiento de las medidas de manejo ambiental aprobadas en los Planes de Manejo Ambiental y la efectividad de las acciones propuestas para el manejo de los impactos ambientales, en pro de garantizar la eficacia y eficiencia de las medidas ambientales implementadas y aprobadas en la licencia ambiental.

9.2 Informe de Cumplimiento Ambiental. Autoridad ambiental

El control y seguimiento ambiental tiene como fin inspeccionar o monitorear las acciones de las personas sobre el territorio, así como la evolución de un proyecto, obra o actividad en el cumplimiento de las obligaciones derivadas de la licencia ambiental dirigida a garantizar la sostenibilidad, conservación, recuperación, prevención o mitigación de un impacto negativo determinado sobre los recursos naturales renovables.

Dicho control y seguimiento puede llevarse a cabo de dos maneras principales:

- ✓ Inspección física en el terreno, que implica una visita técnica al proyecto.
- ✓ Revisión documental, que consiste en analizar el Informe de Cumplimiento Ambiental, proporcionado por el titular minero.

Resultado del control y seguimiento, se emite un informe técnico que puede dar lugar a recibir a satisfacción o a realizar un requerimiento para subsanar alguna situación que pueda estar generando una afectación ambiental. En caso de hacer caso omiso al requerimiento, la autoridad ambiental puede iniciar un proceso sancionatorio con fundamento en la Ley 1333 de 2009 modificada parcialmente por la Ley 2387 de 2024.

• Ten presente que...

El éxito de un proyecto de circularidad en la etapa de beneficio y transformación parte de conocer la información relacionada con la descripción de operaciones unitarias para el procesamiento del mineral (trituración, concentración por gravedad, lavado, lixiviación, flotación, separación magnética, filtración, refinación y fundición) y consumos de reactivos e insumos en cada fase del beneficio y transformación (sustancias químicas), cantidad de material procesado y cantidad de material recuperado. Una vez se analiza esta información, se identifican las posibles oportunidades de implementar un proyecto de economía circular (Colombia, MME, 2022b, p. 58).

10.1 Casos de éxito de economía circular en proyectos mineros

A continuación, se relacionan algunos ejemplos de casos exitosos en Colombia, con la implementación de la economía circular en el beneficio y la transformación de minerales:

- ✓ CEMENTOS ARGOS. Incorporación de la línea de acción de economía circular dentro de sus operaciones, la empresa investiga y trabaja en la optimización de procesos, el desarrollo de nuevos productos y servicios, la generación de nuevos modelos de negocio, el fortalecimiento de la cadena de valor y el desarrollo de las comunidades de su área de influencia. (Colombia, MME, 2022b, p. 31)
- ✓ SUMICOL S.A. Aprovechamiento de relaves compuesto en gran porcentaje por caolín utilizándolo en la fabricación de cemento blanco. (Colombia, MME, 2022b, p. 31)
- ✓ MINERA LAS BRISAS DE COLOMBIA S. A. S. La compañía realizó el cambio de mineral de asbesto crisotilo al silicato de magnesio, el cual se empezó a usar como materia prima y una gran oportunidad de negocio. Dentro de los procesos productivos del mineral de silicato de magnesio se definen 3 etapas: en la primera se utilizan como fertilizante en un 60% exportación y un 40% en el mercado nacional. Como segunda etapa se utilizan como filtros catalizadores para el mejoramiento de aguas residuales de la producción de petróleo y por último como producción de moldes cerámicos. (Colombia, MME, 2022b, p. 32)
- ✓ MIRAFLORES COMPAÑÍA MINERA S.A.S. Investigación de los lodos generados mediante el desarrollo de pruebas de resistencia y calidad para la fabricación de ladrillos las cuales han arrojado que estos pueden ser catalogados óptimos con porcentaje de uso de lodos en la mezcla del 30%. En relación con el uso de agua en el proceso se cuenta con ciclos cerrados, en donde el agua es recirculada y se realiza uso de agua lluvias tanto en plataformas como en el área de corte de núcleos. Se contempla en el componente energético el uso de paneles solares. (Colombia, MME, 2022b, p. 32)

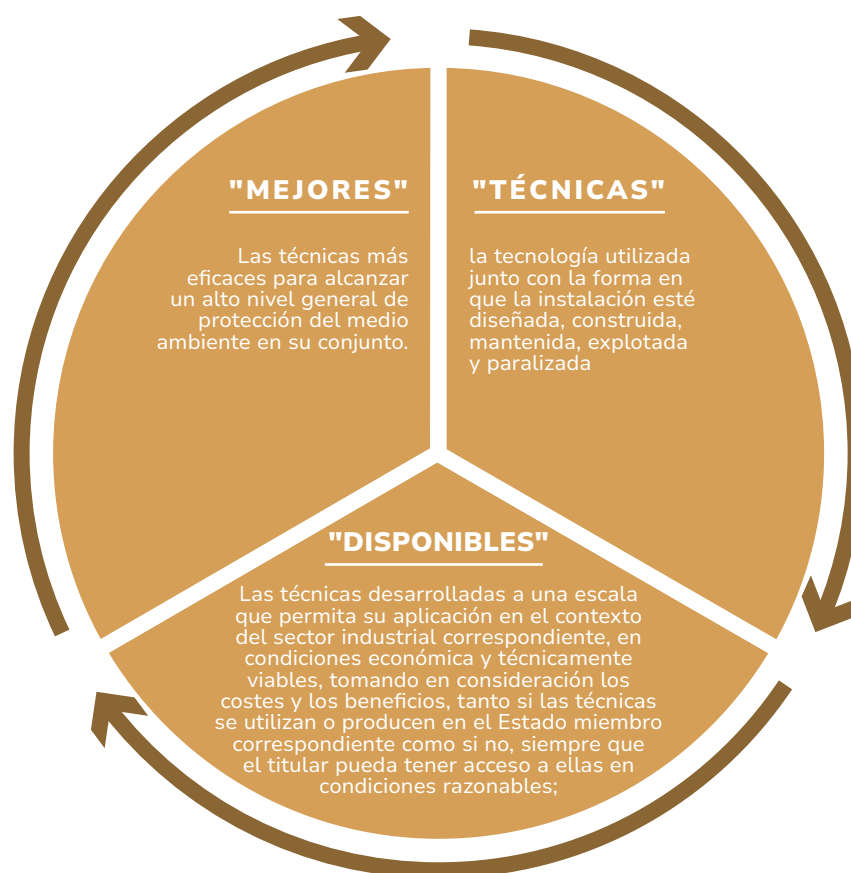
- ✓ MINEROS S.A. cuenta con un Centro de Economía Circular, el cual se gestionan todos los residuos que se generan producto del desarrollo de las operaciones y del campamento minero. Acogiendo los lineamientos del modelo basura cero del país. (Colombia, MME, 2022b, p. 32)



A continuación, se documenta una experiencia exitosa del aprovechamiento de estériles de la minería de esmeraldas llevada a cabo por la Alcaldía de Muzo Boyacá

10.2. Las mejores técnicas disponibles y prácticas mineras aplicables a operaciones de beneficio y transformación

La directiva 2008/1/CE del parlamento europeo y del consejo de 15 de enero de 2008 relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación define a las «mejores técnicas disponibles» como la fase más eficaz y avanzada de desarrollo de las actividades y de sus modalidades de explotación, que demuestren la capacidad práctica de determinadas técnicas para constituir, en principio, la base de los valores límite de emisión destinados a evitar o, cuando ello no sea practicable, reducir en general las emisiones y el impacto en el conjunto del medio ambiente. Este concepto no únicamente aplica para las emisiones, en general puede ser aplicado a cualquier aspecto de tipo ambiental que quiera ser prevenido y/o corregido desde la fuente. El concepto puede definirse como:



Una publicación denominada “Documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para Manejo de Relaves y estériles en Actividades Mineras elaborado en el año 2009 por la Comisión Europea relaciona las actividades que tienen que ver con el manejo de relaves y roca estéril producto de operaciones mineras y de procesos de beneficio y transformación de minerales . En particular, ese trabajo relacionó actividades consideradas como ejemplos de “buenas prácticas”. Las técnicas de extracción y el procesamiento de minerales solo se tratan como relevantes para la gestión de relaves y rocas estériles. La intención es crear conciencia sobre tales prácticas y promover su uso en todas las actividades de este sector.

En la siguiente lista se destacan, por ejemplo, algunos ejemplos de mejores técnicas disponibles para el manejo de relaves, entre ellos:

	MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES – MTD 'S
Manejo de relaves en actividades mineras	Los relaves en lodo, llamados "lodo rojo" del refinado de alúmina, tienen un pH elevado y se almacenan en sistemas convencionales de presas/ estanques de relaves, se espesan hasta el punto de que se pueden "apilar en seco" o se descargan en el mar.
	Los relaves de las operaciones de metales básicos se manejan principalmente como lodos en grandes estanques de relaves. A menudo, los minerales de metales básicos contienen sulfuros (en una cantidad mayor

	que los minerales de amortiguación contenidos), por lo que los relaves tienen un potencial de drenaje ácido de roca (ARD). En una operación, los relaves se descargan de forma subacuática para evitar la generación de DAR desde el principio. Algunas operaciones rellenan parte de los relaves subterráneos. En varios casos, el método de cierre elegido para la balsa de relaves es la técnica de cobertura "húmeda", en otros casos se aplican coberturas secas.
	Los relaves gruesos de las operaciones de mineral de hierro se manejan en pilas. Los relaves en lodo se manejan en estanques o presas de relave
	Algunas de las minas de oro operadas en Europa tienen un potencial ARD neto. Cuando se utiliza la lixiviación con cianuro para extraer el oro, el cianuro se destruye antes de descargarlo en el estanque de relaves.
	Para los minerales industriales, varios sitios no generan relaves o los venden como agregados
	Las operaciones de boratos primero almacenan los relaves gruesos en montones antes de que se vuelvan a llenar.
	Una operación de caolín descrita en el documento primero deshidrata los relaves finos antes de que se transfieran a las pilas, esto también se hace en algunas operaciones de piedra caliza/carbonato de calcio
	Una operación de piedra caliza desecha los relaves en suspensión en una antigua cantera
	Los sitios de potasa manejan los relaves sólidos en montones o rellenos. Los relaves líquidos se bombean parcialmente a pozos profundos y se conducen parcialmente a aguas superficiales. En un caso descrito en este documento hay descarga marina de los relaves
	En las operaciones de carbón, los relaves gruesos generalmente se manejan en montones o en antiguas operaciones a cielo abierto. Los finos en suspensión se desechan en estanques o se filtran. En algunos casos se venden tanto los relaves filtrados como los relaves gruesos. En otros casos se amontonan. El relleno a menudo no es viable
	Algunas de las medidas aplicadas para prevenir accidentes incluyen: rutinas de monitoreo, manuales de operación, supervisión y mantenimiento (OSM), auditorías independientes, balances hídricos, mediciones de hundimiento, revisión de la planificación por expertos externos, uso de piezómetros y ciclómetros y monitoreo sísmico.

En la siguiente lista se destacan algunos ejemplos mejores técnicas disponibles en el manejo de desechos de roca o material estéril de mina:

	MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES – MTD'S
Manejo de Estériles en Actividades Mineras	En operaciones subterráneas, la roca estéril generalmente permanece bajo tierra como en el caso de los relaves, los desechos de roca en las operaciones de metales base a veces tienen un potencial de drenaje ácido (Acid Rock Drainage – ARD). Algunas operaciones manejan roca estéril ARD y no ARD por separado. La roca estéril que no genera ARD se usa como agregado, se usa para la construcción de represas o caminos en el sitio o se maneja en montones. Al momento del cierre, los montones de roca estéril que generan ARD se cubren con cubiertas secas diseñadas para prevenir la generación de ARD.
	La roca estéril de una operación de hierro se maneja en montones con los relaves gruesos
	Los desechos de roca de las operaciones de oro se manejan en montones, se usan para la construcción de represas o se rellenan en el tajo abierto.
	Algunas operaciones de minerales industriales rellenan la roca estéril o la venden como agregado
	En muchas operaciones de carbón, la roca estéril se maneja en montones con los relaves finos filtrados. El diseño final de la pila se acuerda con las autoridades y las comunidades con el objetivo de crear estructuras integradas al paisaje.

Para el caso de la minería de pequeña escala, tomando como referencia el documento “Mejores prácticas de manejo en el uso del cianuro en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala” elaborado en 2021 el marco del Programa Planet Gold a continuación se resumen algunas de las mejores prácticas para el manejo de efluentes mineros con contenido de cianuro provenientes de las actividades de beneficio de oro.

BUENA PRÁCTICA	DESCRIPCIÓN GENERAL
Degradación y tratamiento de los efluentes con cianuro	El Cianuro se degrada con compuestos que existen en la naturaleza, como el dióxido de carbono, el amoníaco y los nitratos. En el ambiente, los compuestos de Cianuro sufren diferentes procesos naturales de degradación. La mayoría de los compuestos del cianuro hidrolizan rápidamente en presencia de luz solar (es decir, se transforman en compuestos orgánicos y/o inorgánicos de carbono y nitrógeno menos tóxicos). De hecho, todos los complejos de Cianuro están sujetos oxidación, pero a diferentes índices de descomposición (esto es, neutralización). En condiciones normales, el Cianuro libre (por lejos, la forma más tóxica) no se encuentra disponible biológicamente luego de que llega a los suelos y a los sedimentos, porque los iones de Cianuro se complejizan de inmediato con una gran variedad de metales, se metabolizan por la acción de microorganismos y/o se volatilizan.

Degradación natural	El cianuro se destruye naturalmente por oxidación, lo que puede ocurrir sin necesidad de agregados químicos adicionales. Se usa el término “degradación natural” La oxidación de los compuestos de cianuro-metal suelen tener dos etapas: primero, se transforman a cianato (CN-O), que luego se convierte en bicarbonato y nitrógeno. Un estudio sobre la degradación natural, llevado a cabo en Canadá y con una duración de 15 semanas, registró una disminución de 68,7 mg/l a 0,008 mg/l,²⁶ pero debe tenerse en cuenta que los índices de degradación variarán según los factores ambientales específicos de cada región. En el sector de la MAPE, es común que se dependa de la degradación natural, ya que los efluentes con Cianuro se liberan a piletas o lagunas y se deja que los complejos de Cianuro se degraden por efecto de oxidación. La degradación natural debe monitorearse para una gestión segura y responsable. Mientras que la degradación natural no precisa de grandes inversiones de capital o costos en sustancias químicas, en algunos casos, la degradación natural (por sí sola) puede no llegar a reducir los niveles de Cianuro a los permitidos para su liberación al medio ambiente. Además, mientras ocurre la degradación, las piletas de neutralización y los embalses siguen representando un riesgo para los seres humanos y animales. Mientras que muchos de los compuestos pueden oxidarse totalmente por procesos naturales, los que contienen Cu, Ni y Fe son particularmente resistentes a la corrosión. Por esta razón, y para garantizar que se eviten las emisiones nocivas para el medio ambiente, es imperativo que los operadores de CN monitoreen los niveles de pH y las concentraciones de CN soluble en ácido débil, especialmente después de haber vertido efluentes.
Neutralización de efluentes con cianuro mediante el uso de reactivos	La efectiva neutralización del cianuro puede lograrse mediante el uso de diferentes oxidantes. La neutralización química del cianuro es rápida y efectiva, y se ha implementado ampliamente dentro del sector minero industrial del oro, así que sus principios son conocidos. En el sector de la MAPE, los reactivos más comunes (aditivos) para estos procesos son el peróxido de hidrógeno, la lejía (hipoclorito de sodio) el dióxido de azufre y el sulfato de hierro. Cada uno de estos reactivos presentan propiedades químicas y deberán seleccionarse según las condiciones locales y las necesidades químicas. En algunos casos, los reactivos se pueden agregar a las piletas de neutralización para facilitar la destrucción de los compuestos de CN (por ejemplo, la lejía, el hipoclorito, el sulfato ferroso). En ocasiones se han sumergido viejas cubiertas de caucho en las piletas de neutralización, porque el caucho contiene grupos tiol con azufre, que han demostrado ser útiles para flocular sedimentos finos, y así ayudan a clarificar las soluciones y a precipitar el mercurio, que se puede encontrar asociado a estos sedimentos finos. Cada uno de estos métodos basados en reactivos tiene diferentes requisitos en cuanto a controles de proceso, y los costos varían según el neutralizador químico seleccionado, las cantidades que necesita neutralizar y la concentración del Cianuro. La disponibilidad de ciertos reacti-

vos neutralizantes puede ser un factor limitante en algunos lugares. La liberación de efluentes deberá tratarse para garantizar que se cumpla con los límites reglamentarios. La mayoría de las jurisdicciones tienen un límite de efluentes con CN, o han adoptado las guías internacionales al respecto, por ejemplo, la del CFI/Banco Mundial, establecida en 1,0 mg/l CN total.

En el contexto de la MAPE, sería beneficioso implementar herramientas como la evaluación del ciclo de vida, de tal manera que se identifiquen focos de intervención con respecto al impacto ambiental de las diferentes etapas del proceso, así como de las varias opciones de tratamiento de efluentes.

A woman wearing a yellow hard hat and a blue long-sleeved shirt is smiling while working in a processing plant. She is wearing orange and grey gloves and is handling dark, irregularly shaped rocks in a metal tray. The background shows industrial structures and a large orange semi-transparent overlay on the right side of the image.

11

Mitigación y adaptación al cambio climático en las plantas de beneficio y transformación

El cambio climático no es un tema ajeno a la actividad minera: influye en la disponibilidad de agua, en la estabilidad de los ecosistemas y en la seguridad de las operaciones. Por eso, los proyectos de beneficio y transformación deben incorporar acciones simples, medibles y viables que contribuyan a mitigar sus emisiones y fortalecer su capacidad de adaptación

11.1 Mitigación: producir con menos huella

Mitigar significa reducir la contribución del proyecto al cambio climático. En el caso de las plantas de beneficio, las acciones más relevantes se concentran en tres frentes:

- ✓ Energía: preferir fuentes renovables o mixtas, optimizar el consumo eléctrico y mantener equipos eficientes.
- ✓ Transporte y logística: disminuir recorridos internos, compartir transporte de insumos y promover la eficiencia de combustibles.
- ✓ Materiales y residuos: reducir el uso de reactivos, aprovechar subproductos y reciclar materiales metálicos y plásticos del proceso.

Cada planta puede identificar su propio indicador de huella de carbono operativa,

aunque no sea obligatorio calcularlo con exactitud. Lo importante es medir, comparar y mejorar: cuánto consumo se ahorra, cuánta energía se recupera o cuántos residuos se evitan.

11.2 Adaptación: operar de forma resiliente

Adaptarse significa prepararse para los efectos del clima sobre el proyecto y su entorno. Esto no implica estudios costosos, sino planificación consciente.

Algunos ejemplos prácticos son:

- ✓ Analizar cómo la variabilidad climática y el cambio climático afecta la disponibilidad de agua y ajustar los planes de manejo hídrico.
- ✓ Proteger las áreas de recarga y las coberturas vegetales que regulan el microclima local.
- ✓ Diseñar infraestructuras con drenajes y taludes resistentes a lluvias extremas.
- ✓ Coordinar con las comunidades y los municipios acciones preventivas ante inundaciones o deslizamientos.

La adaptación no solo reduce riesgos, sino que aumenta la continuidad y eficiencia del proyecto.

• Recuerda que... •

La minería responsable frente al clima no depende del tamaño del proyecto, sino de su capacidad de anticiparse y mejorar. Cada kilovatio ahorrado, cada litro de agua reutilizado y cada árbol protegido es también una medida de adaptación



Referencias

- Asian Development Bank. (2019). Coal briquettes. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/asiandevelopmentbank/49486847551/in/photostream/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2018a). Guía de participación ciudadana para el licenciamiento ambiental. https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/biblioteca/guia_participacion_ciudadana.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2018b). Guía para el diseño y construcción de indicadores de impactos internalizables en el marco del licenciamiento ambiental en Colombia. https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/manuales_guias/30_11_2018_indicadores_de_impactos_internalizables_enviado.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2018c). Guía para la definición, identificación y delimitación del área de influencia. https://www.andi.com.co/Uploads/guia_para_la_definicion_identificacion_y_delimitacion_del_area_de_influencia_0.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2020). Sistema para el Análisis Geográfico de Información en el Licenciamiento Ambiental de la ANLA (SIGWEB). <https://datosabiertos-anla.hub.arcgis.com/apps/anla::agil/explore>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2021a). Estandarización y jerarquización de impactos ambientales para proyectos licenciados por ANLA. https://www.anla.gov.co/documentos/sipta/valoracion_economica/28-05-2021-anla-Jerarquizacion2021.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2021b, octubre 30). La ANLA pone a disposición de sus usuarios el Aplicativo para la presentación del Plan de Manejo Ambiental —APMA—. https://www.anla.gov.co/01_anla/noticias/2022-la-anla-pone-a-disposicion-de-sus-usuarios-el-aplicativo-para-la-presentacion-del-plan-de-manejo-ambiental-apma
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2022a). Guía para la elaboración del Plan de Cierre y Abandono de proyectos mineros. https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/proyectos/02_transformacionales/03_nuevo_modelo/Documentos/05-09-2022-anla-guia-de-cierre-abandono-proyectos-mineros.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2022b, septiembre 22). Guía para la solicitud de autorización de ocupación de cauces, playas y lechos. <https://storymaps.arcgis.com/stories/56ac6a8baf6b413f818a02312bd036dc>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (2022c). Indicadores de efectividad en el proceso de licenciamiento ambiental. https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/proyectos/02_transformacionales/03_nuevo_modelo/Documentos/27-08-2022-Indicadores_de_efectividad.pdf
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (s. f. a), Biblioteca WEB ANLA. <https://www.anla.gov.co/biblioteca-web>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (s. f. b). Datos abiertos ANLA. <https://datosabiertos-anla.hub.arcgis.com/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (s. f. c). EUREKA. <https://www.anla.gov.co/eureka/>
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). (s. f. d). VALIDA. https://www.anla.gov.co/01_anla/entidad/subdirecciones-y-oficinas/instrumentos-permisos-y-tramites-ambientales/sistema-de-informacion-geografica
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). Criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades objeto de licenciamiento ambiental. https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/sipta/valoracion_economica/cartilla_criterios_tecnicos_para_el_uso_de_herramientas_economicas_ver2.pdf

- Battle, T., Srivastava, U., Kopfle, J., Hunter, R. y McClelland, J. (2014). Chapter 1.2 The Direct Reduction of Iron. En *Treatise on Process Metallurgy: Volume 3 Industrial Processes* (pp. 89-176). Elsevier.
- Bukharov, V. Железорудные окатыши [Pellets de mineral de hierro]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D1%82%D1%8B%D1%88%D0%B8.jpg
- Codelco. (2007). Fundición en División El Teniente de Codelco [Figura]. Flickr. <https://www.flickr.com/photos/codelco/13998205034/in/photos-tream/>
- Colombia, Agencia Nacional de Minería (ANM). (2014). Resolución 338, por medio de la cual se adoptan las condiciones de las pólizas minero-ambientales y se dictan otras disposiciones (30 de mayo).
- Colombia, Agencia Nacional de Minería (ANM). (2018). Resolución 318, por la cual se adoptan los términos de referencia aplicables para la elaboración de los programas y proyectos de gestión social en la ejecución de los proyectos mineros, se deroga la Resolución No. 708 del 29 de agosto de 2016 y se dictan otras disposiciones (20 de junio).
- Colombia, Agencia Nacional de Minería (ANM). (2021). Resolución 263, por la cual se deroga la Resolución 406 del 28 de junio de 2019 y se modifica la Resolución 318 del 20 de junio de 2018, en la cual se adoptan los términos de referencia aplicables para la elaboración de los programas y proyectos de Gestión Social en la ejecución de los proyectos mineros, y se dictan otras disposiciones (25 de mayo).
- Colombia, Agencia Nacional de Minería. (ANM). (s. f.). Registro Único de Comercializadores de Minerales. <https://www.anm.gov.co/?q=Rucom>
- Colombia, Congreso de la República. (1993). Ley 99, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones (22 de diciembre).
- Colombia, Congreso de la República. (1997). Ley 373, por la cual se establece el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua (6 de junio).
- Colombia, Congreso de la República. (2001). Ley 685, por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones (15 de agosto).
- Colombia, Congreso de la República. (2009). Ley 1333, por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones (2 de julio).
- Colombia, Congreso de la República. (2012). Ley 1523, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones (24 de abril).
- Colombia, Congreso de la República. (2013). Ley 1658, por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones (15 de julio).
- Colombia, Congreso de la República. (2015). Ley 1753, por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, “Todos por un nuevo país” (9 de junio).
- Colombia, Congreso de la República. (2022). Ley 2250, por medio del cual se establece un marco jurídico especial en materia de legalización y formalización minera, así como para su financiamiento, comercialización y se establece una normatividad especial en materia ambiental (11 de julio).
- Colombia, Congreso de la República. (2023). Ley

- 2294, por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2022- 2026 "Colombia, potencia mundial de la vida" (19 de mayo).
- Colombia, Consejo de Estado, Sala de lo Contencioso Administrativo, Sección Primera. (2022). Medio de control de protección de los derechos e intereses colectivos. Consejero Ponente: Roberto Augusto Serrato Valdés. Radicación 25000234100020130245901 (4 de agosto). <https://www.consejodeestado.gov.co/news/02-sep-2022.htm>
- Colombia, Departamento Nacional de Planeación. (2011). Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 "Prosperidad para todos". <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/PND/PND2010-2014%20Tomo%20I%20CD.pdf>
- Colombia, Departamento Nacional de Planeación. (2023). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 "Colombia, potencia mundial de la vida". <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/plan-nacional-de-desarrollo-2022-2026-colombia-potencia-mundial-de-la-vida.pdf>
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (1997). Resolución 619, por la cual se establecen parcialmente los factores a partir de los cuales se requiere permiso de emisión atmosférica para fuentes fijas (7 de julio).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005a). Resolución 1552, por el cual se adoptan los manuales para evaluación de estudios ambientales y de seguimiento ambiental de proyecto y se toman otras determinaciones (20 de octubre).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005b). Resolución 2202, por la cual se adoptan los Formularios Únicos Nacionales de Solicitud de Trámites Ambientales (29 de diciembre).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006a). Resolución 627, por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental (7 de abril).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006b). Resolución 1402, por la cual se desarrolla parcialmente el Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005, en materia de residuos o desechos peligrosos (17 de julio).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). Resolución 1362, por la cual se establecen los requisitos y el procedimiento para el Registro de Generadores de Residuos o Desechos Peligrosos, a que hacen referencia los artículos 27 y 28 del Decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 (2 de agosto).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010a). Decreto 3930, por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11I- Libro 11 del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones (25 de octubre).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010b). Decreto 4728, por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010 (23 de diciembre).
- Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010c). Resolución 650, por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (29 de marzo).
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2012). Resolución 1514, por la cual adoptan los Términos de Referencia para la Elaboración del Plan de Gestión del Riesgo para el Manejo de Vertimientos (31 de agosto).
- Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). Decreto 3016, por el cual se reglamenta el permiso de estudio para la recolección de especímenes de especies silvestres de la diversidad biológica con fines de elaboración de estudios ambientales (27 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015a). Decreto 1076, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible (26 de mayo).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015b). Resolución 631, por el cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones (17 de marzo).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015c). Resolución 1258, por la cual se adoptan los lineamientos, la guía ambiental y los términos de referencia para las actividades de formalización de minería tradicional a que se refiere el Decreto 933 de 2013 y se toman otras determinaciones (19 de mayo).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016a). Decreto 2099, por el cual se modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto número 1076 de 2015, en lo relacionado con la “Inversión Forzosa por la utilización del agua tomada directamente de fuentes naturales” y se toman otras determinaciones (22 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016b). Resolución 1740, por la cual se establecen lineamientos generales para el manejo, aprovechamiento y establecimiento de guaduales y bambusales y se dictan otras disposiciones (24 de noviembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016c). Resolución 2182, por el cual se modifica y consolida el Modelo de Almacenamiento Geográfico contenido en la Metodología General para presentación de Estudios Ambientales y en el Manual de Seguimiento Ambiental de Proyectos (23 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016d). Resolución 2206, por me-

dio de la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental - EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones (27 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017a). Decreto 075 de 2017, por el cual se modifican el literal h del artículo 2.2.9.3.1.2, el párrafo del artículo 2.2.9.3.1.3., el artículo 2.2.9.3.1.8 y el numeral 4 del artículo 2.2.9.3.1.17 del Decreto 1076 de 2015, en lo relacionado con la “inversión forzosa por la utilización del agua tomada directamente de fuentes naturales” y se toman otras determinaciones (20 de enero).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017b). Resolución 0472, por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones (28 de febrero).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017c). Resolución 0751, por la cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración de los Estudios de Impacto Ambiental, para las nuevas plantas de beneficio de oro por fuera de los títulos mineros y la reubicación de las existentes (7 de abril).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017d). Resolución 1669, por la cual se adoptan los criterios técnicos para el uso de herramientas económicas en los proyectos, obras o actividades de licencia ambiental o instrumento equivalente y se adoptan otras determinaciones (15 de agosto).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017e). Resolución 2254, por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones (1 de noviembre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018a). Guía de aplicación de la valoración económica ambiental. <https://archivo.>

minambiente.gov.co/images/NegociosVerdesysostenible/pdf/valoracion_economica_ambiental/Gu%C3%ADa_de_aplicaci%C3%B3n_de_la_VEA_Comprimida.pdf

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018b). Manual de compensaciones del componente biótico. https://archivo.minambiente.gov.co/images/BosquesBiodiversidadYServiciosEcosistemas/pdf/manual_de_compensaciones/Manual_de_compensaciones_del_componente_bi%C3%B3tico.pdf

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018c). Resolución 0256, por la cual se adopta la actualización del Manual de compensaciones ambientales del componente biótico y se toman otras determinaciones (22 de febrero).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018d). Resolución 1257, por la cual se desarrollan los parágrafos 1 y 2 del artículo 2.2.3.2.1.1.3. del Decreto 1090 de 2018, mediante el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015 (10 de julio).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018e). Resolución 1259, por la cual se señala los casos en los que no se requerirá adelantar trámite de modificación de la licencia ambiental o su equivalente, para aquellas obras o actividades consideradas cambios menores o de ajuste normal dentro del giro ordinario de los proyectos del sector minero (10 de julio).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018f). Resolución 1402, por la cual se adopta la metodología general para la elaboración y presentación de estudios ambientales y se toman otras determinaciones (27 de julio).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018g). Resolución 1428, por la cual se modifican los artículos 9, 10 y 12 de la Resolución No. 256 del 22 de febrero de 2018, por medio de la cual se adopta la actualización del Manual de compensaciones ambientales

del componente biótico y se toman otras determinaciones (31 de julio).

Colombia, Ministerio de Ambiente y desarrollo Sostenible. (2021a). Resolución 0699, por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales domésticas tratadas al suelo, y se dictan otras disposiciones (6 de julio).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021b). Resolución 1058, por la cual se modifica parcialmente la Resolución 2202 del 29 de diciembre de 2005 y se adoptan otras determinaciones (7 de octubre).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021c). Listado de impactos ambientales específicos 2021. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Listado-de-Impactos-Ambientales-Especificos-2021-V.4.pdf>

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). Resolución 0126, por la cual se establece el listado oficial de las especies silvestres amenazadas de la diversidad biológica colombiana continental y marino costera, se actualiza el Comité Coordinador de Categorización de las Especies Silvestres Amenazadas en el territorio nacional y se dictan otras disposiciones (6 de febrero).

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f. a). Estrategia Nacional de Compensaciones Ambientales. <https://www.minambiente.gov.co/direccion-de-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistemas/estrategia-nacional-de-compensaciones-ambientales/>

Colombia, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s. f. b). Estrategia Nacional de Economía Circular. <https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/estrategia-nacional-de-economia-circular-ec>

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2014). Resolución 91544, por medio del cual se reglamentan los criterios de graduación de

las multas por el incumplimiento de las obligaciones contractuales emanadas de los títulos mineros (24 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2015a). Decreto 1073, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía (26 de mayo).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2015b). Decreto 1886, por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas (21 de septiembre).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2015c). Decreto 2504, por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario número 1073 de 2015 que define los aspectos técnicos, tecnológicos, operativos y administrativos para ejercer la labor de fiscalización minera y se toman otras determinaciones (23 de diciembre).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2015d). Guía para la elaboración del Programa de Uso Eficiente y Ahorro del Agua en la minería de metales preciosos y carbón - PUEAA. http://www.upme.gov.co/SeccionMineria_sp/Guia_programa_uso_eficiente_ahorro_agua_en_la_mineria.pdf

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2015e). Resolución 40599, por medio de la cual se adopta el glosario técnico minero (27 de mayo).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2016a). Decreto 1666, por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, No. 1073 de 2015, relacionado con la clasificación minera (21 de octubre).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2016b). Resolución 40391, por el cual se adopta la política minera nacional (20 de abril).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2017). Decreto 1949, por el cual se modifica y adiciona el Decreto Único Reglamentario

No 1073 de 2015, en cuanto se reglamentan los mecanismos para el trabajo bajo el amparo de un título en la pequeña minería y se toman otras determinaciones (28 de noviembre).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2020a). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de drenajes ácidos mineros. <https://www.minenergia.gov.co/static/cursos-mineria/src/document/PROPUESTA%20LINEAMIENTOS%20T%C3%89CNICOS%20DE%20POL%C3%8DTICA%20DE%20BUENAS%20PR%C3%81CTICAS%20-%20DRENAJES%20ACIDOS%20MINEROS.pdf> Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2021a). Economía circular en el sector minero colombiano “una oportunidad para la productividad minera”. Informe aportado por la Dirección de Minería Empresarial, documento interno de trabajo.

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2021b). Resolución 40008, por la cual se establece[n] los lineamientos para el desarrollo de la actividad de fiscalización de proyectos de exploración y explotación de minería en cumplimiento de lo establecido en el numeral 2 del literal A del artículo 7 de la Ley 2056 de 2020 (14 de enero).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2022a). Decreto 944, por el cual se modifica el Decreto 1886 de 2015 (1 de junio).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2022b). Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de economía circular en la actividad minera. <https://www.minenergia.gov.co/documents/7134/economia-circular-actividad-minera-mme-2022.pdf>

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (2022c). Resolución 40182, por medio de la cual se modifica y adiciona la Resolución 40008 del 14 de enero de 2021 (25 de mayo).

Colombia, Ministerio de Minas y Energía. (MME). (s. f.). Centro de Aprendizaje Minero. <https://www.minenergia.gov.co/en/micrositios/cen->

tro-de-aprendizaje-minero/

Colombia, Ministerio de Minas y Energía & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (MME & MADS) (2002). Guía minero-ambiental 3. Beneficio y transformación. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2051>

Colombia, Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Medio Ambiente. (2002). Resolución 18-0861, por medio de la cual se adoptan las guías minero-ambientales y se establecen otras disposiciones (20 de agosto).

Colombia, Ministerio del Trabajo. (2015). Decreto 1072, por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo (26 de mayo).

Colombia, Ministerio del Trabajo. (2020a). Resolución 491, por la cual se establecen los requisitos mínimos de seguridad para el desarrollo del trabajo en espacios confinados y se dictan otras disposiciones (24 de febrero).

Colombia, Ministerio del Trabajo. (2020b). Resolución 2605, por la cual se corrigen yerros mecanográficos y se modifican artículos de la Resolución 0491 del 24 de febrero de 2020 que establece los requisitos mínimos de seguridad para el desarrollo del trabajo en espacios confinados y se dictan otras disposiciones (30 de noviembre).

Colombia, Presidencia de la República. (1988). Decreto 2655, por el cual se expide el Código de Minas (23 de diciembre).

Colombia, Presidencia de la República. (2005). Decreto 4741, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral (30 de diciembre).

Colombia, Presidencia de la República. (2012). Decreto 2667, por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones (21 de diciembre).

Colombia, Presidencia de la República. (2018). Decreto 1090, por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones (28 de junio).

Colombia, Presidencia de la República. (2022a). Decreto 539, por el cual se expide el Reglamento de Higiene y Seguridad en las Labores Mineras a Cielo Abierto (8 de abril).

Colombia, Presidencia de la República. (2022b). Decreto 179, por el cual se modifica un artículo a la sección 1 y se adicionan otros a la sección 2 del capítulo 1 del título V de la parte 2 del libro 2 del Decreto 1073 de 2015, Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, en lo referente a requisitos y especificaciones de orden técnico minero para la presentación de documentos relacionados con la minería (3 de febrero).

Colombia, Presidencia de la República. (2022c). Decreto 1478, por medio del cual se adopta la actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se modifica el Artículo 2.3.1.2.2.4.3 de la Subsección 4, Sección 2, Capítulo 2, Título 1, Libro 2, del Decreto Único Presidencial 1081 de 2015 (3 de agosto).

Darling, P. (Ed.). (2011). SME mining engineering handbook (3.a ed.). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.

Dunne, R. C., Kawatra S. K. y Young, C. A. (Eds.). (2019). SME mineral processing and extractive metallurgy handbook. Society for Mining, Metallurgy and Exploration.

Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition. Seacourt. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>

Fachab. (2019). Magnetic separator of a conveyor belt at Lafarge [Figura]. Wikimedia Commons.

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Magnetic_separator_of_a_conveyor_belt_at_lafarge.jpg
- Handakiln. (2016). Cement-plant [Figura]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cement-plant.jpg>
- Iamgold. (2013). Essakane Mill in Burkina Faso [Figura]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Essakane_Mill_in_Burkina_Faso.jpg
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2002). Guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas. https://corponor.gov.co/control-calidad/2014/Guia_monitoreo_IDEAM.pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Dirección General. (2020). Resolución 471, por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia (11 de mayo).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Dirección General. (2021). Resolución 370, por medio de la cual se establece el sistema de proyección cartográfica oficial para Colombia (16 de junio).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Dirección General. (2022). Resolución 197, por medio de la cual se modifica la Resolución 471 y 529 de 2020 “Por medio de la cual se establecen las especificaciones técnicas mínimas que deben tener los productos de la cartografía básica oficial de Colombia. (27 de enero).
- Julca Zuloeta, D. J. (2022). La economía circular en la minería peruana. Documentos de Proyectos (LC/TS.2022/39). Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47895-la-economia-circular-la-mineria-peruana>
- Moats, M. y Free, M. (2019). Electrowinning. En R. C. Dunne, S. K. Kawatra y C. A. Young (Eds.), SME mineral processing and extractive metallurgy handbook (pp. 1369-1391). Society for Mining, Metallurgy and Exploration.
- Mazlum, S. (2019a). Trituradora de impacto [Figura]. Pexels. <https://www.pexels.com/es-es/foto/hombre-trabajando-adentro-trabajador-6890357/>
- Mazlum, S. (2019b). Trituradora de quijadas [Figura]. Pexels. <https://www.pexels.com/es-es/foto/adentro-naturaleza-muerta-maquinaria-poligono-industrial-6890378/>
- Ortiz Hermida J. (2019). Modelos empresariales de economía circular en pymes de Cali. https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/84703/1/TG02474.pdf
- Pizarro, E. (2015). Electro-obtencion [Figura]. Wikimedia Commons. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electro-obtencion.jpg>
- Sepro Mineral Systems. (2006). Falcon SB5200 Concentrator. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Falcon_SB5200_Concentrator.jpg
- Sepro Mineral Systems. (s. f.). Esquema de un concentrador centrífugo [Figura]. En Concentradores Falcon (SB) semi batch. Sepro Mineral Systems. <https://seprosystems.com/wp-content/uploads/2017/01/4-Falcon-SB-Concentrators-SP-LoRes.pdf>
- Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. Minerals, 9(5), 286. <https://doi.org/10.3390/min9050286>
- Xiao, G. (2014). Compound Cone Crusher (VSC series) [Figura]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Compound_Cone_Crusher_%28VSC_series%29.jpg