



MINISTERIO DE MINAS
Y ENERGÍA



ASESORÍAS TÉCNICAS
GEOLÓGICAS
ATG LTDA.

+ **PROPUESTA DE LINEAMIENTOS** +
TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS +
PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS +
PROCESOS ASOCIADOS AL BENEFICIO +
Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE +

PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS PROCESOS ASOCIADOS AL BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

Contrato de Consultoría **GGC-631-2022**

ELABORACIÓN

Equipo Técnico

Mauricio Alfonso R. / Gerencia de Proyectos

Freddy Quinn Q. / Dirección del Proyecto

Paola Martínez A. / Ingeniería Ambiental

Manuel Boneth G. / Ingeniería de Minas y Metalurgia

Jaime Vélez S. / Ingeniería de Minas

Alejandro Romero S. / Ingeniería de Procesos

Rafael Meneses R. / Control y Aseguramiento de Calidad

Natalia Velandia P. / Profesional Transversal

Oscar Herrán T. / Ingeniería Ambiental

Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos asociados al beneficio y transformación del cobre.

**Ministerio
de Minas y Energía.**

**Dirección
de Minería Empresarial.**

Asesorías Técnicas Geológicas ATG Ltda.

Diciembre de 2022

Páginas: 182

Contacto: menenergia@minenergia.gov.co

Contacto

menenergia@minenergia.gov.co

Diseño Editorial y gráficas

Yorfi David Ramírez M. / Diseñador Gráfico



El futuro
es de todos

Minenergía

ATG ASESORÍAS TÉCNICAS
GEOLOGICAS
ATG LTDA.

© Prohibida la reproducción parcial en cualquier medio, sin permiso escrito de los titulares del copyright.

INTRODUCCIÓN

El presente documento contiene la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con el beneficio y transformación de cobre, acorde con las buenas prácticas internacionales, el cual se elaboró en el marco del Contrato de Consultoría GGC-631-2022 celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía (Dirección de Minería Empresarial) y la empresa ATG Ltda. Dicha propuesta fue desarrollada teniendo en cuenta tanto la información nacional disponible en las diferentes entidades existentes como información internacional correspondiente, así como las conclusiones derivadas de los procesos de presentación, validación y ajuste, que se realizaron con los diferentes actores del sector minero en Colombia.

El proceso productivo del cobre inicia con la exploración geológica, etapa en la cual se detectan los yacimientos y su naturaleza. Durante la etapa de explotación, se extraen las rocas y se transportan hacia una primera etapa de conminución, denominada trituración, donde el mineral es reducido de tamaño mediante la acción de trituradoras hasta alcanzar un tamaño, a hoy, no mayor a media pulgada.

Debido a que el cobre en particular se encuentra en forma oxidada y/o sulfurada, para cada mina existe un tratamiento distinto. **El cobre sulfurado, obtenido en forma de grandes rocas desde la mina, después de la etapa de trituración, continúa reduciendo su tamaño en la fase de molienda. Posteriormente viene la etapa de flotación o concentración del cobre, pasando así al proceso de fundición, en la que se logra la purificación del mineral, para finalmente proceder a la obtención de cátodos de cobre de alta pureza, mediante el proceso de electrorrefinación.** En el caso del cobre oxidado, de la trituración pasa a un proceso de lixiviación y de concentración mediante extracción por solventes, para lograr por último una disolución selectiva mediante electroobtención, e igualmente alcanzar la forma de cátodos de cobre.

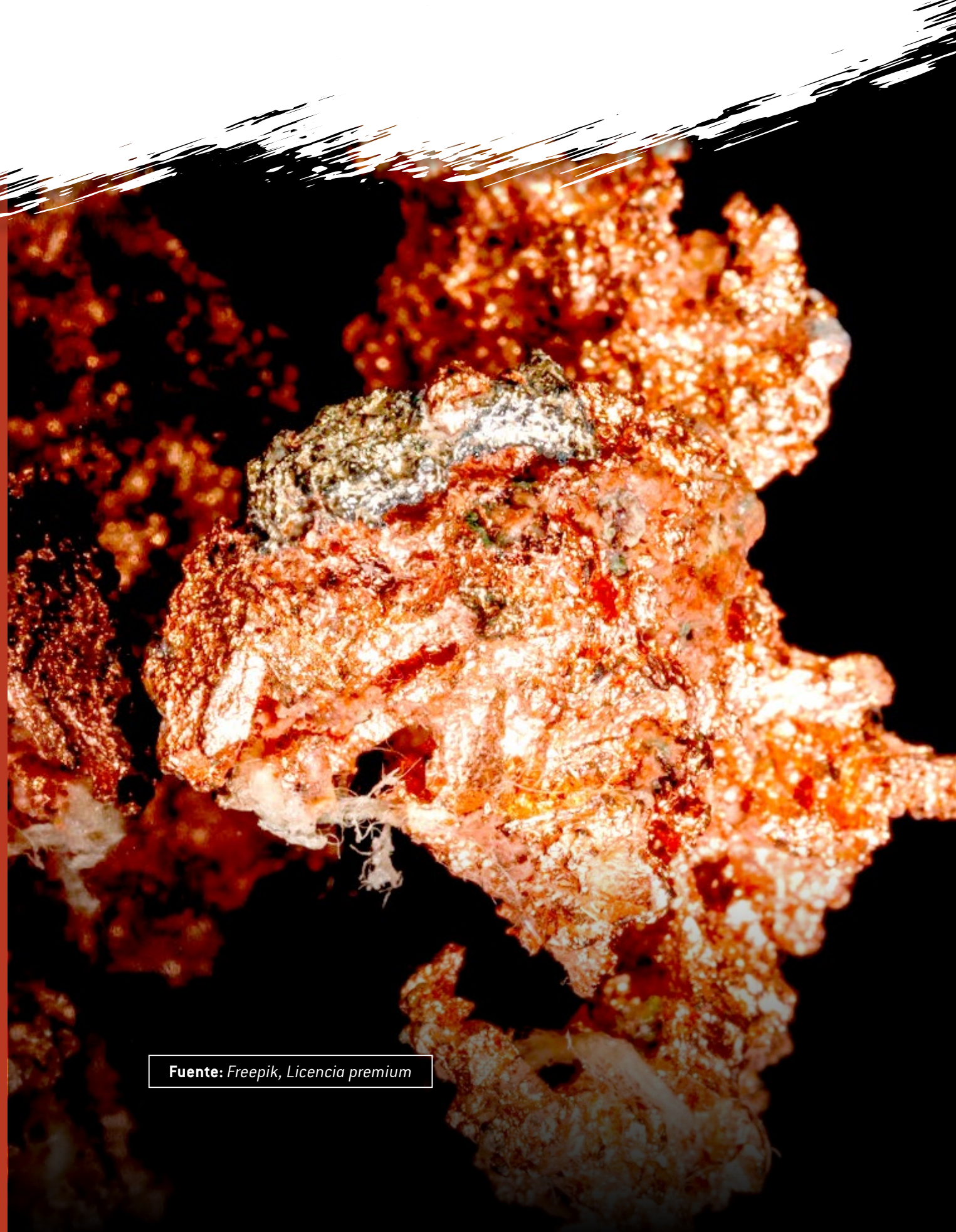
La consultoría se realiza con el fin de establecer los lineamientos técnicos a seguir en los procesos de beneficio y transformación del cobre, para lo cual se evaluó integralmente la información recopilada, identificando y seleccionando las buenas prácticas y técnicas disponibles a nivel internacional, que fueran aplicables al sector minero colombiano.

Para el efecto, se definieron inicialmente las Líneas Estratégicas, que permiten ejecutar de manera adecuada cada proceso que se lleva a cabo al momento no solo de beneficiar y transformar el mineral de cobre, sino también los procesos anteriores que se realizan, como la extracción del mineral y posteriores como el seguimiento, medición y control del mineral.

El documento contiene una primera parte relacionada con el marco conceptual para la elaboración de la propuesta de lineamientos técnicos, que incluye una descripción de la minería del cobre en el mundo y en Colombia, la normatividad vigente y las buenas prácticas transversales a los procesos de beneficio y transformación del cobre, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Posteriormente se presenta la estructuración y desarrollo de los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas relacionadas con el beneficio y transformación del cobre, donde se describen en detalle los componentes y alcances de cada lineamiento.

Los lineamientos técnicos de política de buenas prácticas que son propuestos recogen la experiencia de empresas internacionales de talla mundial que adelantan labores de minería en varios países latinoamericanos, lo que servirá de herramienta para que la comunidad minera pueda adoptar a su propio ejercicio dichas prácticas y su resultado se pueda ver reflejado en el aumento de la productividad de la actividad minera de cobre, donde además se apliquen igualmente buenas prácticas durante su operación que coadyuven a controlar de forma efectiva el impacto de esas actividades sobre el medioambiente y las comunidades.

Fuente: Freepik, Licencia premium



CONTENIDO



**RESUMEN Y DESCRIPCIÓN
DEL PROYECTO**



MINERÍA DE COBRE



CONCLUSIONES



METODOLOGÍA GENERAL



**BENEFICIO
Y TRANSFORMACIÓN
DEL COBRE**



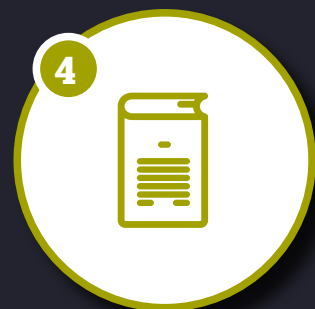
BIBLIOGRAFÍA



MARCO NORMATIVO



**GESTIÓN AMBIENTAL EN EL
BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN
DEL COBRE**



GLOSARIO



LINEAMIENTOS



01

**RESUMEN Y
DESCRIPCIÓN
DEL PROYECTO**



Resumen y descripción del proyecto

El Ministerio de Minas y Energía a través de la Dirección de Minería Empresarial presenta la cartilla de Lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos de la actividad minera relacionados con el beneficio y transformación de cobre, acorde con las buenas prácticas internacionales, la cual fue desarrollada en el marco del Contrato de Consultoría GGC-631-2022 celebrado con ATG Ltda.

Los lineamientos propuestos buscan presentar directrices y orientaciones claras que sean la base en la planeación, desarrollo del beneficio y la transformación del mineral de cobre en el país, entendiendo que este mineral es clave para la transición energética y representa una oportunidad económica para Colombia.

Las expectativas frente a este panorama se concentran en el incremento de la participación del país en el mercado del cobre, abriendo la posibilidad de crear encadenamientos productivos de gran impacto alrededor de la minería de este metal. El desarrollo de este tipo de proyectos requiere la incorporación de buenas prácticas en los procesos técnicos de beneficio y transformación, en donde se garantice la apropiada interacción de las operaciones con su entorno a nivel técnico, ambiental y social.

La aplicación de buenas prácticas en la actividad minera derivará en el desarrollo sostenible del sector, por ello, es fundamental que los procesos de beneficio y transformación de cobre, sean realizados con las mejores técnicas disponibles, promoviendo el uso eficiente de los recursos y en armonía con el medio ambiente, así como también mediante la innovación y aplicación tecnológica que permita lograr eficiencia en el seguimiento y control de los procesos operativos y de las variables ambientales relacionadas con la actividad minera.

Los lineamientos propuestos buscan presentar directrices y orientaciones claras que sean la base en la planeación y desarrollo del beneficio y la transformación del mineral de cobre en el país.

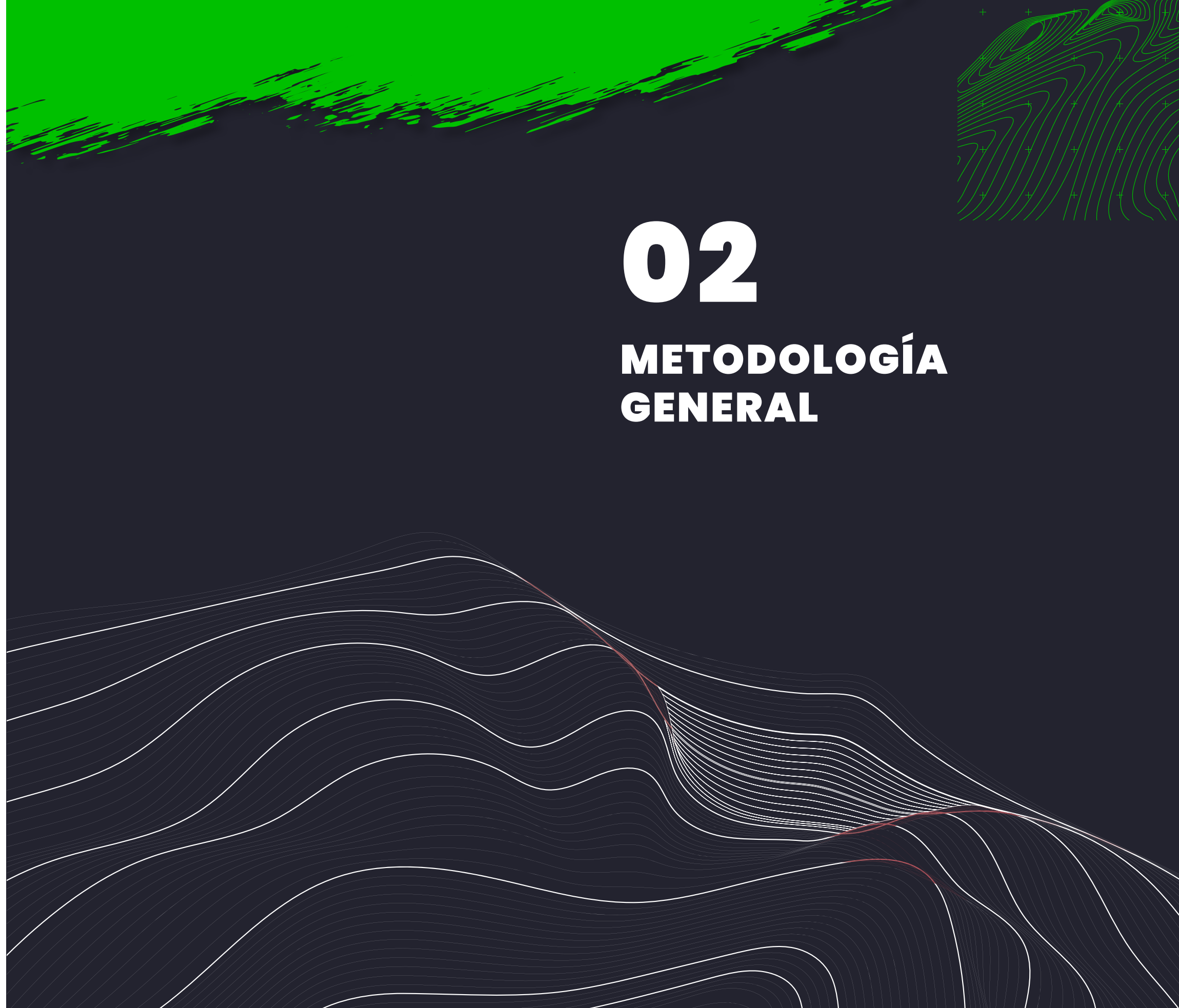
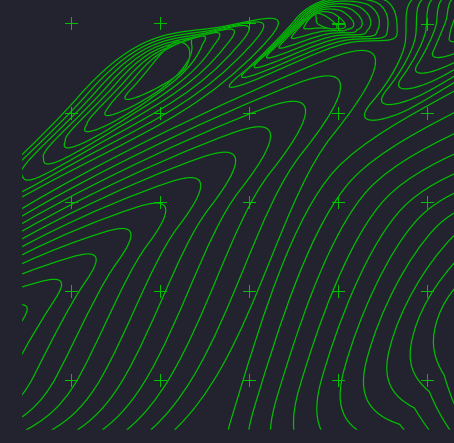


Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó. Fuente: ATG Ltda., 2022.



02

METODOLOGÍA GENERAL



La construcción de los lineamientos fue realizada por un equipo interdisciplinario de profesionales con formación en ingeniería de minas, metalurgia, procesos y ambiental, empleando para ello el método heurístico de análisis, abordando y evaluando integralmente la información recopilada, identificando y seleccionando conceptos, criterios, directrices, buenas prácticas y técnicas disponibles a nivel internacional, teniendo en cuenta las particularidades del territorio y sector minero colombiano.

El análisis e interpretación de información secundaria se realizó a partir de la recopilación y revisión de libros, informes, directrices, revistas, guías, estándares, artículos, tesis, páginas web,

entre otros documentos de carácter internacional y nacional. Por otro lado, la información primaria fue obtenida en el desarrollo de reuniones y eventos de socialización adelantados con diferentes actores del sector minero colombiano para la ejecución del proyecto extrayendo conclusiones y aspectos relevantes abordados para el beneficio y transformación del cobre.

A partir de dicha información se realizó la validación de procesos y procedimientos, identificación de estándares, que fueron incorporados en la propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos asociados al beneficio y transformación del cobre.

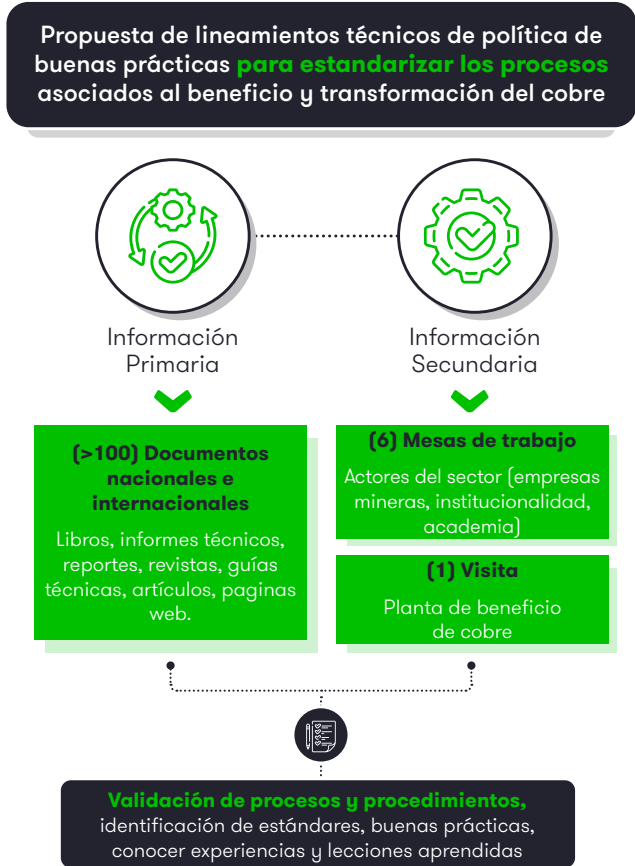


Figura 1
Construcción propuesta de lineamientos
Fuente: ATG Ltda., 2022.

¿Qué es un lineamiento?

“El lineamiento es una orientación de carácter general, corresponde a una disposición o directriz que debe ser implementada en las entidades del Estado colombiano” (Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones, 2015, párr. 06).

¿Cómo es la estructura metodológica de los lineamientos?

A partir del conocimiento y definición de Línea Estratégica (objetivos, conceptos y acciones), y del significado de *Lineamiento* (orientación, disposición, directriz), se formularon interrogantes sobre los procesos de beneficio y transformación del cobre, los cuales se resolvieron paso a paso, partiendo de

la creación de lineamientos, los cuales fueron desarrollados mediante el planteamiento de Componentes (subproceso o actividad necesaria para realizar el lineamiento), Alcance (propósito y limitación del componente), Información Requerida (¿Qué se necesita para desarrollar o conocer el componente?) y Actividad (¿cómo lograr construir la información requerida para satisfacer el componente y por ende el lineamiento planteado?).

En síntesis, los lineamientos se estructuraron a partir de componentes, que corresponden a la información que se requiere conocer para su aplicación. Para cada componente se estable un alcance, y unas actividades específicas que permitirán su desarrollo, lo que en conjunto estructura lineamientos sólidos y consistentes que dan respuesta a necesidades y requerimientos para cada Línea Estratégica.



Fuente: Freepik, Licencia premium

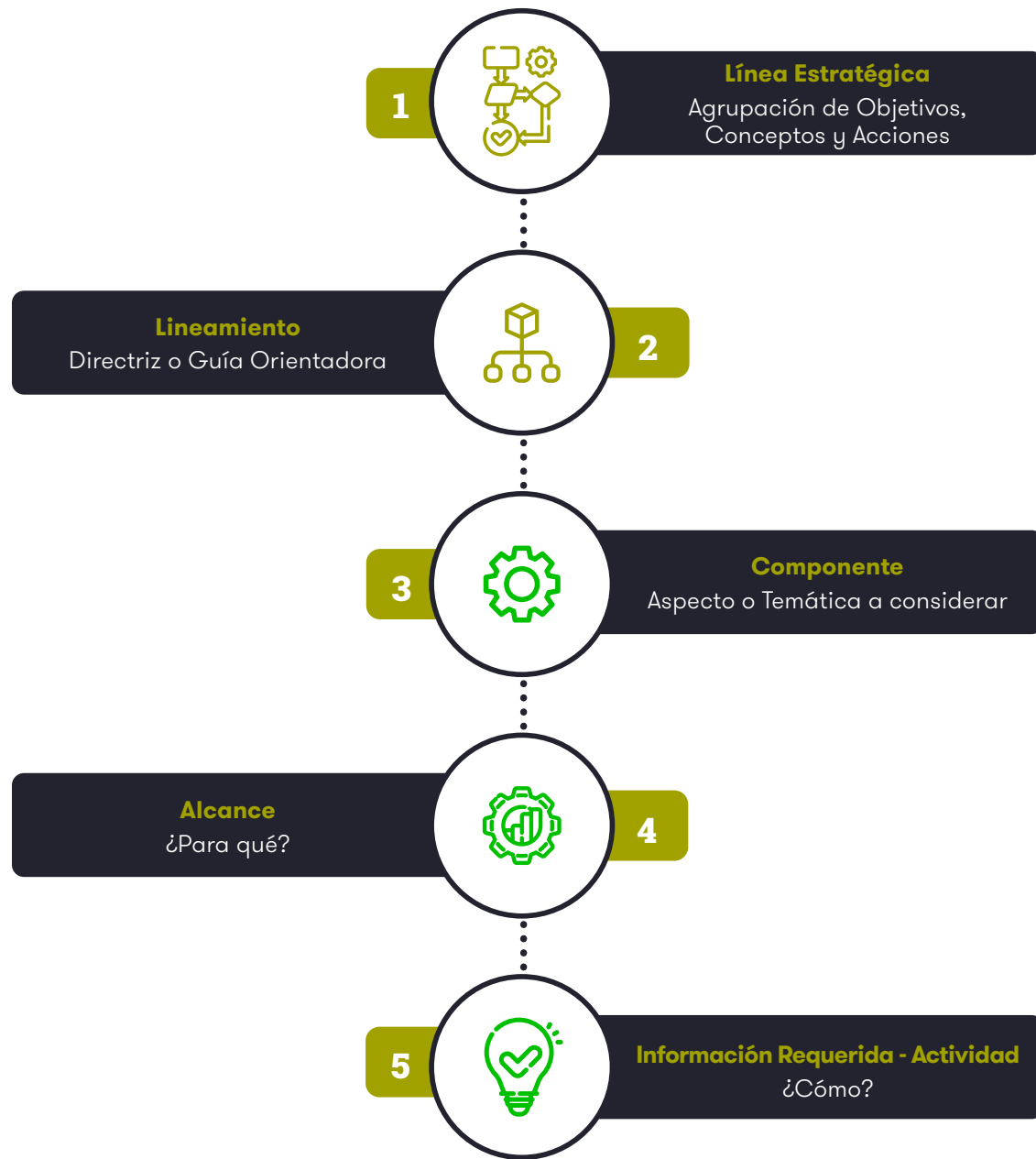


Figura 2
Estructura metodológica de lineamientos.
Fuente: ATG Ltda., 2022.



Líneas Estratégicas

Se establecieron ocho **8 Líneas Estratégicas** que permiten agrupar los lineamientos, respecto a la concepción, diseño, planificación y desarrollo de procesos de beneficio y transformación del

cobre, contando también con líneas estratégicas transversales que agrupan directrices encaminadas a lograr una operación eficiente en la planta y un manejo ambiental responsable, como lo son la aplicación de Economía Circular y el seguimiento, medición y control de procesos.



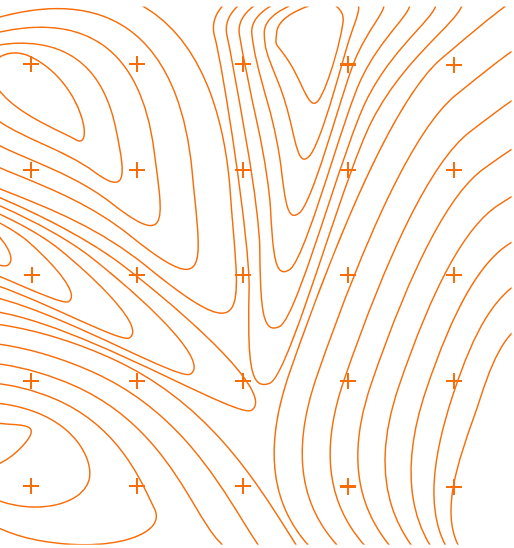
Figura 3
Líneas estratégicas para el beneficio y transformación del mineral de cobre en Colombia.
Fuente: ATG Ltda., (2022).



03

**MARCO
NORMATIVO**





Marco Normativo

Es importante incorporar un contexto jurídico basado en normativas particulares de carácter minero y ambiental aplicables para los denominados minerales estratégicos como el cobre y otros minerales.

Mediante el **CONPES 4075 de 2022**, se establece la **Política de Transición Energética**. En ella se plantean “lineamientos y estrategias para incrementar la seguridad energética, incentivar el conocimiento y la innovación en transición energética, generar mayor competitividad y desarrollo económico desde el sector energético y desarrollar un sistema energético con bajas emisiones” (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022 p. 12).

El objetivo general de la citada política es “consolidar el proceso de transición energética del país a través de la formulación e implementación de acciones y estrategias intersectoriales que fomenten el crecimiento económico, energético, tecnológico, ambiental y social del país con el fin de avanzar hacia su transformación energética” (DNP, 2022, p.60).

De otra parte, conforme a lo establecido en el artículo 20 de la Ley 1753 de 2015 las Áreas de Reserva para el Desarrollo Minero son las siguientes:

- Áreas de Reserva Estratégica Mineras.
- Áreas de Reserva para la formalización.

- Áreas de Reserva para el desarrollo minero-energético.

Las áreas estratégicas mineras creadas con base en el artículo 108 de la Ley 1450 de 2011 (Reservas Mineras Estratégicas) mantienen su vigencia, pero se sujetarán al régimen previsto en el mencionado artículo, el cual se mantiene vigente en virtud de lo dispuesto en la Ley 1955 de 2019 [artículo 336].

La Agencia Nacional de Minería ha realizado los procedimientos establecidos por la Corte Constitucional de Consulta Previa y obtención del consentimiento previo, libre e informado de las comunidades étnicas que habiten en las zonas de interés (Sentencia T-766 de 2015); como también, articulación con las autoridades locales que tienen jurisdicción en los territorios donde se encuentran los polígonos para declarar y delimitar las nuevas áreas de reserva estratégica minera.

La prioridad de estas áreas consiste en que una vez estén delimitadas y declaradas, sobre ellas no se podrán recibir nuevas propuestas ni suscribir nuevos contratos de concesión regidos por la Ley 685 de 2001.

Mediante Acuerdo No. 002 del 2 de marzo de 2021, el Consejo Directivo de la Agencia Nacional de Mine-

ría definió los términos de referencia para la adjudicación de Contratos Especiales de Exploración y Explotación de Minerales en Áreas de Reserva Estratégica Minera que incluye la minuta de los Contratos Especiales de Exploración y Explotación para los procesos de selección objetiva en dichas áreas.

Con fundamento en el mencionado acuerdo, mediante Resolución ANM No. 150 del 18 de marzo de 2021, se adoptan los Términos de Referencia para seleccionar la(s) propuesta(s) más favorable(s) para la adjudicación de Contratos Especiales de Exploración y Explotación de Minerales en Áreas de Reserva Estratégica Minera para mineral de cobre y polimetálicos”, la cual incluye la minuta del contrato.

Por último, en el marco para el desarrollo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia, se lleva a cabo la Estrategia para la implementación de los Objetivos en Colombia a partir del **CONPES 3918 de 2018**, que traza indicadores y metas encaminadas a consolidar un modelo de desarrollo sostenible para el país con un horizonte a 2030.

De esta manera, genera una hoja de ruta para cada una de las metas establecidas, incluyendo indicadores, entidades responsables y los recursos requeridos para llevarlas a buen término hacia el desarrollo sostenible. Sin embargo, esta política no establece medios de implementación para el cumplimiento de las metas nacionales y, por lo tanto, el CONPES 3934 de 2018, Política de Crecimiento Verde (DNP, 2018), se hace necesaria para la definición de acciones estratégicas que permitan la consecución de un crecimiento económico, ambiental y social (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

De esta manera, genera una hoja de ruta para cada una de las metas establecidas, incluyendo indicadores, entidades responsables y los recursos requeridos para llevarlas a buen término hacia el desarrollo sostenible.

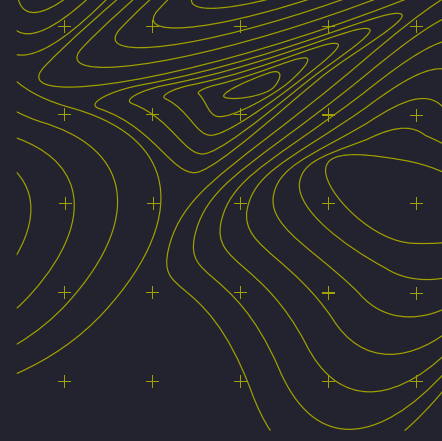
Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó. Fuente: ATG Ltda., 2022.





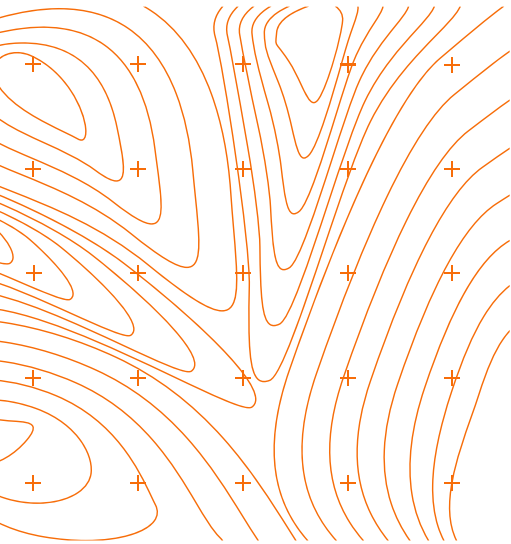
04

GLOSARIO





Glosario

**Ánodos:**

Placas metálicas de cobre o plomo que se instalan en la celda electrolítica por las cuales entra la corriente eléctrica (carga positiva). En la electrorrefinación los ánodos son placas gruesas de cobre producto de la etapa de fundición, los cuales se someten a refinación mediante electrólisis, en la cual todo el cobre que los constituye se disuelve y se deposita en el cátodo de cobre puro, que es un producto de alta pureza, y las impurezas que contiene (metales nobles como oro, plata, etc.) quedan depositadas en el fondo de la celda en la forma de barro anódico. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. párr.20].

Barro anódico (Anodic bar)/ Lodo anódico:

Los barros anódicos son los componentes del ánodo que no se disuelven y se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas. El barro anódico está formado por metales tales como oro, plata, selenio, platino y paladio, por lo que constituye un subproducto valorizado. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c.].

Beneficio de los minerales:

El beneficio de los minerales consiste en el proceso de separación, molienda, trituración, lavado, concentración y otras operaciones similares, a que se somete el mineral extraído para su posterior utilización o transformación. [Resolución 40599, 2015, p.13].

Biolixiviación:

La biolixiviación es una técnica que disuelve metales en un medio acuoso, a través de bacterias (thiobacillus ferrooxidans) que liberan cobre en mayor cantidad que con métodos convencionales. Estas bacterias o microorganismos se alimentan principalmente de arsénico y azufre, dos impurezas que hay que extraer del mineral para producir cobre. Es decir, las bacterias pueden oxidar el azufre a ácido sulfúrico y el arsénico a una especie que es inofensiva para el ser humano. En esto radica la diferencia con respecto a los hornos de fundición, los que expulsan vapor de azufre y arsénico a la atmósfera que deben ser depurados mediante sistemas o chimeneas de alto costo. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)b].

Caracterización mineralógica:

Análisis que permite conocer los diferentes minerales que entran a la fase de beneficio. [Resolución 40599, 2015, p.16].

Cátodos de cobre:

placas de cobre de alta pureza que se obtienen en el proceso de electrorrefinación y de electroobtención. Estos cátodos también se llaman cátodos de cobre electrolítico de alta pureza y tienen una concentración de 99,9%. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. párr.50].

Cobre (Copper):

Es un metal anaranjado brillante, rojizo, notable por un conjunto de propiedades que lo hacen extraordinariamente útil y conveniente para una diversidad de usos. El nombre cobre viene de la isla de Chipre, donde se encontraba una de las minas más antiguas de este metal. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. párr.65].

Cobre blíster:

Cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refinación y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electrorrefinación. Su nombre proviene del aspecto que tienen los productos moldeados en su superficie (blíster = ampolla). [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. párr.62].

Cobre de alta pureza (High Grade Copper):

Tiene una alta conductividad eléctrica y se utiliza en la fabricación de conductores eléctricos, especialmente en conductores de diámetros pequeños. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c. párr.63].

Concentración (beneficio):

Operación unitaria en la cual se busca eliminar el 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 (diferencia de densidad, atracción de campos

magnéticos, eléctricos) o físico químicas de los minerales. [Resolución 40599, 2015, p.21]

Concentrado:

Es el producto enriquecido de las operaciones de concentración de minerales. [Resolución 40599, 2015, p.21].

Conminución:

Serie de operaciones unitarias durante las cuales un mineral es sometido a reducción de tamaño mediante trituración y molienda. [Resolución 40599, 2015, p.21].

Conversión:

Proceso de purificación, destinado a eliminar el azufre y el hierro de los sulfuros que forman parte del eje del cobre. [Resolución 40599, 2015, p.22]

Copper Mark:

Es un marco de garantía integral que promueve prácticas de producción responsable y demuestra la contribución de la industria a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas. Es el primer y único marco desarrollado específicamente para la industria del cobre. [Freeport – McMoRan, s.f.].

Economía Circular:

Sistemas de producción y consumo que promuevan la eficiencia en el uso de materiales, agua y la energía, teniendo en cuenta la capacidad de recuperación de los ecosistemas, el uso circular de los flujos de materiales a través la implementación de la innovación tecnológica, alianzas y colaboraciones entre actores, y el impulso de modelos de negocio que responden a los fundamentos del desarrollo sostenible. [Estrategia Nacional de Economía Circular, 2019, p.75].

Electrólisis (Separación):

Es el proceso en el cual una corriente eléctrica es pasada a través de una solución que contiene metales disueltos, y hace que el metal se deposite en el cátodo. [Resolución 40599, 2015, p.29].



**Electrorrefinación:**

Proceso de refinación de un material metálico mediante la aplicación de corriente eléctrica. [Resolución 40599, 2015, p.29].

En esta fase los ánodos, también conocidos como cobre blíster, obtenidos en la Fundición se transforman en cátodos de cobre de 99,99% de concentración. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c.párr.121].

Electroobtención:

[Electrowinning, EW] Proceso electrometalúrgico donde se disponen alternadamente un ánodo y un cátodo, dentro de una solución electrolítica previamente concentrada. El proceso se realiza mediante la aplicación de una corriente eléctrica de baja intensidad, la cual provoca que los cationes de Cu sean atraídos hacia el cátodo y se depositen sobre éste en forma metálica. [Consejo Minero, 2002, p.69].

Escoria:

Masa vítrea de baja densidad resultante de los procesos de fusión y refinación de metales, que contiene la mayor parte de las impurezas de la materia prima. [Resolución 40599, 2015, p.30].

Extracción por solvente:

[Solvent Extraction, SX] Método de separación de una o más sustancias de una mezcla, mediante el uso de solventes. En el proceso de extracción del cobre, la resina orgánica permite capturar el cobre en solución, dejando las impurezas, tales como el hierro, aluminio, manganeso y otros en la solución original. La solución orgánica cargada con cobre es separada en otro estanque, donde se la pone en contacto con electrolito que tiene una alta acidez, lo cual provoca que la resina suelte el cobre y se transfiera a la solución electrolítica, la cual es enviada finalmente a la planta de electroobtención. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c.párr.144].

Flotación:

Proceso de concentración mediante el cual las partículas de un mineral son inducidas a adherirse a las burbujas creadas por un agente espumante presen-

te en la pulpa, que las hace flotar. La Flotación bulk recupera todas las especies valiosas (oro, plomo, plata, cinc, cobre, etc.) en un solo producto llamado concentrado bulk, por ejemplo, concentrado de plata - plomo - oro - cobre, concentrado de plata - plomo. [Resolución 40599, 2015, p.35].

Fundición:

Proceso pirometalúrgico mediante el cual un metal es llevado del estado sólido al líquido [Resolución 40599, 2015, p.36].

Hidrometalurgia:

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 [Resolución 40599, 2015, p.39].

Lixiviación (beneficio):

Proceso hidrometalúrgico 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. [Resolución 40599, 2015, p.44].

Matte-Mata:

Mezcla bruta de sulfuros fundidos formada como un producto intermedio de la fundición de minerales de sulfuro de metales, especialmente cobre, níquel y plomo. En lugar de fundirse directamente en metal, los minerales de cobre generalmente se funden en Matte, preferiblemente con un contenido de cobre de 40 a 45 por ciento junto con hierro y azufre. [Britannica, s.f., párr.1]

Molienda:

Operación de reducción de tamaño de un mineral realizada posteriormente a la trituración; puede ser de tipo primario o secundario según el tamaño requerido del producto. [Resolución 40599, 2015, p.51].

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS):

Son la agenda global de desarrollo aprobada el 25 de septiembre de 2015 en el marco de la Asamblea General de las Naciones Unidas, con el objetivo de promover

la sostenibilidad ambiental, la erradicación de la pobreza y la inclusión social, la prosperidad económica y la paz. Son 17 objetivos asociados a 169 metas que fueron adoptados por las partes firmantes. Cada país ha definido compromisos concretos alrededor de los ODS para alcanzar las metas propuestas a 2030. [Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2015].

Óxidos de cobre:

Se originan en la descomposición y oxidación de los minerales sulfurados. Pero esto, no significa que no sean valiosos o útiles; de hecho, fueron los primeros tipos de cobres en ser explotados por los seres humanos. Estos óxidos de cobre se pueden encontrar en minerales tales como: malaquita, azurita, crisocola, cuprita y brochantita. Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO, [2017].

Reciclable:

Característica de un producto, empaque o componente que puede ser separado de la corriente de desechos, recolectado, procesado y retornado para usarse en forma de materia prima o producto. [Estrategia Nacional de Economía Circular, 2019, p.75].

Reutilización:

La prolongación de la vida útil de los materiales recuperados que se vuelven a utilizar sin que se requiera un proceso de transformación previo. [Estrategia Nacional de Economía Circular, 2019, p.75].

Refinación electrolítica de cobre:

Es un proceso de disolución electroquímica del cobre desde el ánodo, depositando el cobre como un metal casi puro en el cátodo por medio de electrolisis directa; la tecnología básica de refinación de cobre tiene muchos años, pero en estos últimos se han desarrollado importantes cambios, gran parte de estos se han incorporado en el rediseño de la actual planta. [Vargas Olivares, 2010, p.50].

Relave:

Desecho de los procesos de beneficio y transformación del mineral compuesto por una fase sólida, líquida y gaseosa; que dependiendo de sus caracte-

rísticas físicas y químicas debe someterse a diferentes tratamientos para su transporte y posterior disposición en presas, depósitos, o uso a través de alternativas de economía circular como: retrolleno de labores subterráneas, producción de postes, bloques, cemento, entre otros. [Ministerio de Minas y Energía, 2020].

Ripios:

[Tails] Se refiere al material que queda como residuo del mineral una vez que todo el cobre ha sido lixiviado, el cual es desechado en áreas especiales o botaderos de ripios. Corresponde a la cola del proceso de lixiviación. [Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.)c.].

Sulfuros de cobre:

Los sulfuros de cobre corresponden a minerales de sulfuro con azufre, cobre y, en algunos casos, otros elementos. Para efectos geo-minero-metalúrgicos se subdividen en dos grupos: sulfuros primarios y sulfuros secundarios, los criterios para esta clasificación hacen referencia a la formación geológica de estos minerales. Los sulfuros primarios se forman a mayores profundidades en ambientes reductores, mientras que los segundos, se forman cercanos a la superficie al entrar en contacto con el oxígeno. Comisión Chilena del Cobre - COCHILCO, [2017].

Transformación minera:

1. 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.
2. De acuerdo con el Código de Minas, es la modificación mecánica o química del mineral extraído y beneficiado, a través de un proceso industrial del cual resulte un producto diferente no identificable con el mineral en su estado natural [Resolución 40599, 2015, p.68].

Trituración:

Reducción inicial del tamaño del mineral hasta un grado que permita su molienda. [Resolución 40599, 2015, p.72].





Trituración primaria:

Proceso por el cual el mineral es triturado entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{6}$ de su tamaño original, en preparación a la siguiente etapa de reducción (segunda o tercera etapa de trituración o circuito de molienda). (Resolución 40599, 2015, p.72).

Trituración primaria, secundaria y terciaria:

Etapas en las que se realiza la trituración o la reducción de tamaño de las rocas y los minerales con el fin de reducir los costos de energía; la reducción en una sola etapa incurre en mayores gastos energéticos. Convencionalmente denominadas trituración gruesa, media y fina (primaria, secundaria y terciaria). (Resolución 40599, 2015, p.72)

Trituración selectiva:

Proceso que consiste en evitar triturar excesivamente las partículas que ya han alcanzado el tamaño deseado. Lo que se consigue cribando o tamizando previamente el material triturado. En carbones, la trituración selectiva consiste en la separación de los tamaños menores de 3 mm, y se llevan a molienda los tamaños mayores. (Resolución 40599, 2015, p.72).

Uso eficiente de recursos:

Cantidad óptima de materiales, energía o agua para producir o distribuir un producto o empaque. (Estrategia Nacional de Economía Circular, 2019, p.75).

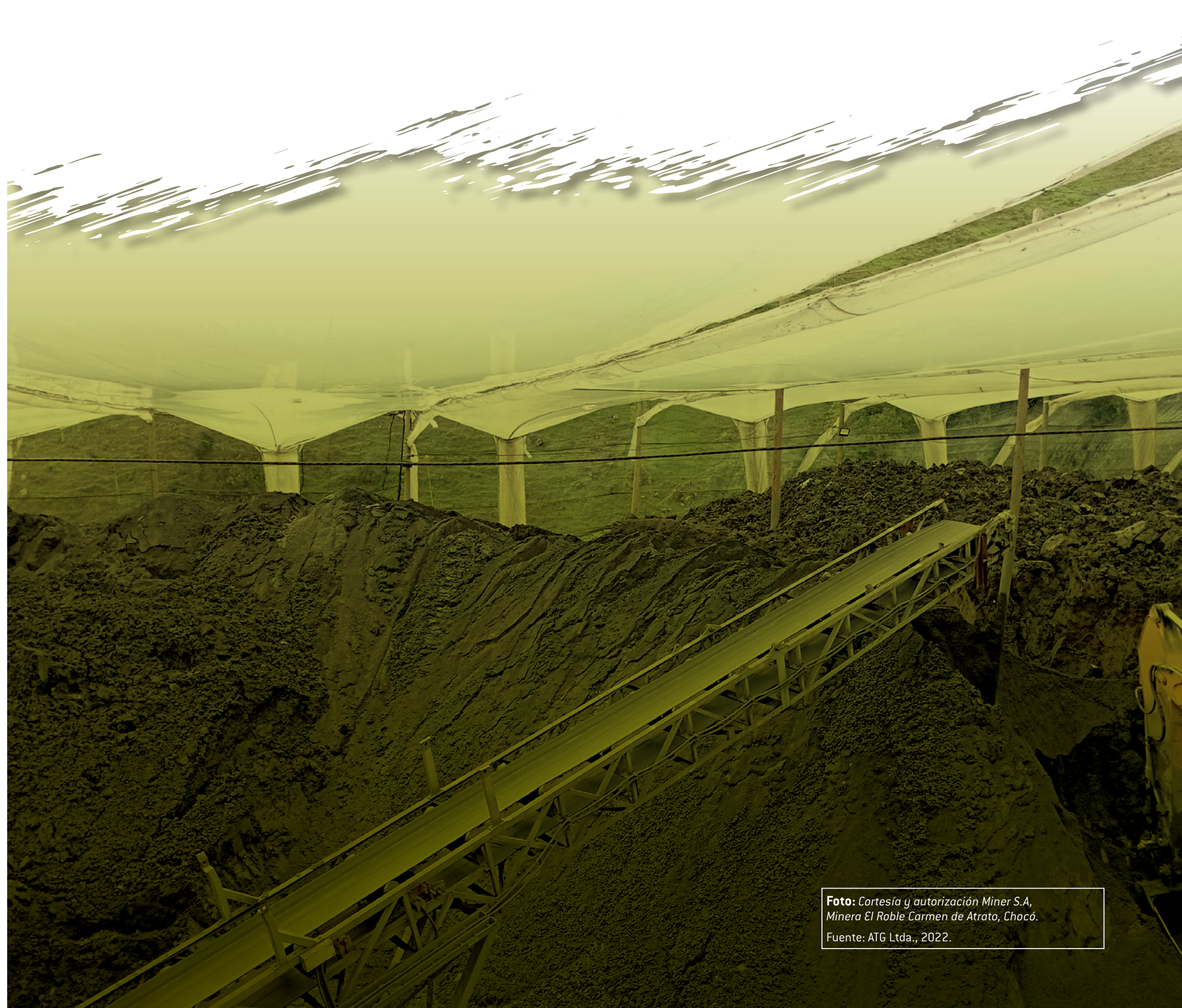
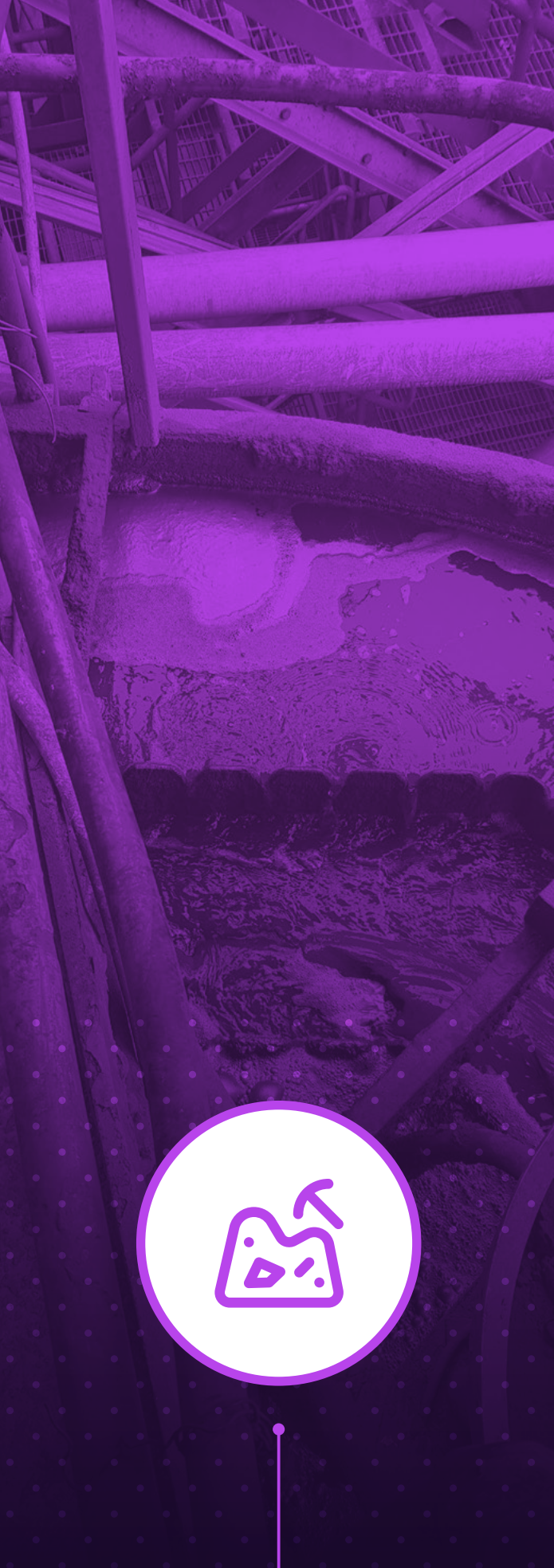


Foto: Cortesía y autorización Miner S.A,
Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
Fuente: ATG Ltda., 2022.



05

**MINERÍA
DE COBRE**



Minería de cobre en el mundo

Los recursos de cobre se presentan en forma de minerales de sulfuro alrededor del 90% y minerales de óxido alrededor del 10%, según Pietrzyk & Tora (2018). Las minas de cobre actualmente operadas a nivel mundial, luchan con una serie de problemas y barreras, comenzando con el agotamiento de los minerales de calidad y la necesidad de extraer depósitos cada vez más profundos y terminando con las crecientes expectativas de los gobiernos, los numerosos requerimientos de las autoridades reguladoras y las posiciones en contra de la actividad minera por parte de las comunidades locales.

Según un artículo publicado por Tecnología Minera (2022), **el mercado del cobre a nivel mundial ha estado en aumento debido a una fuerte actividad manufacturera global y a la creciente demanda de vehículos eléctricos**, la necesidad de disminuir las emisiones de gases efecto invernadero, la transformación energética, el incremento en la industria eólica, en la industria energética solar, etc. A continuación, y de manera sucinta, se relacionan los 10 mayores productores de cobre en el mundo, según el artículo publicado por Tecnología Minera (2022), destacándose algunos países latinoamericanos.

Las minas de cobre actualmente operadas a nivel mundial, luchan con una serie de problemas y barreras, comenzando con el agotamiento de los minerales de calidad.

01: Chile

Chile lidera la liga de países productores de cobre. Sus minas más grandes incluyen Escondida, Collahuasi, El Teniente, Chuquibambilla y Los Pelambres.

02: Perú

Perú es el segundo productor más grande de cobre, representando el 12% de la producción mundial con aproximadamente 2,46 millones de toneladas métricas (García y Pantigoso, 2020). En noviembre de 2022 mostró un crecimiento de 15.3%, debido al desempeño de las mineras Antamina, Cerro Verde y Southern Perú. (Ministerio de Minas y Energía Perú, 2022).

Fuente: Freepik, Licencia premium



03: China

La producción de cobre refinado de China totalizó 10,49 millones de tm en 2021, un 7,4 % más que el año anterior, según datos de la Oficina Nacional de Estadísticas.

04: República Democrática del Congo

El cobre refinado es un mercado de exportación de \$4.060 millones, mientras que el mineral de cobre (\$544 millones) y el cobre crudo (\$249 millones), también son sectores clave.

05: Australia

Australia es el tercer mayor exportador de mineral de cobre del mundo, disfruta de una participación del 7,1 % en un mercado anual valorado en \$64.200 millones.

06: Estados Unidos

Las exportaciones de cobre en Estados Unidos aumentaron a US\$829,92mn en enero, frente a los US\$746,62mn de diciembre de 2021.

07: Zambia

El cobre alcanzó un máximo de 720.000 toneladas en la década de 1970, pero ha ido en declive progresivo y se pronostica un crecimiento promedio del 2,2 % durante 2012-2030, según Fitch Solutions.

08: Rusia

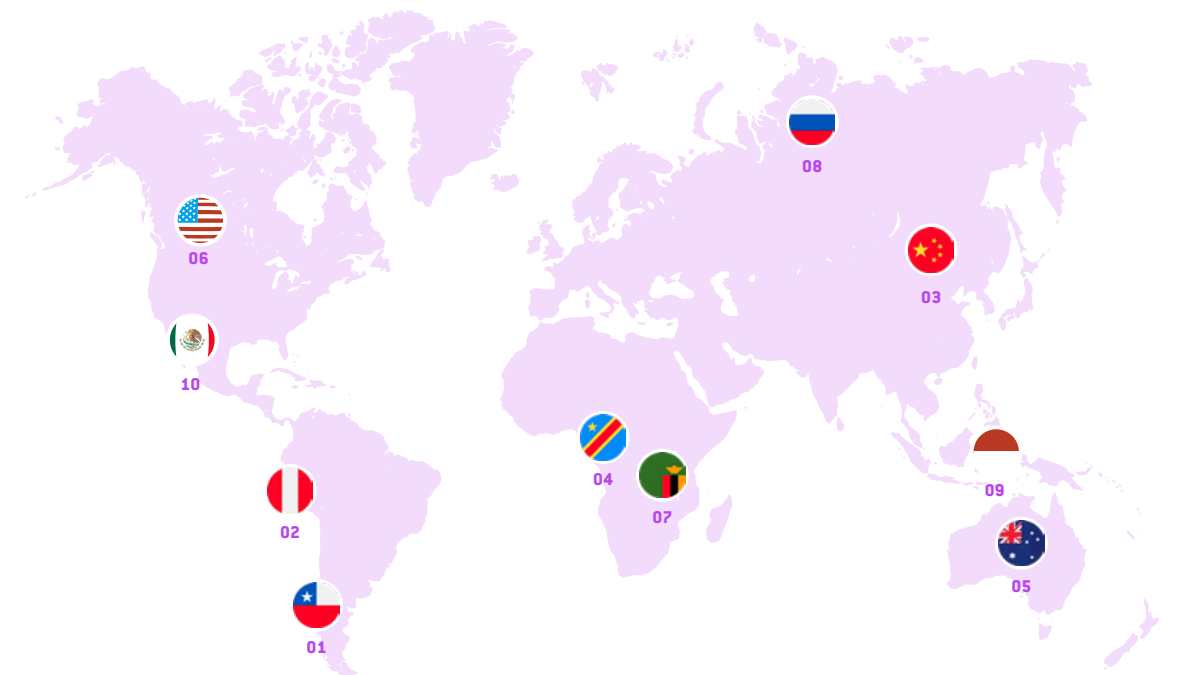
Ocupa el octavo lugar en la liga de productores de cobre, su producción se estimó en 820.000 toneladas métricas en 2021.

09: Indonesia

La producción de cobre para 2023 se estima en alrededor de 1.600 millones de libras (725.748 toneladas). El país está considerando implementar prohibición a las exportaciones de concentrados de cobre.

10: México

En el año 2021, México produjo 732.863 toneladas de cobre, mostrando una disminución de 4,6 % frente a las 768.542 de 2020, informó CAMIMEX.





Minería de cobre en Colombia

En la actualidad, la única empresa que produce concentrado de cobre en Colombia es la canadiense Ático Mining con el complejo El Roble, ubicado en El Carmen de Atrato (Chocó). **La operación es subterránea de mediana escala y el metal es considerado de alta calidad.**

A nivel exploratorio y a la espera de resoluciones minero-ambientales, existen empresas multinacionales interesadas en explotar y beneficiar cobre en Colombia. Destacándose los siguientes proyectos: Proyecto de Exploración Quebradona (AngloGold Ashanti, s.f) ubicado en el municipio de Jericó en

el departamento de Antioquia; Proyecto de Exploración Soto Norte (Autoridad Nacional de Licencias Ambientales [ANLA], 2022) ubicado en la parte oriental del macizo de Santander en la cordillera de los Andes; Proyecto Mocoa (FAusIMM, M. R., P.Geo., R. S., & FAusIMM, B. D., 2022) ubicado en la Cordillera Oriental en el departamento del Putumayo y el Proyecto de Exploración San Matías (Nordmin Engineering Ltd, 2022) ubicado en el municipio de Puerto Libertador, departamento de Córdoba.

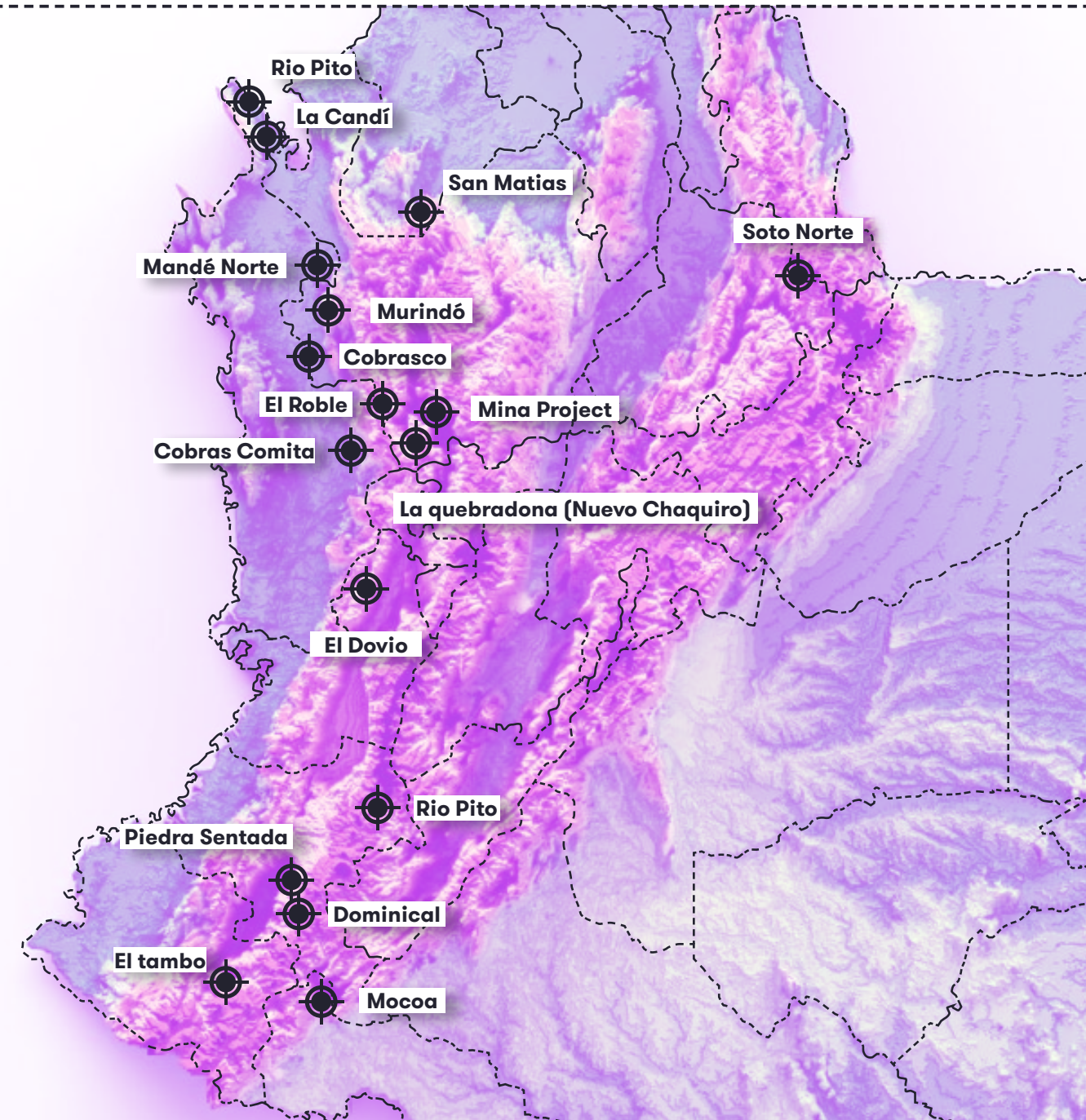
Para el año 2022, en resumen, Colombia tiene un (1) proyecto en explotación - cobre mineral principal, un (1) proyecto en explotación - cobre mineral secundario, siete (7) proyectos en exploración - cobre mineral principal y ocho (8) proyectos en exploración - cobre mineral secundario.

Ítem	Municipio	Proyecto	Etapa
1	El Carmen De Atrato	El Roble	Explotación - Mineral Principal
2	Buriticá	Buriticá	Explotación - Mineral Secundario
3	Bagadó	Bagadó	Exploración - Mineral Principal
4	El Dovio	El Dovio	
5	Mocoa	Mocoa Minerales	
6	Murindó	Murindó (Mandé Norte)	
7	Dabeiba	Pantanos	
	Frontino		
8	Jericó	Quebradona	
9	Puerto Libertador	San Matías	Exploración - Mineral Secundario
10	Titiribí	Titiribí	
11	Quibdó	Volador	
12	Andes	Andes	
13	Venecia	La Mina	
	Fredonia		
14	Amalfi	Otu Centro	
	Zaragoza		
	Segovia		
15	Pácora	San Antonio	
16	Anzá	Guintar- Niverengo- Margaritas	Exploración Temprana - Mineral Secundario
17	Quinchía	Miraflores	

Figura 4

Ubicación de proyectos y prospectos para mineral de cobre en Colombia.

Fuente: UPME., 2021.





06

BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE





1

2

3

4

Los procesos de beneficio y transformación del cobre se realizan según la mineralogía del material que permite determinar si se presenta como óxidos de cobre o como sulfuros de cobre, los primeros se transforman por la vía de la hidrometalurgia y los segundos principalmente por la vía

pirometalúrgica y en algunos casos, de sulfuros secundarios por vía hidrometalúrgica. El beneficio del mineral inicia en el proceso de conminución, con la trituración, en la cual el mineral es reducido hasta alcanzar el tamaño esperado. El cobre sulfurado, continúa reduciendo su tamaño en la

molienda, para luego ser concentrado en la etapa de flotación resultando en concentrado de cobre, que será transformado y purificado en la fundición obteniendo ánodos de cobre que luego se someterán a electrorrefinación para conseguir cobre de alta pureza en forma de cátodos. En el caso de los

óxidos de cobre, por lo general luego de la trituración se procede a desarrollar el proceso de lixiviación y de concentración mediante extracción por solventes, para lograr por último una disolución selectiva mediante electroobtención, alcanzando cátodos de cobre.



Fuente: Freepik, Licencia premium

Buenas prácticas procesos de explotación

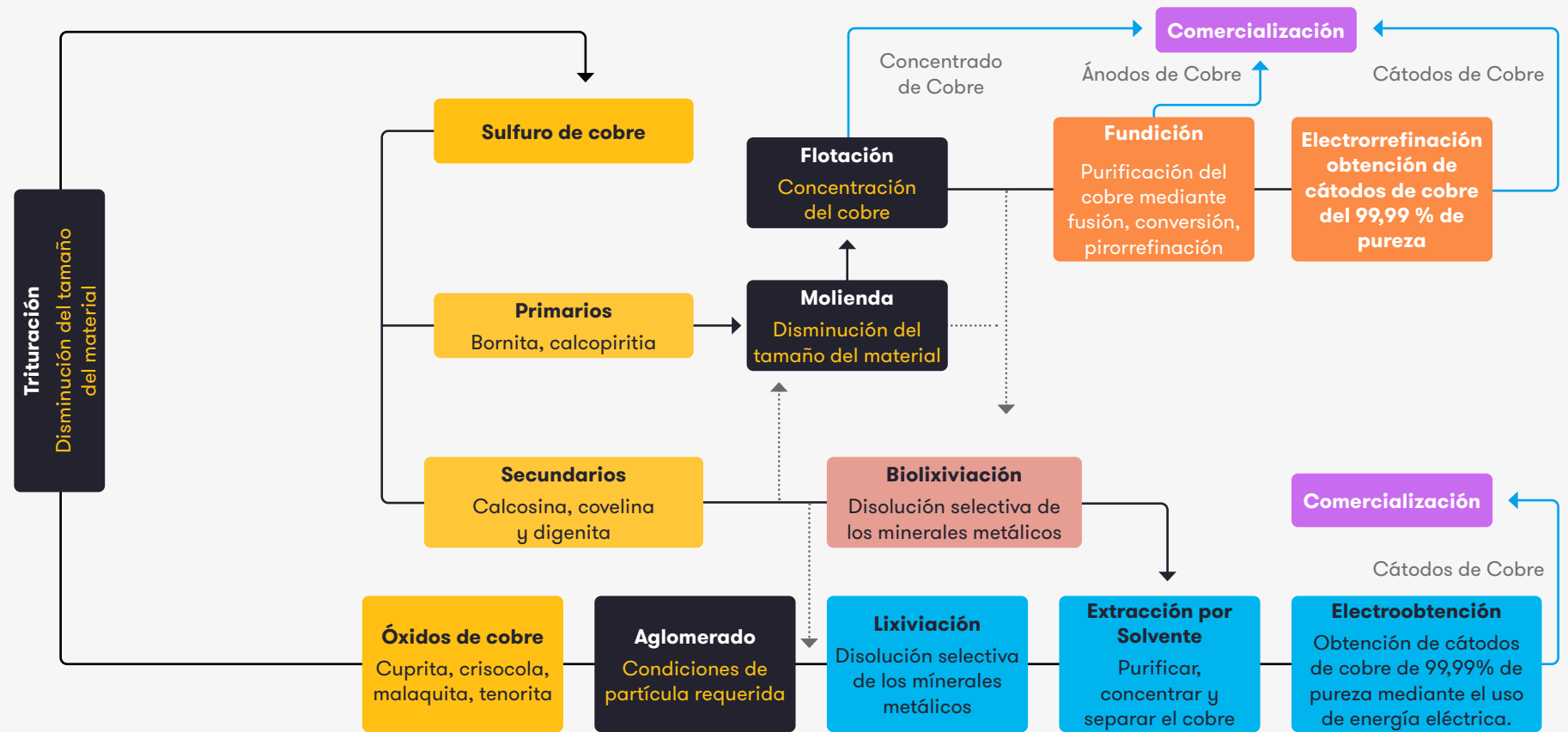


Figura 5 Procesos de beneficio y transformación del cobre. Fuente: ATG Ltda., 2022.





07

GESTIÓN AMBIENTAL EN EL BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE



En el proceso de beneficio y transformación del cobre se identifican de manera genérica los **componentes hidrológico, suelo y atmosférico** pertenecientes al medio abiótico, como los de mayor afectación, debido a los lixiviados, residuos y gases que se generan en los procesos de

trituration, molienda, flotación, fundición y los mecanismos químicos de separación tales como lixiviación y/o biolixiviación. A continuación, se presentan los principales impactos identificados para los procesos de beneficio y transformación del cobre.

Impactos Procesos	Medio Abiótico					
	Componente Atmosférico		Componente Hidrológico		Componente Suelo	
	Alteración a la calidad del aire	Alteración en los niveles de presión sonora	Alteración en la calidad del recurso hídrico superficial y/o subterráneo	Alteración en la oferta del recurso hídrico superficial y/o subterráneo	Alteración a la calidad del suelo	Incremento de la generación de residuos sólidos
Beneficio del mineral de cobre						
Trituración	⊗	⊗		⊗		
Beneficio del sulfuro de cobre						
Molienda	⊗	⊗		⊗		
Flotación (concentración)			⊗	⊗	⊗	⊗
Transformación de sulfuros de cobre						
Secado de concentrado	⊗	⊗				
Fundición	⊗	⊗				⊗
Electrorrefinación			⊗	⊗		⊗
Transformación de Óxidos y algunos sulfuros de cobre						
Lixiviación			⊗	⊗	⊗	
Extracción por solvente			⊗	⊗	⊗	
Electroobtención			⊗	⊗		
Biolixiviación			⊗	⊗		

Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) son la agenda global de desarrollo aprobada el 25 de septiembre de 2015 en el marco de la Asamblea General de las Naciones Unidas, con el objetivo de promover la sostenibilidad ambiental, la erradicación de la pobreza y la inclusión social, la prosperidad económica y la paz. Son 17 objetivos asociados a 169 metas que fueron adoptados por las partes firmantes. Cada país ha definido compromisos concretos alrededor de los ODS para alcanzar las metas propuestas a 2030. (Naciones Unidas, 2015).

En el atlas de la **"Cartografía de la minería en relación con los objetivos de desarrollo sostenible del**

Centro de Inversión Sostenible de la Universidad de Columbia [CCSI], elaborado en el 2016, se exponen las relaciones entre la minería y los ODS mediante el uso de ejemplos de buenas prácticas del sector y el aprovechamiento de los conocimientos y recursos existentes.

En los procesos de beneficio y transformación del cobre se pueden desarrollar buenas prácticas que contribuyan al logro de los **ODS principalmente enfocados a los siguientes objetivos: ODS 6 (agua limpia y saneamiento), ODS 7 (energía asequible y no contaminante), ODS 13 (acción por el clima), ODS 12 (producción y consumo responsables)**. A continuación, se ejemplifican prácticas desde el beneficio y transformación del cobre que contribuyen a alcanzar los ODS.

Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS	6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE	12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES	13 ACCIÓN POR EL CLIMA
Buenas prácticas procesos de beneficio del mineral de cobre				
Trituración	X Cuantificación de entradas y salidas de agua para determinar su potencial de reúso y/o reciclaje	X Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético Ej. Molino SAG	X Establecer indicadores que permitan determinar consumo de recursos para formular estrategias de mejora y uso eficiente	-
			X Manejo de material particulado generado en la conminución del material, para evitar impacto a la calidad del aire.	



Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS	6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE	12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES	13 ACCIÓN POR EL CLIMA
Buenas prácticas procesos de beneficio de sulfuros de cobre				
Molienda	X Cuantificación de entradas y salidas de agua para determinar su potencial de reúso y/o reciclaje	X Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético Ej. Molino SAG	X Establecer indicadores que permitan determinar consumo de recursos para formular estrategias de mejora y uso eficiente X Manejo de material particulado generado en la conminución del material, para evitar impacto a la calidad del aire.	-
	X Implementar sistemas de tratamiento que permitan la recirculación y/o vertimiento de agua cumpliendo con la calidad requerida en cada actividad	X Diseño de circuitos de flotación eficientes, que disminuyan el consumo energético	X Realizar recirculación de agua para el funcionamiento de los procesos, o desarrollo de actividades secundarias de la operación.	-
X Identificación de reactivos que puedan ser reutilizados, e impliquen facilidad en su manejo, tratamiento y disposición	X Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización, Ej. Relaves filtrados para procesos de retrolleado de la mina.		-	



Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS	6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE	12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES	13 ACCIÓN POR EL CLIMA
Buenas prácticas procesos de transformación de sulfuros de cobre				
Secado de concentrado	X Reúso de vapor de agua proveniente de los procesos de fundición	X Implementación de tecnologías que disminuyan el consumo energético	X Recuperación de partículas de concentrado de cobre en suspensión	-
			X Recuperación de condensados Vapor de agua condensado	
Fundición	X Reúso de vapor de agua	X Control del flujo eléctrico a los hornos de fundición para evitar ineficiencias	X Recuperación y reúso de metal blanco y escoria	X Recuperación de gases primarios para la producción de ácido sulfúrico en planta de limpieza de gases
Electrorrefinación	X Reúso de soluciones	X Establecer indicadores de consumo de energía por tonelada de cátodo para realizar ajustes en la eficiencia del sistema de celdas, espaciamiento entre los electrodos.	X Reciclaje de ánodos	-
			X Recuperación de metales preciosos del lodo anódico	-



Objetivo de Desarrollo Sostenible - ODS	6 AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO	7 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE	12 PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES	13 ACCIÓN POR EL CLIMA
Buenas prácticas procesos de transformación de óxidos de cobre y algunos sulfuros de cobre				
Lixiviación				
Extracción por solvente	X Recuperación de agua	X Se deben estimar los requerimientos eléctricos para el proceso debido al alto consumo de corriente para las celdas de electroobtención	X Recuperación y reúso de ácidos, solventes y soluciones X Recuperación de metales preciosos del lodo anódico	-
Electroobtención				
Buenas prácticas procesos de transformación de sulfuros secundarios y óxidos de cobre				
Biolixivación	X Recuperación y tratamiento de aguas ácidas	-	-	X Disminución en las emisiones de gases como SO ₂ y arsénico

Fuente: ATG Ltda., 2022.



Foto: Cortesía y autorización Miner S.A., Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
Fuente: ATG Ltda., 2022.

08

LINEAMIENTOS

L = Lineamiento

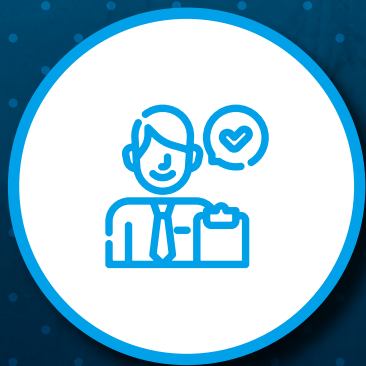


• Componentes de un mismo lineamiento

A = Alcance



• Alcances de un mismo lineamiento





Se elaboraron un total de **veintiún (21) Lineamientos formulados para las Líneas Estratégicas definidas**. En cada Lineamiento se desarrollan los Componentes, Alcances e Información necesaria para su aplicación.



Línea Estratégica	
1	Caracterización inicial
2	Planificación y diseño de los procesos de beneficio y transformación de cobre
3	Desarrollo de procesos para el beneficio del mineral de cobre
4	Desarrollo de procesos para la transformación pirometalúrgica del mineral de cobre sulfurado



Fuente: Freepik, Licencia premium



Número de Lineamiento	Lineamiento	Lineamientos & componentes
1	Caracterización mineralógica, química y física inicial	L1 pág 54
2	Identificar la ley de cobre y minerales asociados del material explotado	L2 pág 55
3	Realizar estudio metalúrgico	L3 pág 58
4	Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio de cobre	L4 pág 63 A B C D
5	Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre	L5 pág 68 A B
6	Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre	L6 pág 74 A B C D E F
7	Trituración del mineral	L7 pág 92 A B
8	Molienda del mineral	L8 pág 94
9	Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado	L9 pág 97 A B
10	Desarrollo del proceso de fundición	L10 pág 102 A B C D E
11	Desarrollo del proceso de electrorrefinación	L11 pág 108



Se elaboraron un total de **veintiún (21) Lineamientos formulados para las Líneas Estratégicas definidas**. En cada Lineamiento se desarrollan los Componentes, Alcances e Información necesaria para su aplicación.



Línea Estratégica



5

Desarrollo de procesos para la **transformación hidrometalúrgica** del mineral de cobre oxidado

6

Desarrollo de procesos para la **transformación por biolixiviación** del mineral de cobre

7

Seguimiento, medición y control

8

Economía Circular en los procesos de **beneficio y transformación del cobre**

Fuente: Freepik, Licencia premium

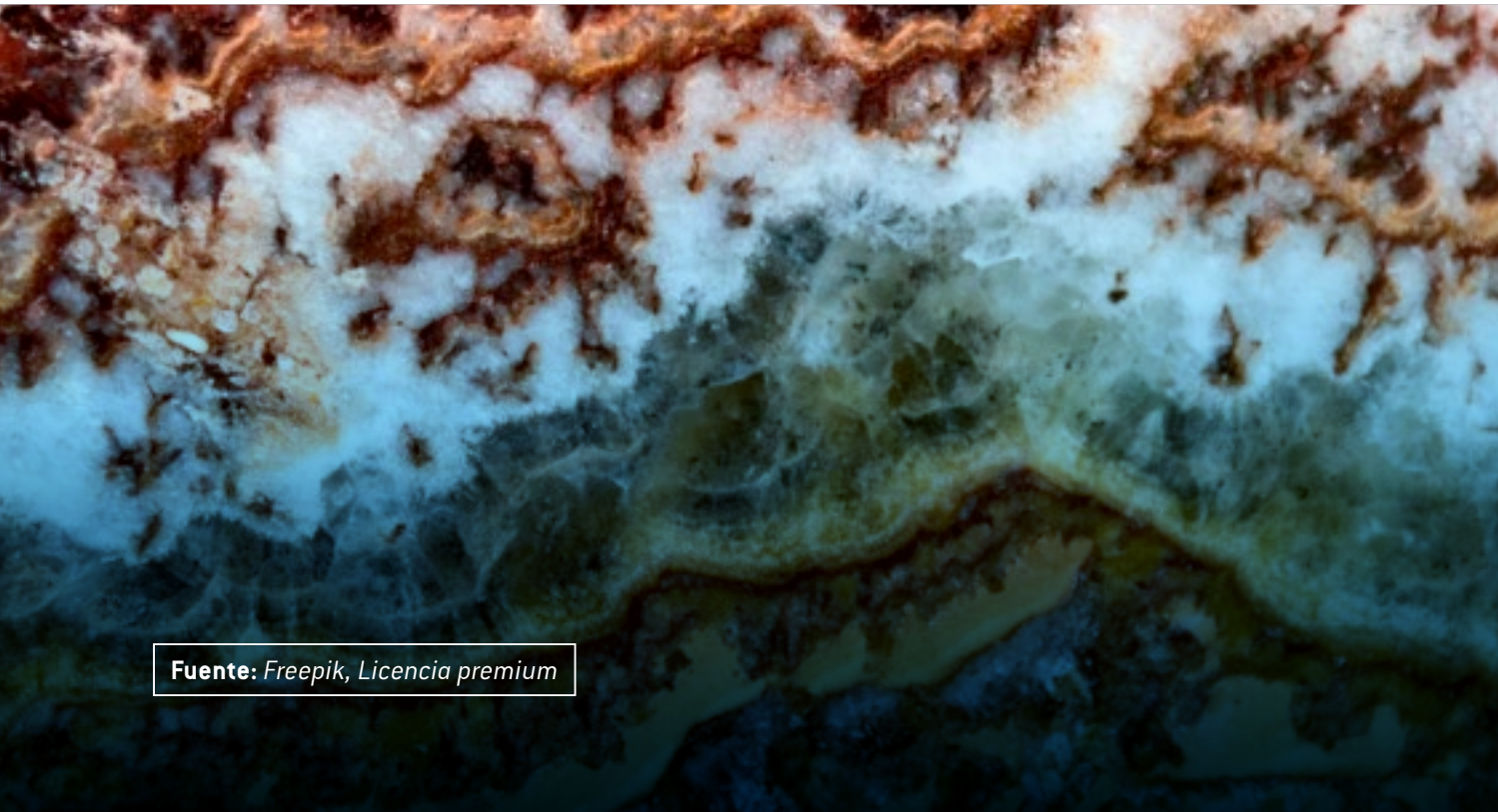


Número de Lineamiento	Lineamiento	Lineamientos & componentes
12	Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre	L12 pág 112 A B C
13	Consideraciones operacionales de la extracción por solventes	L13 pág 120
14	Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención	L14 pág 123 A B
15	Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación	L15 pág 130 A
16	Seguimiento y control a la ley de cobre del material explotado	L16 pág 136 A B C D E
17	Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta	L17 pág 138 A B C
18	Realizar el mantenimiento a los equipos e instalaciones de la planta	L18 pág 144 A B
19	Seguimiento y control ambiental	L19 pág 146 A B
20	Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre	L20 pág 152 A B
21	Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre	L21 pág 157 A B C

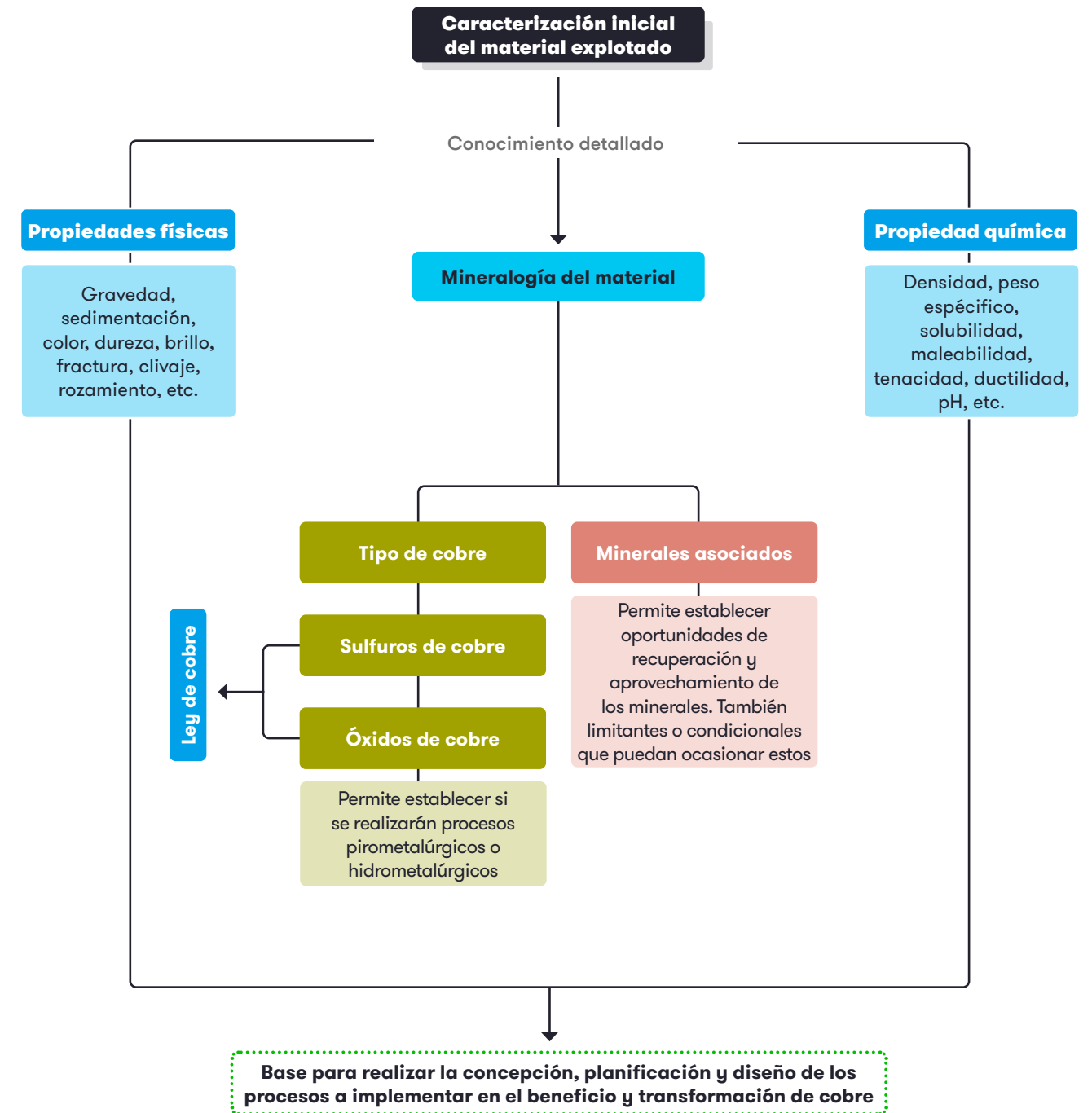


El conocimiento de las propiedades físicas y químicas de los minerales, resulta de vital importancia para determinar su génesis y características particulares, siendo la base de concepción de la

planta de beneficio y transformación según el tipo de mineral de cobre identificado (Sulfuro u óxido de cobre) para plantear procesos pirometalúrgicos o hidrometalúrgicos.



Fuente: Freepik, Licencia premium



Fuente: ATG Ltda., 2022.



1 Línea Estratégica
CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL



Lineamiento No. 1

Realizar la caracterización mineralógica, química y física inicial



➤ **Componente**

Tipo de minerales y concentración del material a beneficiar y transformar.



➤ **Alcance**

Identificar las especies minerales presentes en la mena y la ganga.



➤ **Información requerida**

- a. Composición de los minerales.
- b. Concentraciones del material mineralizado.
- c. Propiedades físicas del mineral.
- d. Propiedades químicas del mineral.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. **Análisis mineralógico:** Identificar las especies de mineral y ganga que se encuentren en el material.
- b. **Preparación de la muestra pulverizada para el análisis químico:** Moler la muestra a una granulometría acorde con el análisis a realizar.
- c. **Realizar análisis químico:** Determinar los minerales que hay en la muestra con la utilización de equipos como el difractor de rayos X; por medio de QEMSCAN Bulk modal Analysis, por el microanálisis de sonda electrónica y el microscopio electrónico de barrido.



1 Línea Estratégica
CARACTERIZACIÓN DEL MINERAL



Lineamiento No. 2

Identificar la ley de cobre y minerales asociados del material explotado



➤ **Componente**

Establecer la concentración de cobre y minerales asociados.



➤ **Alcance**

Realizar el análisis químico del material mineralizado que permita establecer la concentración de cobre y minerales asociados.



➤ **Información requerida**

- a. Identificar las especies minerales presentes en la mena.
- b. Análisis químico para cada una de las especies minerales.
- c. Tipo de mineralización de los compuestos a analizar.
- d. Cuantificar y diferenciar óxidos y sulfuros.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. **Usar las diferentes técnicas para el análisis químico de la muestra:** Preparación y evaluación de la muestra por fluorescencia de rayos X, difractor de rayos (XRD), electrofotometría de absorción atómica y microscopía electrónica.
- b. **Mezclar muestras para mejorar concentración:** Realizar mezclas para mejorar concentración de los minerales analizados, con el fin de establecer a qué proceso de beneficio y transformación deben someterse.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8



Línea Estratégica PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

Esta línea estratégica busca definir los aspectos y parámetros de diseño de la planta de beneficio y transformación del cobre, a través de la planificación basada en el análisis y evaluación técnica de

las variables y consideraciones de cada proceso. Un diseño detallado y riguroso que contemple la optimización de recursos, representará eficiencia y productividad en la posterior operación de la planta.



Estudio Metalúrgico Comprende el desarrollo de pruebas, simulaciones, planta y procesos piloto, que son la base para la selección de equipos, diseño y planificación de los procesos de beneficio y transformación	Procesos pirometalúrgicos (Sulfuros de cobre)	Flotación (Concentración) Tamaño de la partícula, flotabilidad, consumo de reactivos, mezcla de agentes, concentraciones y densidades, propiedades hidrofílicas, etc.	Fundición Temperatura, porcentaje de recuperación, flujo de oxígeno, cantidad de fundente, generación de residuos, calidad del ánodo	Electro-refinación Características de las celdas, condiciones del electrolito, densidad de corriente del cátodo, calidad del cátodo
	Procesos hidrometalúrgicos (Óxidos de cobre)	Lixiviación Tamaño de partícula del componente sólido, tiempo de lixiviación, concentrado del mineral y agente lixivante, temperatura, velocidad de agitación, etc.	Extracción por solventes (líquido-líquido) Concentración del cobre y reactivos en la fase orgánica y acuosa, caudal de flujo de las etapas, Volumen de los reactivos en la solución, pH, temperatura, etc.	Electroobtención Concentración de cobre, y cobalto, temperatura del electrolito, densidad de corriente, peso cátodos, dosificación, voltaje del sistema, tipo de cátodo y ánodo, espacios entre celdas y flujo de alimentación de celda., etc.
		Biolixivación Temperatura, pH, presión, disponibilidad de nutrientes y oxígeno, concentración de hierro (Fe), presencia de inhibidores, diversidad biológica, superficie a utilizar, etc		

Fuente: ATG Ltda., 2022.





2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A **Lineamiento No. 3**
 Realizar estudio metalúrgico



➤ **Componente 1**

Procesos pirometalúrgicos para el beneficio y transformación de sulfuros de cobre.



➤ **Alcance**

Identificar las variables pirometalúrgicas que se integran al beneficio y transformación de los sulfuros de cobre.



➤ **Información requerida**

- a. Tamaño de partícula de mineral.
- b. Porcentaje de humedad del concentrado de sulfuros.
- c. Variables de diseño.
- d. Temperatura.
- e. Porcentaje de recuperación.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Realizar pruebas físico químicas de laboratorio (flotabilidad, consumo de reactivos, mezcla de agentes, concentraciones y densidades).
- b. Efectuar pruebas pirometalúrgicas de variables de diseño y de temperatura.
- c. Fusionar los concentrados de sulfuro, tostados parcialmente o sin tostar, con la adición de fundentes.
- d. Pruebas de fundición y porcentaje de recuperación.
- e. Simular los procesos pirometalúrgicos mediante programas que ayuden a diseñar las condiciones de operación, seleccionar los equipos adecuados y definir parámetros operativos.
- f. Crear una planta piloto o un banco de pruebas para realizar validaciones de datos operacionales, por medio de ensayos en las variables críticas con el fin de optimizar y perfilar el escalamiento de los procesos de beneficio y transformación.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B **Lineamiento No. 3**
 Realizar estudio metalúrgico



➤ **Componente 2**

Procesos hidrometalúrgicos para el beneficio y transformación de óxidos de cobre.



➤ **Alcance**

Identificar las variables hidrometalúrgicas que se integran al beneficio y transformación de los óxidos de cobre.




➤ **Información requerida**

- a. **Variables del procesos de lixiviación:** tamaño de partícula del componente sólido, tiempo de lixiviación, concentración del producto de interés en el mineral, concentración del agente lixivante, velocidad de agitación y temperatura de lixiviación.
- b. **Variables que afectan el proceso de extracción por solvente [líquido - líquido]:** pH, concentración del extractante y relación entre lo orgánico y lo acuoso.
- c. **Variables del proceso de electroobtención:** concentración de cobre, concentración de cobalto, temperatura del electrolito para la alimentación de la celda, densidad de corriente, peso de los cátodos, dosificación y flujo de alimentación de la celda.
- d. Las reservas y la calidad del cobre que puede ser extraído del yacimiento.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B  **Lineamiento No. 3**
 Realizar estudio metalúrgico




➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Determinar la ubicación de la planta de beneficio y transformación de acuerdo con la dimensión de los equipos, la circulación del personal, salas de control, cercanía con la operación minera y método de transformación, poniendo énfasis en la seguridad de los trabajadores y los riesgos ambientales de cada operación unitaria.
- b. Análisis químico de las concentraciones de mineral para establecer si se cumple con los requerimientos de suministro adecuados para la planta de beneficio y transformación. Esto se logra a través de pruebas como la difracción de rayos X, fluorescencia por rayos X y espectroscopia de absorción atómica.
- c. En caso de contar con diferentes concentraciones, realizar la mezcla del material para garantizar que la ley del mineral de cobre cumpla con especificaciones técnicas.
- d. Realizar simulación del proceso hidrometalúrgico mediante la modelización matemática para ratificar el planeamiento operacional y el control de las variables en planta.
- e. Hacer banco de pruebas para corroborar los parámetros metalúrgicos claves que afectan la lixiviación del cobre.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

C  **Lineamiento No. 3**
 Realizar estudio metalúrgico



➤ **Componente 3**

Procesos hidrometalúrgicos a través de la biolixiviación para el beneficio y transformación de óxidos y sulfuros de cobre.



➤ **Alcance**

Identificar las variables hidrometalúrgicas que se integrarán al beneficio y transformación de algunos de los óxidos y sulfuros de cobre.



➤ **Información requerida**

- a. Identificar los factores físicos y químicos necesarios para el proceso: temperatura, pH, presión, disponibilidad de nutrientes y oxígeno, concentración de Fe y presencia de inhibidores.
- b. Conocer los factores biológicos como diversidad microbiana, densidad de población, actividades microbianas, distribución espacial de los microorganismos, adaptación de los microorganismos y concentración del inóculo.
- c. Composición y granulometría del mineral a biolixiviar.
- d. Determinar el área de superficie a utilizar y el consumo de ácido
- e. Identificar interacciones hidrófobas galvánicas, porosidad y formación de minerales secundarios.
- f. Definir la densidad de pulpa debido básicamente a que al aumentar la concentración de sólidos aumenta la fricción entre las partículas en el interior de la suspensión, lo que puede causar un daño celular.
- g. Velocidad de aireación, encargada del suministro tanto de O₂ y CO₂ al sistema de lixiviación, ya que las bacterias de lixiviación son aeróbicas.
- h. Tiempo de residencia.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

C **Lineamiento No. 3**
 Realizar estudio metalúrgico



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Pruebas físicas de granulometría del mineral.
- b. Pruebas químicas de laboratorio de análisis de nutrientes para conservar en el tiempo los microorganismos.
- c. Controlar la diseminación de minerales mediante pruebas de análisis de liberación del mineral.
- d. Suministrar O₂ y CO₂ al sistema de lixiviación, ya que las bacterias de lixiviación son aeróbicas.
- e. Pruebas hidrometalúrgicas de columnas bacterianas variando la temperatura.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A **Lineamiento No. 4**
 Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre



➤ **Componente 1**

Establecer la composición del material a triturar.



➤ **Alcance**

Definir la composición del material en cuanto al contenido de minerales y propiedades físicas.



➤ **Información requerida**

- a. Análisis granulométrico y mineralógico.
- b. Estudios metalúrgicos.
- c. Características físico-mecánicas del material.








➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Identificar el tipo del mineral a procesar mediante pruebas metalúrgicas, para determinar el grado de conminución necesario y obtener una liberación del mineral más eficiente.
- b. Establecer las características físicas y químicas del mineral para determinar el efecto del mineral en el equipo de trituración.
- c. Elaborar la gráfica de granulometría y calcular los coeficientes de uniformidad y curvatura.
- d. Estudiar las propiedades mecánicas de la roca mineralizada para determinar su resistencia a la compresión, tensión, flexión e impacto y penetración por otro cuerpo.
- e. Determinar el porcentaje de finos y el contenido de humedad del material.




2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE





B  **Lineamiento No. 4**
 Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre

-  **Componente 2**
 Selección del tipo y tamaño de los equipos de trituración.
-  **Alcance**
 Estudiar las diferentes alternativas de equipos, para establecer el esquema eficiente de trituración de la planta concentradora.
-  **Información requerida**
 - a. Volumen de material o tonelaje a triturar.
 - b. Tamaño de alimentación.
 - c. Tamaño del producto de salida.
 - d. Dureza de la roca matriz.
 - e. Tenacidad de la roca a triturar
 - f. Abrasividad.
-  **Actividades a desarrollar**
 - a. Identificar el porcentaje de minerales y condiciones físicas y químicas del material a triturar, con base en la información de la composición del material obtenida en su caracterización.
 - b. Definir los criterios operativos, técnicos, costos de inversión y ambientales como son, el costo de capital estimado por cada equipo, costo de operación (incluyendo el mantenimiento), riesgos de operación, seguridad, salud y los impactos que el equipo elegido puede generar sobre el ambiente.
 - c. Analizar la operatividad del equipo dentro del circuito (horas de operación, tonelaje tratado, etc.) y evaluar el medio triturante.
 - d. Analizar las variables operacionales de entrada y salida en el proceso de trituración, como son el tipo de mineral, flujo de mineral, potencia, nivel de tolvas y la granulometría requerida para las etapas de trituración y subsiguientes.
 - e. Conocer tablas de selección sobre las aplicaciones de las trituradoras para obtener información indicativa de las dimensiones, capacidades, producción, abertura de alimentación, anchura de descarga, consumo de energía, costos de mantenimiento y eficiencia.




2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE


C  **Lineamiento No. 4**
 Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre

-  **Componente 3**
 Definir tipo molienda (convencional / no convencional).
-  **Alcance**
 Seleccionar el molino acorde a la etapa de molienda implementada, buscando la eficiencia del proceso.
-  **Información requerida**
 - a. Velocidad Crítica.
 - b. Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
 - c. Tamaño máximo de los elementos moledores.
 - d. Volumen de carga.
 - e. Potencia.
-  **Actividades a desarrollar**
 - a. Definir el tipo de molienda de acuerdo a la producción requerida, con la calidad granulometría final deseada, en forma eficiente, con el mínimo costo de capital, consumo mínimo de energía, con reducción de costos de mantenimiento y mano de obra.
 - b. Determinar a través de molienda en seco y húmedo la composición de la pulpa mineral para establecer que método es el más eficiente, según el efecto de la carga de medios de molienda y tipo de molino.
 - c. Realizar un análisis de costos que permita determinar qué tipo de molienda (convencional o no convencional) requerirá menos recursos para su implementación.




2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE





C  **Lineamiento No. 4**
 Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre

-  **d.** Para definir el tipo molienda (convencional / no convencional) es necesario comparar el consumo de energía global en kWh/ton de producto para ambos sistemas, teniendo en cuenta que los sistemas SAG consumen mayor energía, pero el costo de acero por reemplazo de bolas gastadas es menor.
- e.** Tener en cuenta en la selección del equipo, que el costo de mantenimiento de una línea de molienda no convencional (SAG o AG), es menor que el de un circuito de molienda tradicional, debido a que el molino SAG no requiere de etapas de trituración secundaria y terciaria.
- f.** En términos de producción, los molinos de bolas de gran diámetro, son menos eficientes y su diseño y montaje es más complejo.
- g.** Para obtener un volteo de carga más eficaz, es importante establecer la razón entre diámetro/largo de un molino SAG típico, para alcanzar mayor capacidad y rendimiento de potencia por molino.
- h.** Para el óptimo funcionamiento de un sistema de molienda, se requiere obtener el mayor rendimiento posible, definido por la máxima capacidad específica y el menor consumo de energía, sujeto a parámetros de eficiencia y restricciones de desgaste, costos de mantenimiento y mínima contaminación del producto final.
- i.** Considerar en términos de capacidad y eficiencia la instalación de equipos no convencionales para acortar el proceso de trituración y molienda mediante el uso de molinos autógenos y semiautógenos que constituye una alternativa de innovación en las plantas de concentración de cobre.




2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

D  **Lineamiento No. 4**
 Definir las variables operacionales asociadas a la trituración y molienda para el beneficio del cobre

-  **Componente 4**
 Localización de los equipos de trituración en la planta de beneficio y transformación.
-  **Alcance**
 Identificar los espacios existentes o disponibles en el área del proyecto, para aprovechar la gravedad en la transferencia de los materiales.
-  **Información requerida**
 - a.** Planos topográficos actualizados del área del proyecto.
 - b.** Planos de labores, equipos e infraestructura en superficie.
-  **Actividades a desarrollar**
 - a.** Establecer las condiciones morfológicas y topográficas de los espacios disponibles, para instalar los equipos de conminución, en pendientes que faciliten aprovechar la gravedad para la transferencia de los materiales a las etapas subsiguientes del beneficio.
 - b.** Evaluar las diferentes alternativas de ubicación de las trituradoras, según características y dimensiones.
 - c.** Identificar la menor distancia posible entre la planta de trituración y los frentes mineros activos de explotación, para reducir los costos de transporte del material a la planta.
 - d.** Considerar los criterios operativos, técnicos y ambientales necesarios para ubicar la planta de trituración en el interior de la mina si es subterránea o cerca de los frentes de explotación si es un sistema de explotación a cielo abierto.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A
A₁  **Lineamiento No. 5**
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



➤ **Componente 1**

Caracterización del mineral a concentrar.



➤ **Alcance 1**

Determinar el tipo de reactivos (colectores, espumantes, depresores, modificadores).



➤ **Información requerida**

Para realizar la separación físico química del cobre del resto de los minerales que componen la pulpa, se deben identificar las propiedades de la mena, tamaño de partícula, rango de pH en cada unidad de proceso y definir las condiciones hidrofóbicas y aerofílicas claves en la reacción entre el reactivo, burbuja y pulpa.




➤ **Actividades a desarrollar**

El objetivo principal de seleccionar los reactivos es recobrar los valores del mineral en un concentrado limpio y a bajo costo; para ello se debe tener en cuenta los siguientes análisis:

- a. **Análisis químico:** Espectroscopia por emisión de plasma con el fin de detectar tanto cualitativa como cuantitativamente los elementos presentes en la roca.
- b. **Microscopía óptica o electrónica:** Permite establecer la composición mineralógica, el grado de liberación y la textura.
- c. **Microelectroforesis:** Analizar el potencial zeta para comprender el comportamiento superficial de los coloides.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE


A
A₁  **Lineamiento No. 5**
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



- d. **Pruebas de molienda:** Es importante realizar las pruebas a diferentes tamaños granulométricos, ya que un tamaño muy grueso no flotaría, así como el mineral de interés y uno muy pequeño no se adherirían a las burbujas producidas.
- e. **Pruebas de flotación:** Con estas pruebas se busca encontrar los reactivos óptimos y dosificaciones dependiendo del pH. Debido a que en este paso hay muchas correlaciones empíricas se busca una mezcla de colectores (cada uno tiene características de selectividad y afinidad), mezcla de espumantes (para darle estabilidad a la espuma), depresantes (para evitar algunos minerales no deseados en el concentrado) y modificadores (para estabilizar el pH de la solución).



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A
A₂  **Lineamiento No. 5**
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



➤ **Alcance 2**

Establecer el dimensionamiento de equipos.



➤ **Información requerida**

El establecer las dimensiones de las celdas está en función de la mineralogía del mineral, las cantidades estimadas de producción y la factibilidad económica del proceso. Una parte importante para el dimensionamiento de las celdas, son los índices metalúrgicos que permiten precisar la calidad de la separación en cada etapa y la capacidad del circuito de concentración con fines de escalamiento, con esto se busca definir el caudal de entrada de la pulpa, reactivos y aire de entrada. Por otro lado, es necesario definir el porcentaje de sólido y la calidad de agua de proceso.




➤ **Actividades a desarrollar**

Teniendo en cuenta las condiciones cinéticas del proceso, se deben tener en cuenta las siguientes actividades:

- a. Seleccionar el sistema de aire (forzado o inducido).
- b. **Simulación de procesos:** Con el uso de simuladores, como Modsim se determinan los balances de masa, el rendimiento, la ley y la recuperación por bloque.
- c. **Pruebas de flotación:** Con el análisis de celdas de columna se busca encontrar la cinética de flotación, mezcla y dosificación de los reactivos.
- d. Determinar volumen de cada celda, su geometría y las concentraciones de cada etapa y del sistema global.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₁  **Lineamiento No. 5**
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



➤ **Componente 2**

Definir tipo de flotación y sus circuitos.



➤ **Alcance 1**

Seleccionar los elementos valiosos del mineral con una recuperación óptima.



➤ **Información requerida**

Dada la complejidad del proceso de flotación, éste no es posible desarrollarlo en una sola etapa, por lo que se debe implementar en múltiples etapas interconectadas que forman un circuito, por lo que la eficiencia de separación dependerá de la configuración del circuito.

- a. Porcentaje de recuperación.
- b. Ley del mineral.
- c. Razón de enriquecimiento del mineral.
- d. Carga circundante.
- e. Diagrama de flujo del proceso.
- f. Alimentación del circuito de flotación.
- g. Evaluación económica de la operación unitaria.
- h. Tipo de celda de flotación y sus características físicas.
- i. La composición química de la ganga.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. **Modelación del proceso de flotación:** se realiza una modelación rigurosa que contenga modelos micro (interacciones entre los parámetros físicos y químicos) y macroescala (proceso global relacionado con los parámetros operacionales). para describir la cinética de la reacción (Bustamante, 2020).
- b. Ajuste de reactivos dependiendo el tipo de flotación seleccionada en cada etapa de concentración.
- c. Calcular el índice de selectividad.
- d. Realizar la valoración de Instrumentación requerida en los bancos de celdas.
- e. Evaluar costos de inversión (CAPEX).



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₂

Lineamiento No. 5
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



Alcance 2
 Definir el porcentaje de humedad requerido.



Información requerida
 El objetivo es obtener una humedad mínima requerida entre 8-10% para las siguientes condiciones de operación o comercialización del mineral de cobre y recuperar el agua de proceso.

- a. Cantidad de alimentación al proceso.
- b. Porcentaje de sólidos.
- c. Densidad y viscosidad de la pulpa.
- d. Tiempos de retención y velocidad de agitación.
- e. pH de entrada.
- f. Espejo de agua clarificada.
- g. Selección del floculante, coagulante y dosificaciones (seleccionando las cargas aniónicas o catiónica y su reología).
- h. Velocidad ascendente y sedimentación del líquido.



Actividades a desarrollar
 Para aumentar el contenido de sólidos en la suspensión se debe tener en cuenta las siguientes labores:

- a. Seleccionar espesadores convencionales o de alta velocidad, basados en su área y requerimientos de producción de la planta.
- b. Seleccionar los filtros al vacío o presión, complementando los espesadores teniendo en cuenta la densidad de la torta. Las nuevas plantas utilizan generalmente las de presión con placas verticales y horizontales, (Sole et al., 2021).



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₂

Lineamiento No. 5
 Definir las variables operacionales asociadas a la concentración de cobre



- c. Definir por medio de pruebas de jarras el floculante, el coagulante, las dosificaciones, los tiempos de sedimentación y los rangos de pH de funcionamiento. En la industria, los floculantes más usados son los floculantes aniónicos de carga media con un pH de trabajo entre 6-8.
- d. Calcular el volumen del espesado y filtrado considerando el caudal de alimentación, la descarga del fondo, las velocidades de sedimentación, viscosidad y concentración de sólidos en la pulpa y la densidad.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A **Lineamiento No. 6**
 Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 1**

Identificar parámetros minero metalúrgicos para la fundición.



➤ **Alcance**

Determinar las variables operacionales para la selección de los procesos y equipos requeridos para la fusión, conversión, refinación y electrorrefinación.



➤ **Información requerida**

- a. Determinar las características del mineral concentrado a procesar.
- b. Tecnología a implementar para los procesos de fusión, conversión, refinación y electrorrefinación.
- c. Las variables operacionales para la identificación de procesos y equipos de fundición.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Análisis químicos en laboratorio (cantidad de cobre, hierro, azufre y sílice y otros elementos que puedan afectar el proceso de fundición).
- b. Determinar porcentaje de humedad presente en el concentrado.
- c. Realizar ensayos, pruebas de muestreo y preparación de muestras, análisis volumétrico, análisis instrumental y ensayos al fuego.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₁ **Lineamiento No. 6**
 Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 2**

Establecer las características de los equipos pirometalúrgicos.



➤ **Alcance 1**

Selección de equipos para la fundición.



➤ **Información requerida**

- a. Rendimiento del equipo de fundición.
- b. Capacidad instalada para su eficiente funcionamiento.
- c. Volumen máximo que puede contener el horno de fundición.
- d. Tipos de hornos y capacidades para la refinación posterior del cobre blíster.
- e. Definir e implementar las etapas de conversión y refinación del cobre.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Identificar el tipo de hornos que se emplearán en la planta de transformación de los concentrados de mineral de cobre, los hornos están diseñados para alcanzar las fases de fusión y conversión del metal hasta purezas de 96%.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A

A₁



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



- b. Evaluar el tipo de hornos de fusión y los reactores de conversión a utilizar considerando el consumo de energía, capacidad de procesamiento, control de emisiones de partículas y gases, temperatura de transformación, conformación de los equipos, selección de la cubierta refractaria dentro de los hornos y otros factores de eficiencia en la operación relacionados con el sistema de alimentación y evacuación, temperatura requerida para el proceso, inyección de aire enriquecido, tiempo mínimo de residencia del mineral en el horno, disposición y ubicación de los equipos y la destreza de los operadores en la operación y control de los equipos.
- c. Implementar tecnologías de avanzada como hornos de fusión en baño mediante tecnología de soplado inferior y lateral, tecnologías de conversión enfocada a procesos continuos, procurando mayores tasas de reacción, menores pérdidas de cobre y un adecuado control de los gases producidos.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B

A₂



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Alcance 2**

Selección de equipos para la electrorrefinación.



➤ **Información requerida**

- a. Las variables más importantes que determinan estos parámetros son la calidad del ánodo (uniformidad en la forma y peso), condiciones del electrolito (pureza, temperatura, velocidad de circulación), densidad de corriente del cátodo, el control del espaciamiento entre los electrodos y la prevención de cortos circuitos.
- b. La infraestructura de maniobrabilidad de las celdas para las operaciones de colocación y retiro de electrodos, limpieza de residuos y de mantenimiento.



➤ **Actividades a desarrollar**

El paso final de la fundición del mineral de cobre sulfurado es la electrorrefinación, tiene por objetivo extraer los restos de oxígeno presentes en el cobre blíster, incrementando la pureza del mineral y logrando cátodos de 99,97% de pureza.

La selección de los equipos para la electrorrefinación debe de tener en cuenta la estructura de conformación (casa de celdas, ánodos, cátodos, conexión eléctrica con una tensión promedio de 100 a 250 V dependiendo del equipo de rectificación CA/CD de la planta y componentes eléctricos de medición y control).

- a. Diseñar el circuito de celdas electrolíticas teniendo en cuenta la cantidad de celdas a instalar en un sistema múltiple (paralelo), el potencial de energía eléctrica requerida para mantener la tensión total del orden de 100 a 250 V, el equipo de rectificación CA/CD de la planta, tipo de ánodos y cátodos, solución de sulfato de cobre acida.
- b. Determinar los factores técnicos como pureza del cátodo, producción, consumo de energía por toneladas de cátodo.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

C
A₁
Lineamiento No. 6
 Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 3**

Especificar la técnica de lixiviación o biolixiviación a usar.



➤ **Alcance 1**

Definir tipo de equipo.



➤ **Información requerida**

Se debe determinar ¿qué tan rápido se necesita realizar la lixiviación?, es decir, el tiempo que debe permanecer el mineral para realizar el proceso y la cantidad de consumo de los agentes oxidantes. Estos datos se obtienen conociendo la cinética de la reacción y los análisis metalúrgicos, con el objetivo de definir el tamaño de partícula, concentrado, tiempo de tratamiento y el % de recuperación.



➤ **Actividades a desarrollar**

Para definir el tipo de equipo o tecnología que se puede aplicar al tratamiento del cobre es necesario conocer los siguientes elementos:

- a. Caracterización del mineral (composición mineralógica y sus asociados).
- b. Geología (tipos de mineral e impurezas).
- c. Índices metalúrgicos (recuperación de cobre, consumo de reactivos, tiempo de lixiviación y tamaños óptimos).
- d. Costos de operación.
- e. Escala de operación.
- f. Duración del proyecto.
- g. Disponibilidad de áreas para el proceso.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

C
A₂
Lineamiento No. 6
 Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Alcance 2**

Establecer las variables y parámetros operacionales del proceso.



➤ **Información requerida**

Las condiciones que se fijan para que se disuelva el cobre en el proceso de lixiviación son acidez, temperatura, presión, potencial oxidativo y composición de las soluciones.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo establecer las variables y los parámetros?

- a. Calculando las leyes de cobre y leyes de las impurezas.
- b. Pruebas de permeabilidad (calcular la porosidad y conductividad hidráulica saturada bajo carga).
- c. Determinando el potencial oxidativo del cobre: con los diagramas de Pourbaix se determina la actividad de los electrones en una reacción y se establecen las condiciones ideales de pH, temperatura y presión para que el cobre se pueda disolver.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

D



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 4**

Establecer los agentes oxidantes y reductores para el proceso.



➤ **Alcance**

Obtener datos del porcentaje de extracción, consumo de reactivo, tiempos de lixiviación.



➤ **Información requerida**

Para la producción específica de cobre se usan los siguientes agentes de lixiviación: agua, soluciones ácidas, agentes reductores, agentes oxidantes y agentes biológicos. Para obtener estas condiciones de proceso se debe conocer:

- a. Las características del mineral, las reservas y el valor potencial del yacimiento.
- b. La reacción de los agentes con los minerales de la ganga.
- c. Los costos del reactivo, tasa de recuperación y ciclo de lixiviación.
- d. El contenido de azufre, carbonato, cloruro y otros contribuyentes.



➤ **Actividades a desarrollar**

Estos agentes se establecen teniendo en cuenta su solubilidad, costo, selectividad y corrosividad en el proceso, por lo que se realizan las siguientes pruebas de laboratorio para corroborar su funcionamiento:

- a. Realizar pruebas metalúrgicas (pruebas de laboratorio de columnas de lixiviación unitaria).
- b. Realizar pruebas biometalúrgicas (pruebas de laboratorio de columnas de biolixiviación).
- c. Determinar concentraciones de agente por tonelada tratada.

2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

E



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 5**

Determinar variables críticas del proceso de biolixiviación.



➤ **Alcance**

Establecer los factores y condiciones limitantes que pueden afectar el proceso.



➤ **Información requerida**

El proceso biológico tiene una serie de componentes que afectan el rendimiento en la extracción del cobre, por lo que se necesita conocer los factores ambientales, biológicos y fisicoquímicos que influye en el desarrollo y crecimiento de las bacterias lixiviantes.



➤ **Actividades a desarrollar**

Para establecer los factores y condiciones limitantes es importante tener en cuenta los siguientes parámetros críticos en la operación:

- a. Tipo de material (naturaleza y porosidad).
- b. Aireación (suministro de O₂ y CO₂ al sistema).
- c. Irrigación (riego continuo o discontinuo).
- d. Potencial Redox (indicador de metabolismo energético).
- e. pH (condición necesaria de crecimiento).
- f. Temperatura (rangos de funcionamiento de los microorganismos).
- g. Densidad de pulpa (grado de concentración y fricción del mineral).
- h. Sustrato del mineral (composición mineralógica).
- i. Otros factores (compuestos orgánicos, agentes de pasivación, concentración de metales y sales presentes).





2

Línea Estratégica

PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

F



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



Componente 6

Definir la ubicación y área del proceso.



Alcance

Condiciones del terreno, teniendo en cuenta todas las restricciones operacionales y ambientales.



Información requerida

- Cartografía detallada de donde se ubique el sistema teniendo en cuenta todas las variables pertinentes como curvas de nivel, efluentes cercanos y vías para el traslado de masas.
- Cantidad estimada de mineral a lixiviar.
- Hidrogeología y dinámica de los suelos.
- Características del suelo.
- Geomorfología del terreno.
- Nivel freático.



Actividades a desarrollar

Para disponer de la información necesaria para seleccionar el área se debe tener en cuenta:

- La información de línea base obtenida en la construcción del documento para la licencia ambiental y el Programa de Trabajos y Obras (PTO).
- Levantamiento topográfico del terreno cada vez que se realice el procedimiento.
- Profundizar en los aspectos que no se encuentren específicos en los documentos citados.



2

Línea Estratégica

PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

G

A₁



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



Componente 7

Identificar variables y equipos en el proceso de separación sólido - líquido (SX).



Alcance 1

Definir los reactivos y su dosificación para la extracción por solvente.



Información requerida

El proceso consiste en extraer el cobre del sistema acuoso que viene de la etapa de lixiviación por medio de unos reactivos en la fase orgánica. Estos deben tener dos componentes esenciales: El extractante que es reactivo con una molécula activa que forma un complejo con el cobre, que separa la fase acuosa y orgánica por gravedad. El Diluyente que reduce la viscosidad y densidad de la fase orgánica para permitir la transferencia de masa. Para ello se necesita realizar las siguientes acciones:

- Pruebas hidrometalúrgicas.
- Fichas técnicas de los reactivos.



Actividades a desarrollar

Realizar pruebas hidrometalúrgicas con los reactivos (extractantes, diluyentes, modificadores y aceleradores) que serán utilizados en la solución orgánica para la extracción por solvente.

- Extractante:** Determinar su rendimiento a través de indicadores como la constante de extracción, el coeficiente de distribución y separación o factor de selectividad.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

G

A₁



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



b. Diluyente: Establecer las características del disolvente orgánico capacidad de disolver el extractante y de mantenerlo en solución, tener baja viscosidad, densidad (0,75 g/ml a 0,85 g/ml) y buena estabilidad química, baja solubilidad en la fase acuosa, tener un alto punto de inflamación, baja toxicidad y baja tasa de evaporación.

c. Modificador: Fijar la eficiencia del reactivo evaluando la solubilidad del complejo de metal-extractante, separación de fases y estabilidad química de la solución, con el fin de mejorar el rendimiento de extracción.

d. Aceleradores: Precisar la eficacia del componente evaluando la velocidad de aceleración de la reacción.

A partir de las fichas técnicas del reactivo se debe establecer que estos no absorban el ácido sulfúrico, tengan selectividad por el cobre y no por otros metales como hierro (Fe) y manganeso (Mn), elementos perjudiciales en la etapa de electroobtención. No deben ser inflamables, tóxicos o cancerígenos, deben ser insolubles en la fase acuosa y cumplir con los requerimientos de concentración mínima.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

G

A₂



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



Alcance 2

Conocer número de etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado.



Información requerida

Para estipular este número de etapas es necesario determinar las cargas en equilibrio y las características de la extracción en la fase orgánica. Entonces es necesario conocer las curvas de equilibrio para la extracción y reextracción.



Actividades a desarrollar

¿Cómo conocer el número de etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado?

- Realizar simulaciones con datos experimentales para construir las curvas de distribución o isotermas.
- Establecer condiciones de equilibrio con las isotermas de extracción, lo que permite definir el grado de mezclado y fijar la mejor extracción o reextracción según sea el caso [curvas de equilibrio para la extracción y reextracción].
- Indicar la razón de flujos de alimentación orgánico/acuoso al equipo mezclador-decantador.
- Indicar la razón de flujos existentes dentro del equipo mezclador-decantador, considerando los reciclos en el sistema.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

G

A₃



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Alcance 3**

Definir los equipos para la operación de extracción por solvente.



➤ **Información requerida**

- a. Diseños de la cámara primaria y secundaria.
- b. Etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo definir los equipos para la operación de extracción por solvente?

A partir de los diseños de las cámaras primaria y secundaria, basado en los tiempos de contacto, caudales de entrada del PLS y etapas necesarias para conseguir el grado de extracción y reextracción deseado, se pueden definir la configuración y criterios de diseño de los mezcladores sedimentadores del sistema de extracción por solvente.

- a. **Criterios de diseño del mezclador:** Se debe conocer la transferencia entre la fase orgánica y la fase acuosa, tiempos de residencia y cinética teórica del proceso, para seleccionar la forma del mezclador (cilíndrico, paralelepípedo) y sus dimensiones, buscando la mayor eficiencia posible.
- b. **Criterios de diseño del sedimentador:** Se debe conocer la gravedad específica de la fase orgánica y la fase acuosa, datos de flujo/razón de alimentación, velocidad de solución y la banda de dispersión que indica la fase dispersa del sistema.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

G

A₄



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Alcance 4**

Definir el equilibrio de la concentración del cobre.



➤ **Información requerida**

Conocer la concentración del electrolito de cobre en el solvente de entrada, con el objetivo de encontrar el equilibrio de la reacción.



➤ **Actividades a desarrollar**

A través de análisis químicos de laboratorio determinar el equilibrio del electrolito de Cu e identificar las curvas de equilibrio de la concentración del cobre. Lo anterior, con el fin de establecer las concentraciones mínimas en los circuitos de extracción y reextracción y poder determinar las concentraciones del electrolito y los reactivos en cada etapa.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

H

A₁



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Componente 8**

Definir variables necesarias para la remoción de impurezas y recuperación mediante electroobtención.



➤ **Alcance 1**

Determinar las condiciones y características eléctricas del proceso.



➤ **Información requerida**

- a. Estimar los requerimientos eléctricos para el proceso, debido al alto consumo de corriente para las celdas.
- b. Establecer la calidad de la corriente continua para optimizar el proceso.
- c. Definir las características de las conexiones eléctricas para disminuir trayectos.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Calcular la cantidad de voltaje en el sistema teniendo en cuenta las pérdidas de corrientes.
- b. Usar equipos rectificadores de corriente para mantener constante el flujo eléctrico.
- c. Disminuir los trayectos de corriente continua y alta tensión de los rectificadores a los bancos de celdas electrolíticas.
- d. Definir el tipo de conexiones entre las celdas, que permiten asegurar la misma corriente en cada electrodo y por ende la misma densidad de corriente.



2 Línea Estratégica
PLANIFICACIÓN Y DISEÑO DE LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

H

A₂



Lineamiento No. 6

Generar información operacional para el desarrollo del proceso de transformación de cobre



➤ **Alcance 2**

Diseñar y definir materiales de las celdas electrolíticas.



➤ **Información requerida**

- a. Tipo de ánodo.
- b. Tipo de cátodos.
- c. Materiales para la construcción de la celda en medio acuoso.
- d. Características de las celdas, ánodos y cátodos.

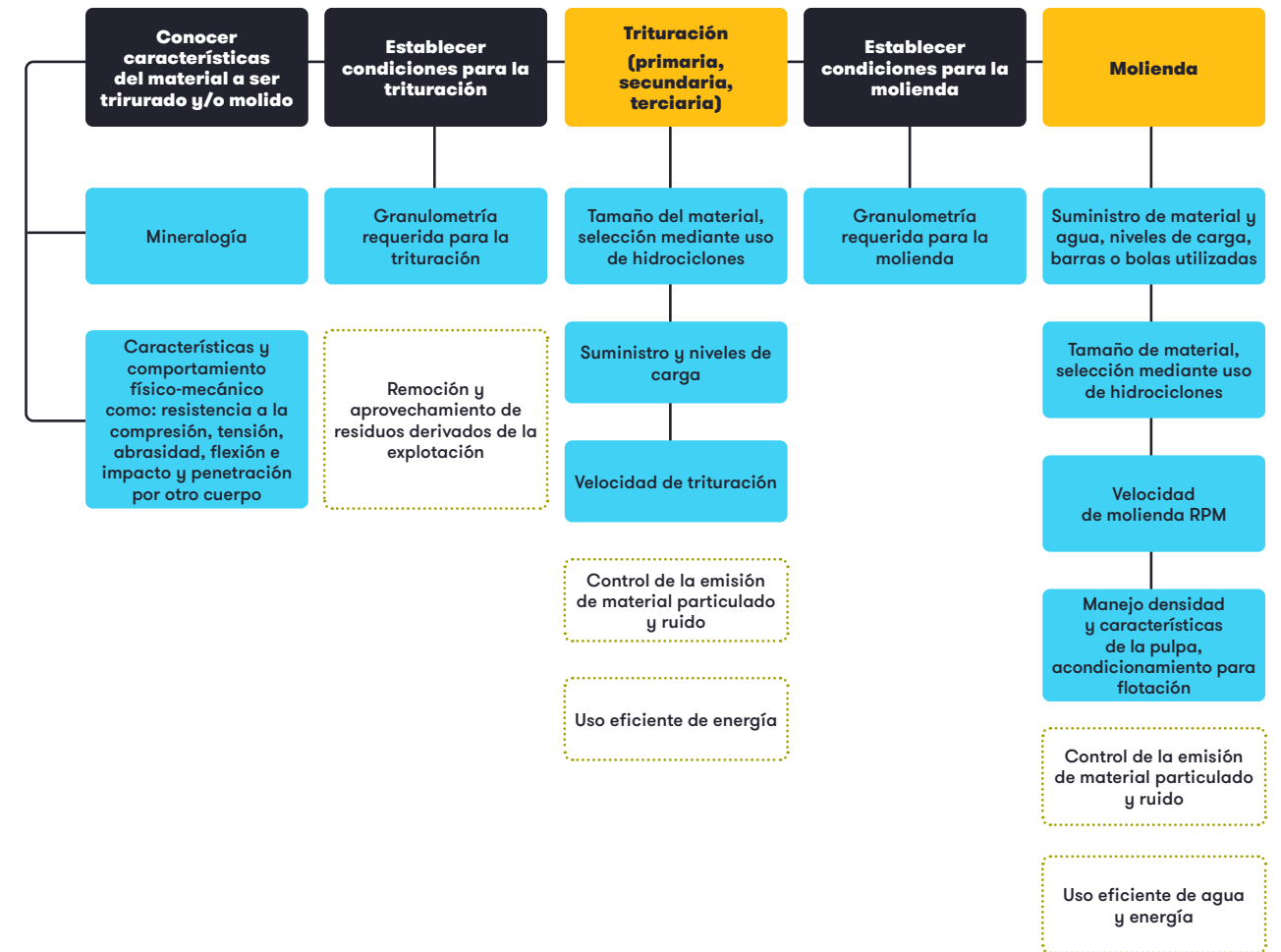


➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Seleccionar el ánodo que tenga resistencia a la corrosión, buenas propiedades mecánicas y cantidad mínima de impurezas de metales pesados en el lodo de la celda.
- b. Seleccionar el cátodo que tenga conductividad alta, soldabilidad a las capas de cobre y alta resistencia a la corrosión.
- c. El material de construcción de las celdas debe tener una resistencia química, térmica y eléctrica.
- d. Definir los espacios entre los cátodos y el ánodo para generar la optimización entre el número de platos y el adecuado recubrimiento del cátodo. La separación típica está entre 45-50 mm.



Esta línea estratégica busca definir los aspectos y parámetros a tener en cuenta en el beneficio del mineral de cobre, correspondiente al desarrollo de los procesos de trituración, molienda y concentración.



Se deben establecer circuitos de trituración y molienda en los que se logre el tamaño de material requerido, disminuyendo el número de equipos utilizados y reprocesos realizados, para hacer eficiente el uso de recursos y optimizar la operación



Fuente: ATG Ltda., 2022.



3 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE**

A



Lineamiento No. 7
Trituración del mineral



➤ **Componente 1**

Trituración primaria o gruesa.



➤ **Alcance**

Lograr establecer la tasa de reducción del tamaño del mineral requerida.



➤ **Información requerida**

- a. Tamaño del material de alimentación correspondiente a roca volada.
- b. Tamaño del producto de descarga.
- c. Tasa de reducción en la etapa de trituración primaria.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Establecer la granulometría del producto de salida, calculando la tasa de reducción del equipo de trituración, acorde a los procesos subsiguientes de beneficio, ya sea para producir material grueso para lixiviar óxidos o material fino para concentrar minerales de sulfuros en celdas de flotación.
- b. El contenido de sobre-tamaños y finos resta eficiencia a la trituradora, por tal razón es necesario tamizarlos o clasificarlos antes de alimentar la tolva, para aumentar la capacidad de las máquinas.
- c. Ajustar la abertura de alimentación del equipo de trituración, de acuerdo al tamaño del material recibido de la roca volada de la mina, con el objeto de establecer la reducción del producto de salida requerido en esta etapa.
- d. Determinar la abertura de alimentación para optimizar mejor retorno sobre la inversión cuando la trituradora primaria es una trituradora de mandíbulas, ya que las necesidades de perforación y voladura son menores porque la trituradora puede aceptar bloques de rocas más grandes [1.5 max].



3 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE**

B



Lineamiento No. 7
Trituración del mineral



➤ **Componente 2**

Trituración fina.



➤ **Alcance**

Determinar el número de etapas de trituración del material.



➤ **Información requerida**

- a. Volumen de carga.
- b. Abrasividad del material a triturar.
- c. Triturabilidad del material.
- d. Curva de granulometría deseada.
- e. Grado de reducción de la trituradora.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Optar preferiblemente en esta etapa por las trituradoras de cono y de impactos con el propósito de obtener la mayor reducción posible del mineral a procesar.
- b. Tener en cuenta los criterios de costo-beneficio, relacionados entre las trituradoras de cono que constituyen generalmente una inversión más alta que las trituradoras de impactos, sin embargo, cuando se usa de forma correcta, la trituradora de cono ofrece costos de operación más bajos que una trituradora convencional de impactos. Por lo tanto, si se tritura roca dura y abrasiva es recomendable instalar trituradoras de cono en la etapa de trituración final.
- c. Todas las trituradoras tienen una tasa de reducción limitada, lo que significa que la reducción de tamaño se hace por etapas. El número de etapas de trituración fina depende del tamaño de alimentación y del producto requerido y de la eficiencia del equipo para reducir el material a la granulometría deseada.



3 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE



Lineamiento No. 8
Molienda del mineral



➤ **Componente**

Ajuste de variables operacionales para la molienda.



➤ **Alcance**

Reducir el material al tamaño óptimo, para dar paso a la siguiente etapa de beneficio del mineral.



➤ **Información requerida**

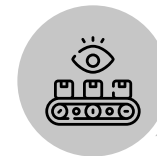
- a. Velocidad y tamaño del molino.
- b. Tamaño del cuerpo moledor.
- c. Diseño de los revestimientos del molino.
- d. Cambios en las características del mineral.
- e. Distribución de tamaños del producto del molino.
- f. Volumen de carga moledora y su distribución de tamaño.
- g. Eficiencia de la clasificación.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Establecer la carga del mineral, suministro de agua, carga de bolas o barras, condiciones de blindaje, tiempos de molienda y reducir y controlar correctamente el sonido de las barras o bolas, densidad de la pulpa y consumo de energía.
- b. Garantizar que el tonelaje de mineral recibido por el molino de la sección de trituración cumple con la reducción óptima requerida de tamaño del mineral, para que el molino optimice su operación.
- c. Mantener la carga del molino constante, con volúmenes máximos permisibles y peso uniforme, con el fin de conservar la capacidad de molienda y evitar sobrecargas o desgaste inútiles de bolas y chaquetas del equipo.

3 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE



Lineamiento No. 8
Molienda del mineral

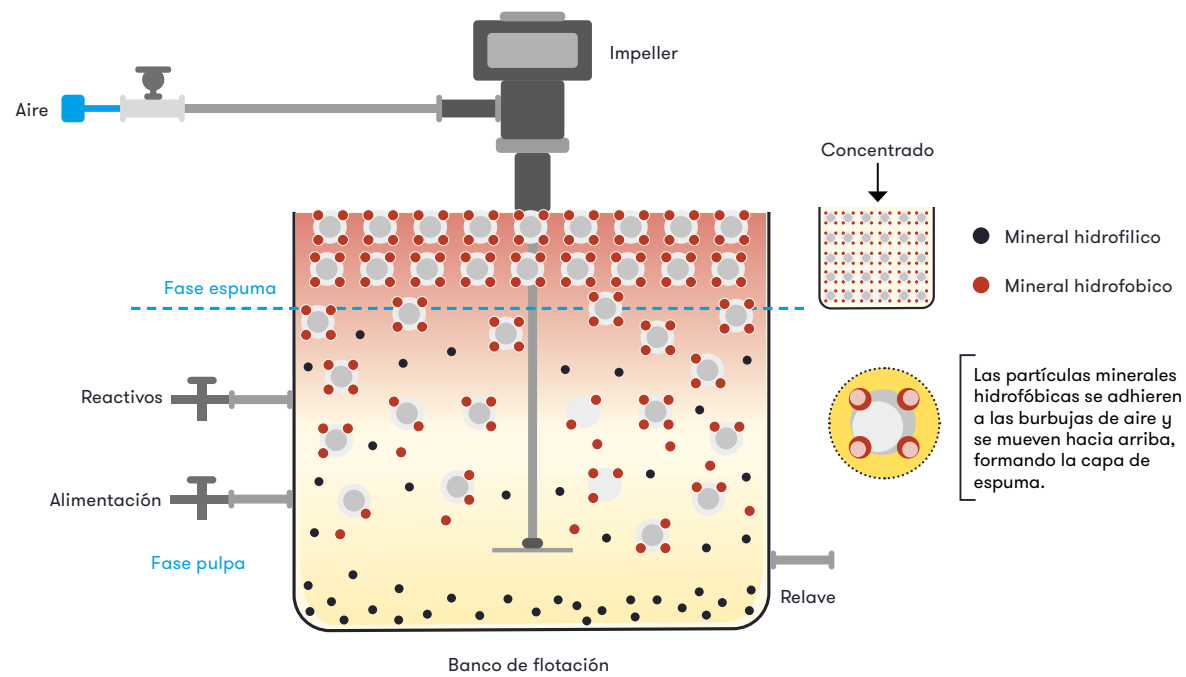


- d. Instalar una tolva de finos de diseño apropiado para reducir las variaciones en el tamaño de alimentación del molino y reducir la segregación de partículas finas y gruesas ayudando a fluir el mineral de las tolvas.
- e. Verificar la densidad de la pulpa hasta que se regularice y evitar el exceso de agua porque disminuye el tiempo de permanencia del mineral en el interior del molino, haciendo que la carga salga rápidamente y con granulometría gruesa. Cuando la cantidad de agua es deficiente, la carga avanza lentamente y el barro se vuelve muy espeso y amortigua el golpe entre las bolas y no se produce una buena molienda.
- f. Verificar que el molino siempre mantenga su carga normal de medios moledores. Cuando el molino tiene exceso de bolas, disminuye su capacidad ya que estas ocupan el espacio para la carga. Cuando la carga está por debajo del límite normal, se pierde capacidad moledora y se dificulta llevar el mineral a la granulometría deseada.
- g. Determinar el tiempo óptimo de permanencia del mineral dentro del molino para establecer el grado de finura de las partículas liberadas.
- h. Tener presente, que en la siguiente etapa de flotación por espumas es muy importante, que todo el mineral a ser flotado tiene que ser reducido en su tamaño hasta tal punto que cada partícula represente una sola especie mineralógica (liberado) y su tamaño tiene que ser apropiado para que las burbujas de aire los puedan llevar hasta la superficie de las celdas.
- i. Considerar el uso de baterías de hidrociclones para controlar el tamaño de partícula que sale de los molinos y separar la fracción de partículas finas de las gruesas, la cual garantiza la homogenización del mineral que se dirige al proceso de concentración. Dentro de los clasificadores mecánicos es la mejor opción, debido al espacio que ocupa, su bajo costo de fabricación y mantenimiento.





Diagrama de la celda de flotación



Fuente: AZHONGMEI LI 1 , MENGZHE HUANG 2, WEIHUA GUI 1, AND ZHONG-PING JIANG 2, (Member, IEEE), Data-Driven Adaptive Optimal Control for Flotation Processes With Delayed Feedback and Disturbance,.2019

3 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA EL BENEFICIO DEL COBRE

A



Lineamiento No. 9

Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado



Componente 1

Acondicionamiento del material a partir de las características minero-metalúrgicas del mineral.



Alcance

Obtener mayor eficiencia y rendimiento del proceso de flotación.



Información requerida

Para obtener un tiempo de contacto entre los reactivos y el mineral se requiere conocer la siguiente información:

- Caudal másico de la entrada a la flotación.
- Perfil granulométrico.
- Cantidad de dosificación del colector y espumante.
- pH de la solución.
- Medición de la ley de cobre.



Actividades a desarrollar

Determinar la cantidad de reactivos que se incorporan en esta etapa, entre la molienda y la flotación, con el propósito de darle el tiempo necesario de contacto con el mineral y que se modifiquen las partículas superficiales del cobre, además asegurarse que la mezcla sea homogénea antes de entrar en las celdas de flotación.

- Medir el caudal de entrada:** Se debe tener en cuenta la cantidad de toneladas por hora que entran para realizar la dosificación adecuada y tengan una separación eficiente.
- Realizar perfil granulométrico de la pulpa:** Control que el tamaño de partícula esté en promedio en el rango establecido de liberación, que generalmente es menor de 100 micrones.





3 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE



Lineamiento No. 9

Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado



- c. **Pruebas de molienda:** Realizar las pruebas a diferentes tipos de granulometría debido a que un tamaño muy grueso no flotaría el mineral de interés y un mineral muy pequeño no se adhiere a las burbujas creadas.
- d. **Pruebas de flotación:** Con estas pruebas se busca encontrar los reactivos óptimos y dosificaciones dependiendo del pH. Debido a que en este paso hay muchas correlaciones empíricas se busca una mezcla de colectores (cada uno tiene características de selectividad y afinidad), mezcla de espumantes (para darle estabilidad de la espuma), depresantes (para evitar algunos minerales no deseados en el concentrado) y modificadores (para estabilizar el pH de la solución).



3 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS
PARA EL BENEFICIO DEL COBRE

B



Lineamiento No. 9

Determinar los elementos del proceso de concentración del mineral sulfurado



Componente 2

Funcionamiento de los reactivos en el proceso de concentración.



Alcance

Verificar la condición de flotabilidad con la adecuada dosificación de los reactivos en el proceso de recuperación del mineral.



Información requerida

- a. Ley de cobre en la entrada y la salida del proceso.
- b. Porcentaje de sólidos.
- c. pH.
- d. Preparación de los reactivos.
- e. Condiciones del agua (dureza).
- f. Altura de la columna de espuma.



Actividades a desarrollar

- a. Comprobar que esté dentro del rango de concentración esperado del cobre, con los datos de concentración y sólidos.
- b. Controlar el pH antes de entrar a las celdas debido a que es una variable que influye en el proceso de selección.
- c. Verificar la concentración de preparación de los reactivos.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8

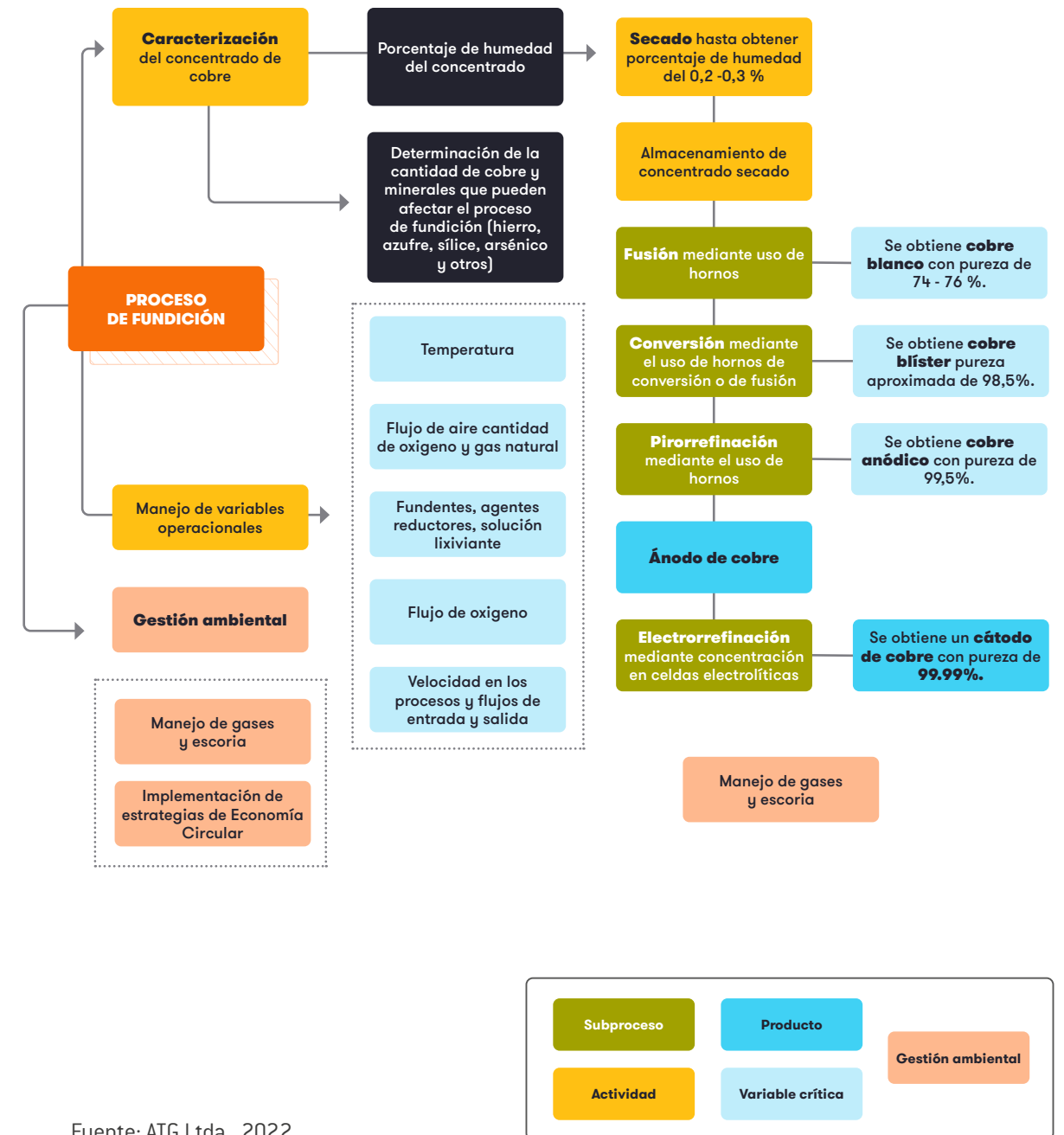


Línea Estratégica DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

Reúne las acciones a desarrollar durante el proceso pirometalúrgico para la transformación del cobre, considerando las fases consecutivas de fusión, conversión y pirorefinación. También se incluye el proceso de electrorrefinación, permitiendo obtener cobre de una pureza del 99,99%.



Fuente: Freepik, Licencia premium



Fuente: ATG Ltda., 2022.



4 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

A



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



➤ **Componente 1**

Minerales presentes en el concentrado.



➤ **Alcance**

Identificar y clasificar los minerales que afectan el proceso pirometalúrgico.



➤ **Información requerida**

Para el correcto funcionamiento de la planta de beneficio y transformación es indispensable conocer las características del material que se procesará, identificando los minerales presentes en este. En el proceso de fundición es fundamental determinar las reacciones químicas que se pueden generar a partir de los minerales identificados.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Almacenamiento de mineral procedente de la etapa de concentración en depósitos o patios de almacenamiento.
- b. Caracterización del mineral concentrado (presencia de minerales de compuestos de cobre, hierro, azufre, sílice, arsénico y otros minerales con la posibilidad de ser beneficiados y transformados).
- c. Muestreo permanente para determinar cantidades, así como la humedad presente en el mineral concentrado.
- d. Mezclado representativo del mineral a procesar, homogenizando las diferentes procedencias para alcanzar las condiciones mínimas requeridas por la planta.



4 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

B



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



➤ **Componente 2**

Contenido de humedad del concentrado.



➤ **Alcance**

Reducir la humedad del mineral a menos de 1%.



➤ **Información requerida**

La humedad original de los concentrados que oscila entre el 6% y 8%, se reduce a niveles que oscilan entre el 0,2% y 0,3%. En algunos casos de procesos de fusión el grado de humedad del concentrado a tratar se convierte en un parámetro importante, como sucede en la alimentación a los procesos de fusión flash, en los procedimientos Outokumpu e INCO, Outokumpu y el Convertidor Teniente en particular, los cuales necesitan grados de humedad inferiores al 0,2%.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Homogenización del material concentrado de minerales de cobre con un contenido de humedad promedio de 6% a 8%.
- b. Secado del mineral aplicando temperaturas desde 180°C hasta 300°C al concentrado húmedo proveniente de la zona de mezcla.
- c. Almacenamiento en tolvas de alimentación a las líneas de secado de cada equipo de fusión que cuenta con secadores calefaccionados con vapor de agua.
- d. Alimentación a hornos de fusión.



4 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

C



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



➤ **Componente 3**

Fusión mediante el uso de hornos.



➤ **Alcance**

Separación de los óxidos (escoria) de los sulfuros de cobre – cobre blanco (74-76%).



➤ **Información requerida**

- a. Flujo de alimentación de sólidos y aire al sistema.
- b. Tasas de extracción de gas SO_2 .
- c. Tiempo de extracción de mata y escoria.
- d. Grado de cobre [Cu] en la entrada y salida.
- e. Contenido de sílice en la escoria.
- f. Temperatura del horno.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Alimentación continua al horno de fusión.
- b. Controlar y ajustar la velocidad de entrada del concentrado y oxígeno permitirá tener una entrada constante de material, con el objetivo de garantizar una eficiencia en el proceso de fundición, obtener un % de cobre en la mata en los rangos de diseño y minimizando las pérdidas de gas y energía.
- c. Programar la extracción del horno de la escoria y mata para garantizar niveles prescritos de concentrado en el horno y alimentación constante según necesidad los convertidores.
- d. Regular la temperatura para que este dentro de los rangos establecidos y obtener una producción de escoria mínimo.
- e. Medir el concentrado de cobre especificado en la mata, permite controlar y ajustar las velocidades de entrada para optimizar el proceso.



4 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO

D



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



➤ **Componente 4**

Conversión mediante el uso de hornos de conversión o de fusión.



➤ **Alcance**

Obtener cobre blíster con concentración aproximada de 98,5%.



➤ **Información requerida**

Esta etapa de la fundición corresponde a la conversión de la mata de cobre proveniente de la fusión, se realiza en hornos con temperatura de 1200°C, cuyo fin es la separación del remanente de hierro y azufre de los sulfuros de cobre. Mediante la adición de aire enriquecido (70% de oxígeno), se eliminan las impurezas hasta obtener cobre blíster con concentraciones aproximadas del 98,5%.

La tecnología de hornos de conversión es considerada como una fundición moderna, corresponden a Hornos Flash u Hornos de Conversión Inmediata. Los principales insumos requeridos en el proceso de conversión son: cal fina (95% CaO promedio), oxígeno técnico (95% O_2 , en promedio) y aire de distribución. El enriquecimiento del aire en proceso es 70% de oxígeno promedio.

- a. Porcentaje de cobre [Cu] en la mata.
- b. Contenido de la escoria.
- c. Cantidad mínima de alimentación de concentrado.
- d. Cantidad de insumos en el proceso.
- e. Consumo de energía para mantener temperaturas.



4 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO**

D



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



► **Actividades a desarrollar**

- a. Medir las concentraciones de cobre (Cu) tanto en la entrada como en la salida, con el objetivo de controlar que las condiciones de temperatura y adición de los insumos estén en las dosificaciones óptimas del proceso.
- b. Controlar las entradas de concentrado en la operación ayuda a mantener un flujo constante y con las proporciones adecuadas de oxígeno y cal fina.
- c. Ajustar la temperatura permite controlar la relación de entrada de oxígeno y el gasto de combustible.



4 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO**

E



Lineamiento No. 10

Desarrollo del proceso de fundición



► **Componente 5**

Pirorrefinación mediante el uso de hornos.



► **Alcance**

Obtener cobre anódico con pureza de 99,5%.



► **Información requerida**

- a. Características del cobre blíster.
- b. Características las impurezas.
- c. Cantidad de agente reductor en el horno.
- d. Volumen de aire enriquecido con oxígeno y gas natural fraccionado con vapor de aire.
- e. Temperatura de proceso.
- f. Cantidad de azufre en el cobre.



► **Actividades a desarrollar**

- a. Controlar relación de flujo de oxígeno para realizar la quema óptima del azufre.
- b. Ajustar las dosificaciones de cal realizando mediciones de concentrado de la escoria para controlar la remoción de las impurezas.
- c. Identificar el flujo mínimo de gas natural para la reducción de oxígeno.



4

Línea Estratégica

DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN PIROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE SULFURADO



Lineamiento No. 11

Desarrollo del proceso de electrorrefinación



➤ **Componente**

Concentración en celdas electrolíticas.



➤ **Alcance**

Obtener un cátodo de cobre con pureza de 99.99%.



➤ **Información requerida**

- a. Conocer las concentraciones del cobre anódico.
- b. Características de la solución lixivante.
- c. Cantidad de minerales recuperables contenidos en la solución lixivante.
- d. Corriente eléctrica y densidad necesaria en el proceso.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Elección y construcción de las celdas electrolíticas.
- b. Implementación del proceso de electrorrefinación (electrólisis), donde se recupera el metal desde una solución de lixiviación debidamente acondicionada (solución electrolito) y depositarlo en un cátodo.
- c. Aplicación de un potencial eléctrico entre un ánodo de cobre (electrodo positivo) y un cátodo de cobre (electrodo negativo), sumergidos en una celda que contenga una solución de sulfato de cobre ácida.
- d. Utilizar un proceso de electrólisis, donde se hace circular a través de la solución electrolito, una corriente eléctrica continua de baja intensidad entre un ánodo (la solución misma) y un cátodo.
- e. Monitoreo del proceso, donde los iones del metal de interés (cationes) son atraídos por el cátodo (polo de carga negativa) depositándose en él, quedando las impurezas disueltas en el electrolito y también se precipitan en residuos o barras anódicos.



Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
Fuente: ATG Ltda., 2022.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8

Línea Estratégica

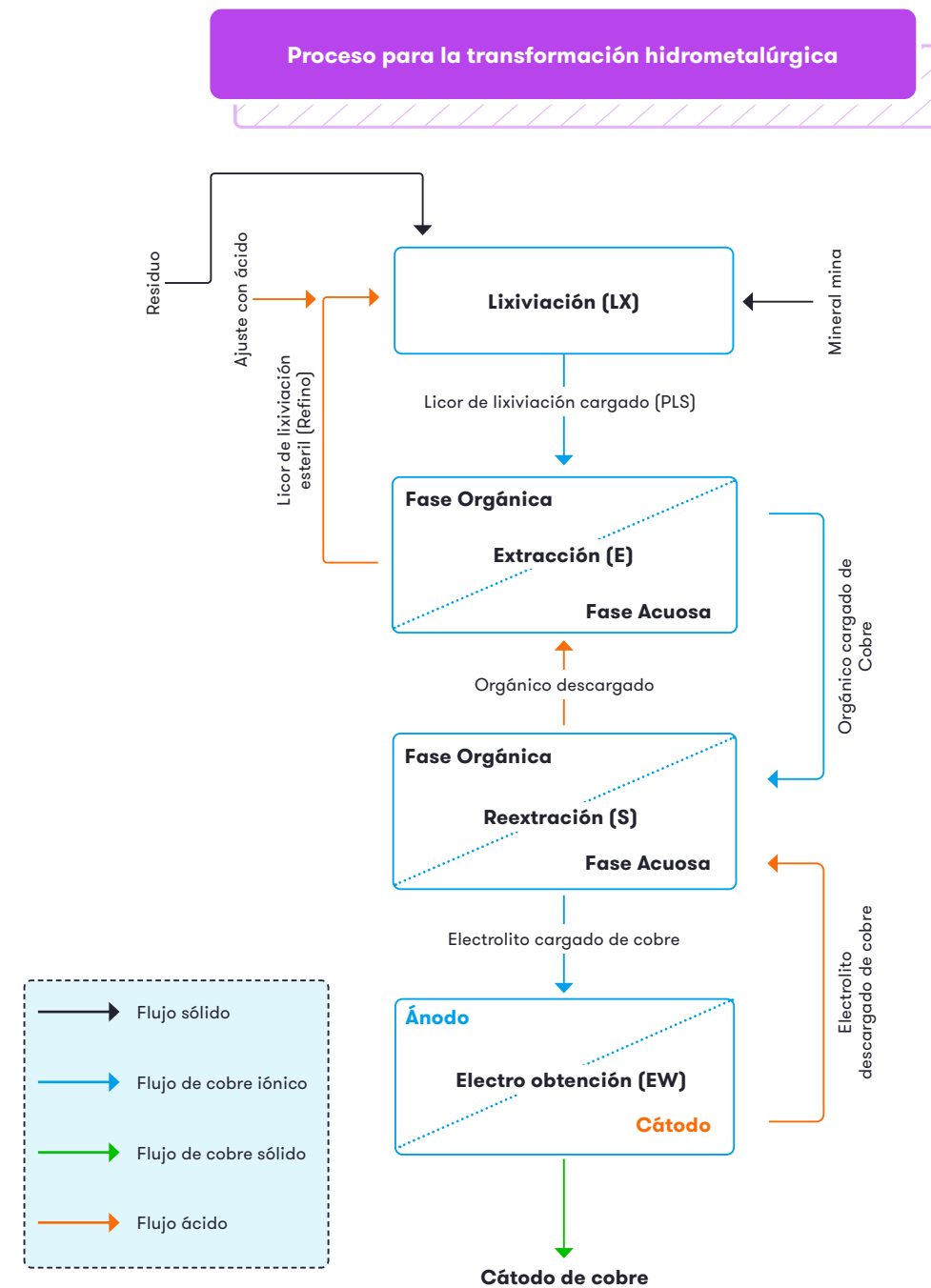
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

En esta línea estratégica se presentarán los aspectos relevantes de los procesos de lixiviación, extracción por solvente, y electroobtención en los que se desarrollan distintas reacciones físicas

y químicas necesarias para la transformación hidrometalúrgica de los minerales oxidados de cobre, eliminando impurezas hasta obtener cátodos de cobre.



Fuente: Freepik, Licencia premium



Fuente: <https://www.copper.org/publications/newsletters/innovations/2001/08/hydrometallurgy.html>



5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

A



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre



➤ **Componente 1**

Preparación del sitio.



➤ **Alcance**

Impermeabilización de área de disposición del material a lixiviar.



➤ **Información requerida**

En la base de las pilas se instala un material impermeable que reciba toda la solución lixivante y la conduzca a las canaletas, para luego dirigirla a unas piscinas de almacenamiento donde llegan las soluciones del electrolito fuertes (PLS) y soluciones del electrolito débiles (ILS). La instalación y montaje del material debe tener todo el control y cuidado, debido a todas las implicaciones ambientales y económicas.

Se necesita tener los siguientes elementos de selección:

- a. Tipo de material (espesor, resistencia y duración).
- b. Método de colocación y unión.
- c. Material de cobertura.
- d. Calidad de la compactación del terreno.
- e. Rendimiento de la geomembrana.
- f. Drenaje de la solución.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Instalar el material de cobertura para proteger la geomembrana. Estableciendo unos materiales en la parte de arriba (overliner) de la geomembrana y en la parte de abajo (underliner) para evitar picadura o rotura de la geomembrana.



5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

A



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre



- b. Realizar un ensayo de Proctor¹ para evaluar el grado de compactación del suelo con el propósito de tener una comprensión adecuada del sitio y con una conductividad hidráulica saturada mínimo de $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$.
- c. Asegurar que la soldadura de las uniones de la geomembrana quede totalmente aislada del suelo mediante pruebas hidráulicas.
- d. Escoger el material de la geomembrana, teniendo en cuenta como criterio lo económico, ambiental, grado de permeabilidad, durabilidad, picado y resistencia a la corrosión.

1. Ensayo de compactación Proctor es un procedimiento para determinar la densidad seca máxima de un terreno en relación con su grado de humedad a una energía de compactación determinada.
Fuente : https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_compactaci%C3%B3n_Proctor



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

A



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre

A₂



➤ **Alcance 2**

Conformación de las pilas a lixiviar.



➤ **Información requerida**

- a. Tamaño de partícula del material a lixiviar.
- b. Definición del tipo de pilas: dinámicas, permanentes o modulares.
- c. Inclinación de la cama.
- d. Estudio geomecánico del material para alcanzar la altura y la base diseñada con la cantidad de material a tratar.
- e. Tiempo de ciclo de lixiviación.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Establecer la inclinación del terreno (mínimo del 3%).
- b. Selecciona una configuración de construcción de pilas (dinámica o permanente).
- c. Determina el ángulo de reposo del material y las pendientes para el drenaje y la evacuación de la solución lixiviada.
- d. Fijar la altura y la base de construcción de la pila (tamaño de partícula y porosidad).
- e. Realizar topografía para asegurar la altura y posición diseñada.



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

B



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre



➤ **Componente 2**

Transporte del mineral y apilado.



➤ **Alcance**

Escoger el tipo de transporte y apilado dependiendo el tamaño de operación y flujo del mineral.



➤ **Información requerida**

- a. Flujos y movimiento del material desde la mina hasta la planta de procesamiento.
- b. Tamaño de la operación extractiva.
- c. Asignación de equipos y tecnologías para el proceso.
- d. Datos de las medidas de las pilas.
- e. Humedad del material.



5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

B



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre



▶ **Actividades a desarrollar**

a. Teniendo la información se puede seleccionar:

Tamaño (ton/día)	Equipo	Sistema de pilas
300-10.000	Sistema de camiones y apiladores de correa autopropulsado	Pilas dinámicas y permanentes con restricción
10.000-50.000	Correas modulares articuladas (grasshopper) que termina en un apilador de correa o stracker	Pilas dinámicas y permanentes sin restricción
75.000-150.000	Complejos sistemas de apiladores sobre orugas con correas transportadoras estacionarias o móviles. Con el movimiento de las pilas se usa recolectores tipo pala de rueda conocidos como rotopala o bucketwhell	Pilas dinámicas (excesivo tonelaje)
≥150.000	Complejos sistemas de apiladores sobre orugas con correas transportadoras estacionarias o móviles. Con el movimiento de las pilas se usa recolectores tipo pala de rueda conocidos como rotopala o bucketwhell	Pilas dinámicas (excesivo tonelaje)

b. Realizar el apilado dentro de los límites y dimensiones establecidas (base y altura) con la ayuda de topografía y unidad de apilamiento radial (stacker).

c. Controlar el proceso de aglomeración teniendo en cuenta la humedad.

5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

C

A₁



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre



▶ **Componente 3**

Tratamiento de disolución.



▶ **Alcance 1**

Realizar el tratamiento en pilas para óxidos.



▶ **Información requerida**

- a. Pretratamiento químico o curado del material.
- b. Control de fugas de los sistemas de impermeabilización y drenaje.
- c. El sistema de riego y recolección de soluciones.
- d. Diseño de piscinas con las dimensiones, material de construcción y sistema de aislamiento.
- e. Densidad aparente del material mineralizado.



▶ **Actividades a desarrollar**

- a. Realizar el análisis granulométrico para establecer si el curado² se realiza directamente en la banda transportadora o en tambores.
- b. Implementar un control de fugas en la instalación del sistema hidráulico de riego.
- c. Realizar el control de aguas lluvia, escorrentía superficial e instalar un sistema de manejo de derrames.
- d. Construir las piscinas desarenadoras, piscinas de soluciones ricas en el lixiviado (PLS), piscinas de solución intermedia (ILS) y piscinas de emergencia para la recolección de las soluciones lixiviantes.
- e. Seleccionar la red de riego (goteo o aspersión) dependiendo de la temperatura del medio ambiente, altura de la operación minera y concentración de sales en la solución.

2. Curado: Procedimiento de rocio de una solución de ácido y agua a la roca mineralizada, a fin de sulfatar los minerales y empezar el proceso de lixiviación (Codelco, 2019).





5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

C



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre

A₂



➤ **Alcance 2**

Realizar el tratamiento de disolución agitada.



➤ **Información requerida**

- a. Recuperación metalúrgica (porcentaje de cobre [Cu] en la entrada y salida, tiempo de lixiviación).
- b. Parámetros establecidos de granulometría para la operación.
- c. Gasto de energía.
- d. Velocidad de agitación.
- e. Velocidad de disolución.
- f. Condiciones de la temperatura y presión.
- g. Porcentaje de sólidos.
- h. Adicionar agentes oxidantes.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo se realiza el tratamiento de diluciones agitadas?

- a. Definir el rango de variación de granulometría dentro del proceso, con el objeto de exponer con un grado óptimo de liberación el mineral a la solución de lixiviación y mejorar la etapa de separación sólido-liquido en las siguientes operaciones.
- b. Determinar la velocidad de agitación encontrando el equilibrio entre el tiempo de lixiviación y consumo de energía.
- c. Verificar la velocidad de disolución de la extracción del porcentaje de cobre este en el tiempo diseñado.
- d. Controlar la temperatura y la presión cuando se tengan minerales complejos a manejar en el proceso y se tengan temperaturas y/o presiones altas.

5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

C



Lineamiento No. 12

Establecer criterios operacionales en las etapas de la lixiviación de óxidos y algunos sulfuros de cobre

A₂



- e. Realizar la medición de la arcilla presente en el mineral de entrada, con el objetivo de evaluar las posibles interferencias en el proceso de disolución.

- f. Instalar instrumentalización (equipos de pH, % de sólido, potencial redox, presión y temperatura, entre otros) en los tanques para controlar las variables críticas del proceso y maximizar la producción del mineral.

- g. Adicionar agentes oxidantes para poder tratar estos minerales primarios complejos.

- h. Controlar y determinar los gases generados para su tratamiento, en caso de requerir temperatura.





5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

A₁



Lineamiento No. 13

Consideraciones operacionales de la extracción por solventes



➤ **Componente**

Desarrollo de las etapas de extracción.



➤ **Alcance 1**

Proceso de extracción o carga del solvente.



➤ **Información requerida**

Datos de variables operacionales correspondientes a: pH, flujo de entrada de la solución rica de lixiviación (PLS, por sus siglas en inglés), relación de flujo orgánico/acuoso, flujo de descarga, velocidad y potencia de bombeo.



➤ **Actividades a desarrollar**

Para el proceso de extracción por solvente es necesario obtener una carga orgánica de aproximadamente 4g/l de cobre, realizando el control operacional de variables críticas, por ejemplo:

- a. pH.
- b. Control de flujo de entrada de solución rica de lixiviación PLS.
- c. Control de parámetros de solución rica de lixiviación PLS.
- d. Graduar el impulsor del bombeo, relación de flujo orgánico/acuoso.
- e. Recircular el electrolito.
- f. Controlar la temperatura.



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

A₂



Lineamiento No. 13

Consideraciones operacionales de la extracción por solventes



➤ **Alcance 2**

Para el proceso de reextracción o descarga.



➤ **Información requerida**

Características de la solución orgánica cargada.



➤ **Actividades a desarrollar**

Recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas en la misma fase, lo que le permite ser reutilizada en otra extracción.

En la etapa de reextracción se obtiene solución de orgánico descargado sin cobre, que es recirculada a la etapa de extracción, y una solución rica en iones de cobre de baja acidez, la que es enviada a la siguiente etapa, la electroobtención. Codelco Educa, (2019a).



5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

A₃



Lineamiento No. 13

Consideraciones operacionales de la extracción por solventes



➤ **Alcance 3**

Determinar la eficiencia de la extracción por solvente.



➤ **Información requerida**

Datos de variables operacionales.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Realizar el análisis de los datos históricos operacionales, identificando variables críticas que influyan en la eficiencia del proceso para realizar ajustes y recalibración del proceso.
- b. Determinar las relaciones de flujo orgánico / flujo acuoso, O/A, medidas en las etapas de extracción y de descarga, a fin de recircular el electrolito necesario, buscando alcanzar la razón de O/A requerida en el mezclador.
- c. Determinar el tiempo de residencia en los mezcladores.
- d. Establecer el flujo total en cada equipo (m³/min.) y la equivalencia de (m³/h) de flujo acuoso tratado.



5 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO

A

A₁



Lineamiento No. 14

Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención



➤ **Componente 1**

Condiciones del sistema eléctrico.



➤ **Alcance 1**

Definir y controlar el rango de operación de la densidad de corriente.



➤ **Información requerida**

- a. Tasa de recubrimiento esperada del cátodo esta entre 0.4 y 1 kg/h (Robinson, 2013).
- b. Rango de operación de variación de la densidad de la corriente 200 a 400 A/m² Codelco Educa, (2019a).



➤ **Actividades a desarrollar**

Para tener la seguridad de estar trabajando en el citado rango óptimo de densidad y tasa de recubrimiento, hay que tener en cuenta las siguientes acciones:

- a. Pérdidas de corriente por cortocircuitos que afecten el proceso de electrólisis.
- b. Fugas de corriente a través de la estructura (falsos contactos).
- c. Monitorear el espaciamiento entre los electrodos.
- d. Identificar la calidad del ánodo (deformidad y daños mecánicos).
- e. Medir la densidad de corriente (densidad más alta genera cátodos rugosos y disminuye la pureza del cobre y una baja densidad aumenta el tiempo de recubrimiento y no es homogéneo el recubrimiento en el cátodo).



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

A₂



Lineamiento No. 14

Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención



➤ **Alcance 2**

Mantener la conductividad óptima del sistema.



➤ **Información requerida**

- a. Consumo de energía.
- b. Rango de temperatura (45-55°C) para maximizar la conductividad eléctrica.
- c. Rango de voltaje está en aprox. 2V.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Medir la corriente en distintas celdas para asegurar que el voltaje sea el mismo en todas las áreas.
- b. **Determinar la eficiencia de corriente:** esta medición es muy importante porque refleja la relación entre el metal depositado y el que debería depositarse.
- c. Controlar la temperatura del electrolito gastado y de avance para evitar degradación de la fase orgánica o aumentar los efectos de la neblina ácida.
- d. Controlar el pH ácido del electrolito.



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

B



Lineamiento No. 14

Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención

A₁



➤ **Componente 2**

Condiciones en el medio acuoso.



➤ **Alcance 1**

Establecer y regular la composición del electrolito en la celda.



➤ **Información requerida**

- a. Composición del electrolito (g/l).
- b. Composición del agente lixivante (g/l).



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Establecer la composición del electrolito de avance (valores aproximados de 45g/L de Cu²⁺ y 170 g/L de H₂SO₄) (Mark E, 2022, pág. 445).
- b. Asegurar la circulación eficiente del electrolito en todos los cátodos de la celda para garantizar la calidad del cátodo.
- c. Introducir el electrolito en varios lugares de la celda para asegurar la circulación homogénea por todo el volumen de las celdas.
- d. Medir la composición del cobre en electrolito (técnica analítica de absorción atómica).



5 Línea Estratégica
**DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN
 HIDROMETALÚRGICA DEL MINERAL DE COBRE OXIDADO**

B



Lineamiento No. 14

Fijar condiciones de funcionamiento de la electroobtención

A₂



➤ **Alcance 2**

Determinar la contaminación en la solución.



➤ **Información requerida**

Caracterizar los metales y solventes presentes en el electrolito de avance.



➤ **Actividades a desarrollar**

- a. Realizar la medición del contenido orgánico por cromatografía de gases. (Este valor debe ser nulo o menor de 5 ppm).
- b. Determinar las concentraciones de los componentes metálicos por medio de un espectrofotómetro secuencial de plasma para identificar las concentraciones de los metales presentes en la solución. (Estas concentraciones deben ser nulas o máximo 1.5 g/L).
- c. Pasar los electrolitos de avance por tratamientos de líquido para remover impurezas de solventes y metales como las columnas de carbón activado o celdas de flotación.



Foto: Cortesía y autorización Miner S.A,
 Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
 Fuente: ATG Ltda., 2022.



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8



Línea Estratégica DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE

En esta línea estratégica se presentarán los aspectos relevantes del proceso de biolixiviación, técnica que disuelve metales en un medio acuoso, mediante bacterias específicas (thiobacillus ferrooxidans) que liberan cobre en mayor cantidad que con métodos convencionales. Estas bacterias o microorganismos, a medida que cambian las condiciones en la pila de lixiviación, los tipos de

microorganismos y su número, también varían, por lo que para procurar desarrollar los microorganismos en el proceso de lixiviación es necesario controlar variables como temperatura, aireación, y cantidad de hierro y azufre. Con base en estos parámetros y la cantidad de cepas, se busca un equilibrio que pueda estabilizar el proceso de extracción de cobre por esta tecnología.



Caracterización biológica

Cantidad de microorganismos

Tipo de bacteria y rango de trabajo



Requisitos y variables operacionales

Temperatura

pH óptimos

Concentración oxígeno, hierro y azufre

Tasa de riego y aireación

Densidad de pulpa

Potencial redox



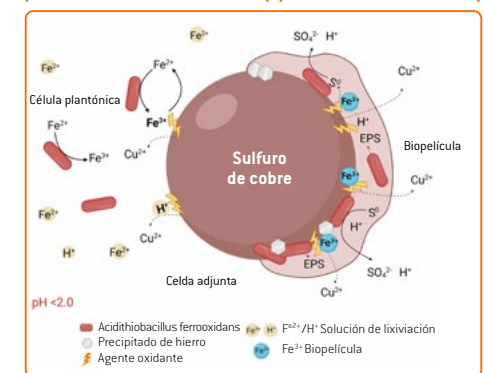
Ventajas

- Ahorro energético.
- Ahorro en combustible.
- Eliminación de emisiones.
- No se requiere secar ni fundir los minerales.
- Intervención mínima después de tener condiciones óptimas del medio bacteriano.

Desventajas

- Velocidades de reacción lentas.
- Dificultad en la adaptación bacteriana.
- Generación de drenaje ácido.
- Contenidos altos de ácido sulfúrico y metales pesados.

Mecanismos sin contacto Mecanismos de contacto



Fuente: Jung Jung, Inaba, Vardner, Oeste, & Banta, 2022.

Fuente: ATG Ltda., 2022.



Fuente: Freepik, Licencia premium



6 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE

A
A₁ **Lineamiento No. 15**
 Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación



Componente 1

Caracterización microbiológica.



Alcance 1

Control microbiológico de la operación.



Información requerida

Identificación de microorganismos presentes y su cantidad.



Actividades a desarrollar

- a. Determinar las cantidades de microorganismos con técnicas de amplificación de ADN y métodos de conteo, con los cuales analizar el crecimiento de las diferentes cepas y determinar las condiciones necesarias para el desarrollo de estos microorganismos en las condiciones del proceso de lixiviaciones.
- b. Conocer el tipo de bacteria y su rango de trabajo para realizar una mezcla de microorganismos mesófilos y termófilos que permitan tener un rango más amplio de trabajo y estabilidad en el proceso de extracción de cobre.



6 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE

A
A₂ **Lineamiento No. 15**
 Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación



Alcance 2

Requisitos operacionales.



Información requerida

- a. Temperatura de los procesos.
- b. Tiempos de residencia.
- c. pH óptimos.
- d. Identificación de metales tóxicos.
- e. Concentración de oxígeno, hierro y azufre
- f. Tasa de riego y aireación.
- g. Densidad de la pulpa.
- h. Potencial redox.



Actividades a desarrollar

- a. Medir diariamente la temperatura en las pilas para supervisar y controlar los valores que estén entre el rango de temperatura de funcionamiento de los microorganismos.
- b. Determinar los tiempos de permanencia de las colonias bacterianas teniendo en cuenta su ciclo de vida, con el objetivo de mantener las cantidades mínimas para su funcionamiento, por ejemplo, en una biolixiviación en pilas están en orden de 10¹² de bacterias por tonelada de mineral [Mark E, 2022].
- c. Encontrar el pH óptimo que debe ser compatible con la química de lixiviación, los rangos pueden variar entre pH de 1.5 a 3.



6 Línea Estratégica
DESARROLLO DE LOS PROCESOS PARA LA TRANSFORMACIÓN POR BIOLIXIVIACIÓN DEL MINERAL DE COBRE

A



Lineamiento No. 15

Garantizar el manejo de las variables críticas de la operación

A₁



- d. Realizar la medición de los metales en la solución, puesto que dependiendo de la concentración pueden ser tóxicas, desestabilizar la reacción del microorganismo y bajar el número de colonias microbiológicas. Esta medición se realiza por medio de ICP (espectrofotómetro de emisión de plasma inductivo).
- e. Identificando las especies de azufre y carbono por medio del análisis de combustión, usando instrumentos analíticos de laboratorio de absorción infrarroja como la tecnología patentada por la empresa LECO³, que permite analizar la cantidad de nutrientes disponible en la solución.
- f. Medir el potencial de Redox para determinar el grado de oxidación. En altos valores de potencial hay pasivación y una mala lixiviación.
- g. Calcular la densidad de pulpa por medio de la instrumentación. Esta es importante porque puede afectar la actividad microbiana y su crecimiento.

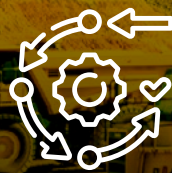
3. LECO: Laboratory equipment company. Empresa líder en soluciones analíticas de análisis térmico de alta calidad.



Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
 Fuente: ATG Ltda., 2022.



- ①
- ②
- ③
- ④
- ⑤
- ⑥
- ⑦
- ⑧



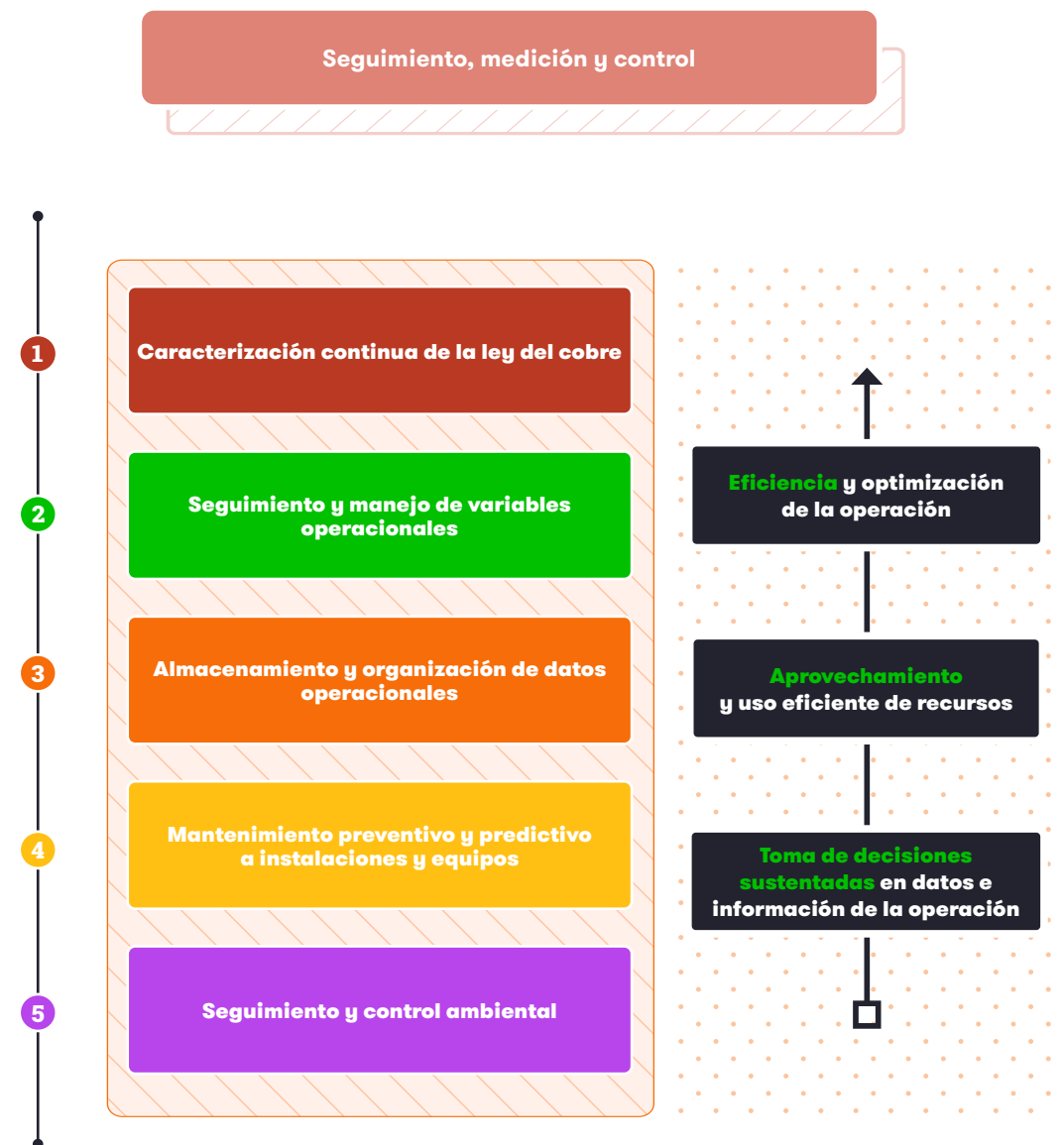
Línea Estratégica SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

Esta línea estratégica reúne las acciones encaminadas al control y manejo eficiente de los procesos de beneficio y transformación, a través de la

toma de decisiones sustentadas en el análisis y la evaluación de datos obtenidos en el seguimiento y la medición durante la operación.



Fuente: Freepik, Licencia premium



Fuente: ATG Ltda., 2022.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A
A₁

Lineamiento No. 16
Seguimiento y control a la ley de cobre del material explotado



➤ **Componente 1**

Concentración del cobre y minerales asociados.



➤ **Alcance 1**

Controlar la concentración del cobre y minerales asociados en el material de suministro a la planta.



➤ **Información requerida**

- a. Resultados de concentración de cobre y minerales asociados en el material explotado.
- b. Requerimientos de concentración de cobre y minerales asociados determinados para el suministro a la planta.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo controlar la concentración del cobre y minerales asociados para el suministro a la planta?

Desde el diseño y durante la operación se establecen valores de concentración del cobre y minerales asociados del material suministrado a la planta. Las concentraciones del cobre pueden variar dependiendo de las características geológicas del yacimiento. Si estos cambios no son contemplados, pueden ocasionar ineficiencia o afectación a los procesos. Por lo cual es necesario realizar muestreo y análisis químico continuo del material mineralizado.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A
A₁

Lineamiento No. 16
Seguimiento y control a la ley de cobre del material explotado



- **a. Procedimiento de muestreo:** toma de muestras del material mineralizado en el frente de explotación conforme al avance de la actividad.
- b. Análisis químico:** técnicas para determinar las concentraciones específicas del cobre y minerales asociados como: difracción de rayos x, fluorescencia de rayos x y espectroscopia de absorción atómica.
- c. Clasificación y mezcla:** a partir de los resultados de concentración realizar clasificación y mezcla del material explotado para garantizar la concentración de cobre establecida en el suministro a la planta.
- d. Manejo del flujo de material:** controlar el volumen de material suministrado a la planta para mantener la concentración de cobre requerida en la operación.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A
A₂

Lineamiento No. 17
Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



Componente 1

Automatización de procesos.



Alcance 2

Realizar el seguimiento y medición de las variables operacionales para garantizar la eficiencia y la seguridad de la planta.



Información requerida

- a. Especificaciones de equipos e instalaciones.
- b. Diseños y requerimientos de los procesos.
- c. Variables específicas de los procesos.



Actividades a desarrollar

Las variables operacionales son particulares para cada proyecto minero, están asociadas por ejemplo a aspectos como el diseño de la planta, tecnología de las instalaciones y equipos utilizados. Para controlar el desempeño, la eficiencia y la seguridad de los procesos, es necesario conocer el funcionamiento de los equipos y disponer de los datos de las variables operacionales a través del seguimiento y la medición, lo que se realiza de manera eficiente mediante la instrumentalización y automatización de los procesos, disminuyendo la incertidumbre y el error en la obtención de información.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A
A₂

Lineamiento No. 17
Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



¿Cómo automatizar los procesos de beneficio y transformación del cobre para garantizar la eficiencia de la planta?

- a. Implementación de sistemas continuos de adquisición y análisis de datos, por ejemplo sistemas como, el de adquisición de datos y control de supervisión (SCADA, por sus siglas en inglés) y sistema de control distribuido (DCS, por sus siglas en inglés).
- b. Instrumentalización de los procesos. A continuación, se presentan algunos ejemplos de equipos e instrumentos de monitoreo y medición para los procesos de beneficio y transformación del cobre.

» Procesos de beneficio

Proceso	Variable	Instrumento o Equipo de Monitoreo
Trituración y molienda	Granulometría	Analizadores de tamaño de partículas mecánicos o de dispersión laser
	Transporte del material	Sensores de nivel de banda transportadora
	Flujo de material	Medidores de flujo
	Nivel de llenado	Transmisores de nivel
	Densidad de la pulpa	Trasmisores de densidad

Fuente: ATG Ltda., 2022.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A

A₂

Lineamiento No. 17

Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



» Procesos de transformación

Proceso	Variante	Equipo
Flotación (Concentración)	Tamaño de la partícula	Analizadores de tamaño de partículas
	Densidad de la pulpa	Trasmisores de densidad
	Niveles de interfaz entre pulpa y espuma	Sensores y trasmisores de nivel, medidores ultrasónicos
	Tiempo de residencia y velocidad	Trasmisores
	Flujo de aire para agitación	Medidores de flujo
	pH y redox	Medidores y sensores de pH y potencial redox
	Dosificación de reactivos químicos	Medidores de flujo másico y volumétricos
Fundición	Flujo de alimentación al sistema	Trasmisores de flujo magnético y trasmisores de densidad para obtener flujo másico
	Temperatura	Termómetros especiales con termopozos de cerámica o metal, así como termocuplas hechas de metales especiales. Trasmisores de temperatura
Fundición	Filtraciones en el circuito de enfriamiento en la fundición	Detectores de filtraciones
	Lixiviación	Concentración de ácido sulfúrico
Extracción por solvente	Profundidad de fase orgánica	Medidores de nivel e interfase
Biolixiviación	pH	Medidores y sensores de pH

Fuente: ATG Ltda., 2022.

7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

B

Lineamiento No. 17

Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



» **Componente 2**

Almacenamiento de datos operacionales.



» **Alcance**

Almacenar y organizar los datos obtenidos en la medición y el monitoreo de las variables operacionales.



» **Información requerida**

Datos de monitoreo de las variables operacionales.



» **Actividades a desarrollar**

¿Cómo realizar el almacenamiento de datos operacionales?

A través del almacenamiento y la organización de datos masivos, técnica conocida como Big Data, que comprende manejo de grandes volúmenes de información y aplicación de ingeniería de redes a través de la cual se pretende la recopilación de datos históricos y en tiempo real de las variables monitoreadas y medidas en la operación.





7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

C
A₁

Lineamiento No. 17
Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



➤ **Componente 3**

Control y ajuste de la operación.



➤ **Alcance 1**

Realizar el control y ajuste de la operación.



➤ **Información requerida**

Datos operacionales almacenados y organizados.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo realizar el control y ajustes de la operación?

Para realizar el control y ajuste de la operación es necesario hacer el análisis y la evaluación de los datos obtenidos, esto a través del uso de software en el que se pueden identificar patrones, comportamientos, falencias, aspectos y variables indicativas del funcionamiento y eficiencia de los procesos de beneficio y transformación.

El control de los equipos e instalaciones puede realizarse utilizando sistemas que permiten el manejo de la instrumentalización, ajustando variables y aspectos de funcionamiento de los equipos. A continuación, se presentan algunos ejemplos aplicables a los procesos de beneficio y transformación:



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

C
A₁

Lineamiento No. 17
Realizar seguimiento y medición de las variables operacionales de la planta



Proceso	Variable	Equipo o sistema	Actividad
Trituración	Nivel de llenado	Trituradora	Modificar el flujo de material para tener el nivel de llenado óptimo, haciendo eficiente el funcionamiento del equipo según las necesidades de la operación.
Molienda	Granulometría	Molino SAG	Modificar el número de revoluciones por minuto y número de bolas utilizadas en el proceso para ajustar la granulometría del material.
Flotación	Flujo de Aire	Celdas de flotación	Modificar el flujo de aire para garantizar las características adecuadas de la burbuja.
	Nivel de espuma		Modificar el flujo de pulpa y dosificación de reactivos en las celdas de flotación para garantizar la eficiencia del proceso.
Fundición	Temperatura	Hornos	Modificar la temperatura en los hornos de fusión y conversión
Lixiviación	Concentración de ácido sulfúrico	Solución lixivante	Modificar la concentración de ácido sulfúrico utilizado en la solución aplicada en las pilas de lixiviación
Biolixiviación	Nutrientes	Solución biolixivante	Modificar las características de la solución biolixivante agregando nutrientes que permitan el desarrollo bacteriano

Fuente: ATG Ltda., 2022.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A



Lineamiento No. 18

Realizar el mantenimiento a los equipos e instalaciones de la planta



➤ **Componente 1**

Mantenimiento preventivo.



➤ **Alcance**

Mantener continuidad y eficiencia operacional.



➤ **Información requerida**

- a. Fichas técnicas de los equipos y sistemas.
- b. Datos de inspecciones y funcionamiento de equipos.



➤ **Actividades a desarrollar**

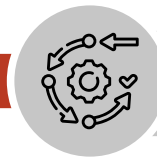
¿Cómo definir el mantenimiento preventivo de los equipos e instalaciones de la planta de beneficio y transformación?

- a. Según las fichas técnicas de los equipos y sistemas, siendo comparadas con los datos de operación de los mismos. Ejemplo, mantenimiento a partir de *Horas de trabajo / año*.
- b. Definir el mantenimiento a partir de la identificación de desgastes o ineficiencias de los equipos y sistemas a través de la inspección rutinaria. Ejemplo, desgaste de componentes o partes de los equipos.
- c. Para garantizar la continuidad operacional se debe contar con equipos de respaldo que sean utilizados durante la ejecución del mantenimiento preventivo.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

B



Lineamiento No. 18

Realizar el mantenimiento a los equipos e instalaciones de la planta



➤ **Componente 2**

Mantenimiento predictivo.



➤ **Alcance**

Mantener continuidad y eficiencia operacional.



➤ **Información requerida**

Fichas técnicas y hoja de vida de los equipos y sistemas en el proceso.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo definir el mantenimiento predictivo de los equipos e instalaciones de la planta de beneficio y transformación?

- a. Análisis de datos para identificar el funcionamiento de los equipos y los sistemas aplicando software para predecir posibles fallas o ineficiencia que puedan ser corregidos desarrollando mantenimiento predictivo.
- b. Para garantizar la continuidad operacional se debe contar con equipos de respaldo que sean utilizados durante la ejecución del mantenimiento predictivo.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A



Lineamiento No. 19
Seguimiento y control ambiental



➤ **Componente 1**

Calidad del medio ambiente.



➤ **Alcance**

Garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.



➤ **Información requerida**

- a. Normatividad ambiental vigente.
- b. Resultados de monitoreo de del recurso hídrico, suelo y aire.
- c. Identificación de los residuos generados en la operación.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo garantizar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente?

Recurso hídrico

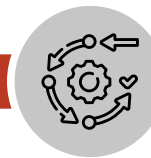
Cumplimiento del Decreto 631 de 2015, MADS o el que haga sus veces.

- a. Caracterización del agua residual generada en cada uno de los procesos de beneficio y transformación para establecer tratamiento y potencialidad de reutilización.
- b. Monitoreo continuo en punto de vertimiento.
- c. Monitoreo continuo aguas arriba y abajo del cuerpo de agua superficial en donde se realiza el vertimiento.
- d. Para procesos de lixiviación, monitoreo de las propiedades físico químicas del agua proveniente de fuentes de aguas subterráneas, a través de pozos de monitoreo.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A



Lineamiento No. 19
Seguimiento y control ambiental



- e. En el desarrollo de la biolixiviación, es necesario realizar monitoreo continuo de la posible generación de Drenaje Ácido Minero que puede afectar el suelo o fuentes de agua superficiales y subterráneas (ver, Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con Drenajes Ácidos Mineros (DAM), Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Recurso suelo

- a. En el desarrollo de la lixiviación de óxidos de cobre, es necesario realizar monitoreo continuo mediante la toma de muestras de suelo para identificar posible contaminación derivada de filtraciones por fallas en la impermeabilización del terreno.
- b. Dado que los relaves generados en los procesos de beneficio y transformación del cobre son dispuestos a través de presas o depósitos de relaves, la calidad del suelo y la estabilidad del terreno deben ser monitoreadas de manera continua, (ver Propuesta de lineamientos técnicos de política de buenas prácticas para estandarizar los procesos relacionados con presas de relaves, Ministerio de Minas y Energía, (2021)); ya que se puede ver afectada la operación y la comunidad habitante del área por eventos como fenómenos de remoción en masa.

Calidad del aire

Cumplimiento de los niveles máximos permisibles definidos en la normatividad de calidad del aire vigente (Resolución 2254 de 2017, Decreto 1076 de 2015 Único Reglamentario del Sector Ambiente, MADS, o quien haga sus veces).

- a. Control de material particulado en los procesos de trituración y molienda.
- b. Monitoreo, manejo y tratamiento continuo de los gases generados en el proceso de fundición.



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

A



Lineamiento No. 19
Seguimiento y control ambiental



➤ **Ruido**

Evaluando los parámetros establecidos en los estándares máximos de emisión de ruido y ruido ambiental (Resolución 627 de 2006, MADS o la entidad que haga sus veces).

- a. Suministro de elementos de protección auditiva para el personal que se encuentre en la planta de beneficio y transformación.
- b. Instalación de barreras y/o paredes acústicas para disminuir la emisión de ruido ambiental.
- c. Mantenimiento de equipos para un buen funcionamiento.

Residuos sólidos

En los procesos de beneficio y transformación del cobre se generan residuos sólidos que deben ser manejados buscando aplicar principios de economía circular para su reutilización, reciclaje y reúso. Por otro lado, los residuos peligrosos deben ser gestionados considerando su almacenamiento temporal, movilización y disposición final, según lo establecido en la normatividad vigente (Decreto 1076, 2015, Título 6).



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

B



Lineamiento No. 19
Seguimiento y control ambiental



➤ **Componente 2**

Uso eficiente de recursos.



➤ **Alcance**

Controlar el uso de recursos en el desarrollo del proceso productivo.



➤ **Información requerida**

- a. Entradas y salidas de materia y energía de los procesos.
- b. Mediciones de consumo de recursos.



➤ **Actividades a desarrollar**

¿Cómo controlar el uso de recursos en el desarrollo del proceso productivo?

El recurso hídrico y la energía eléctrica son fundamentales para el funcionamiento de equipos e instalaciones propias de los procesos de beneficio y transformación, donde su gestión y uso eficiente tienen incidencia directa en aspectos técnicos, operacionales, ambientales y económicos. Por tal motivo es necesario implementar estrategias encaminadas a su optimización.

- a. Medición continua del volumen de agua utilizada y consumo eléctrico en los procesos unitarios de beneficio y transformación.
- b. Aplicar indicadores que permitan establecer el uso eficiente de recursos. Estos pueden ser aplicados al proceso y a rendimiento de equipos, Por ejemplo:

Indicador consumo de energía:

Consumo por unidad de producto o cantidad de energía eléctrica necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de energía} = \frac{\text{Consumo total de energía [mes]}}{\text{Toneladas de concentrado producidas [mes]}}$$



7 Línea Estratégica
SEGUIMIENTO, MEDICIÓN Y CONTROL

B



Lineamiento No. 19
Seguimiento y control ambiental



Indicadores uso eficiente de agua

- a. **Consumo de agua:** consumo por unidad de producto o cantidad de agua necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Volumen de agua (m}^3\text{)}}{\text{Toneladas de concentrado (Ton)}}$$

- b. **Gestión del recurso:** permite estimar el consumo por unidad de producto o cantidad de agua necesaria para producir una unidad de producto.

$$\text{Consumo de agua} = \frac{\text{Volumen de agua recirculada en el proceso (m}^3\text{)}}{\text{Volumen de agua utilizada en el proceso (m}^3\text{)}}$$

Indicadores de manejo de subproductos generados en el beneficio y transformación del cobre

- a. **Gestión de relaves:** evidencia la gestión de los relaves generados a través de su aprovechamiento

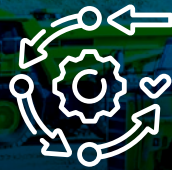
$$\text{Gestión de relaves} = \frac{\text{Relaves generados (Ton)}}{\text{Relaves aprovechados (Ton)}}$$



Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó.
Fuente: ATG Ltda., 2022.



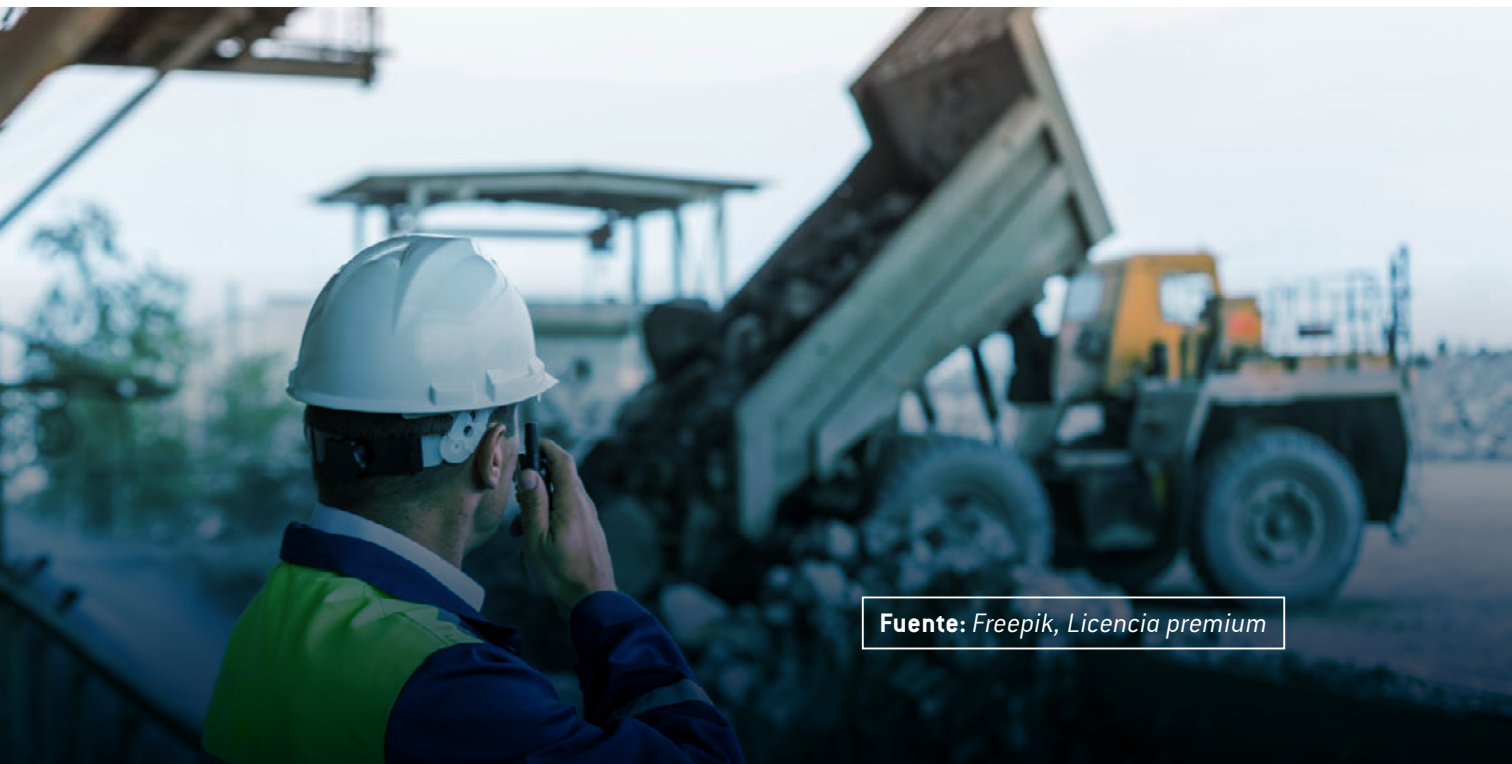
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8



Línea Estratégica ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

Esta línea estratégica reúne las acciones a desarrollar durante las labores asociadas a los procesos de beneficio y transformación del cobre, constituye una herramienta fundamental

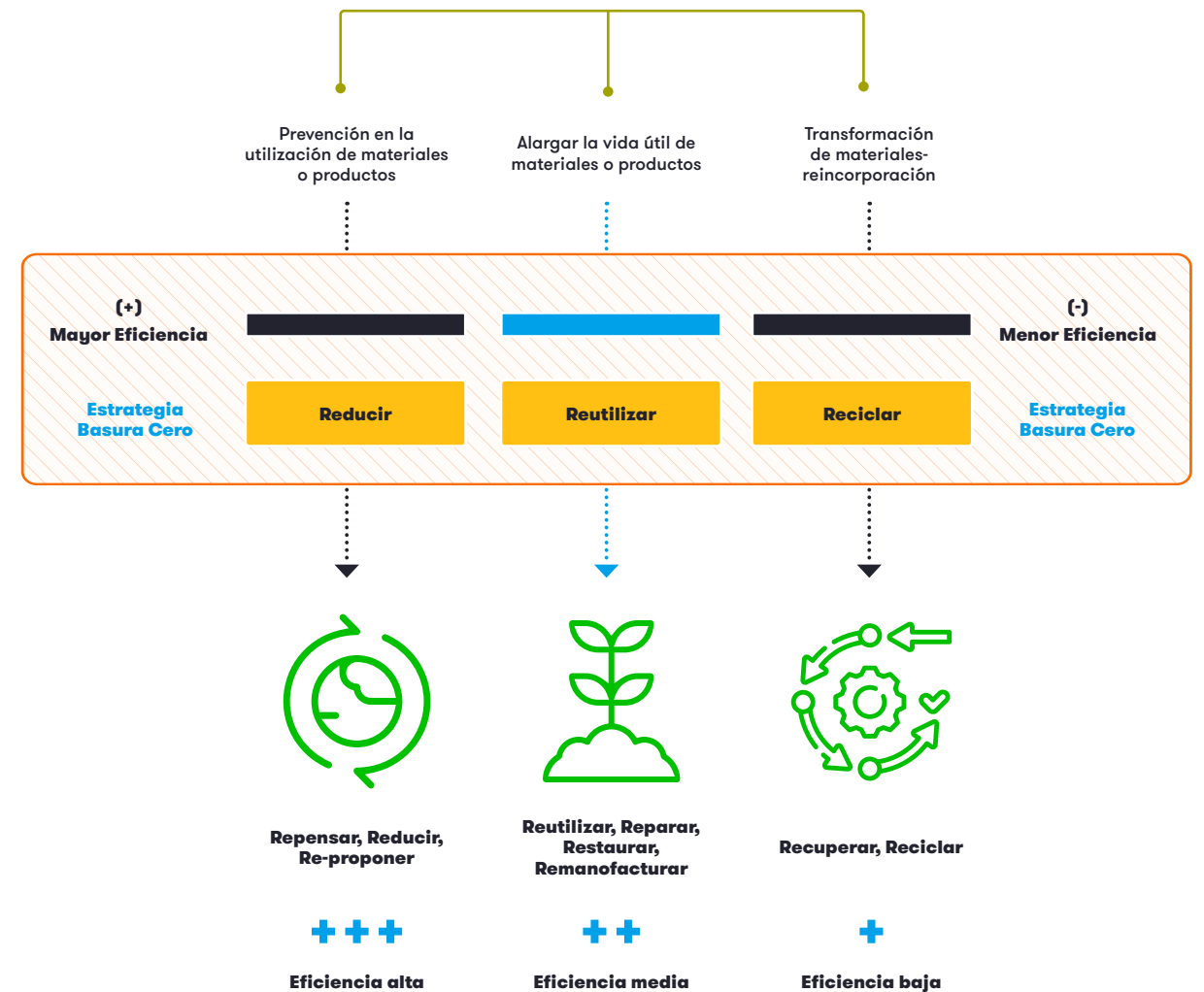
para identificar e implementar las medidas que permitan reducir, reusar y/o reciclar (modelo de Basura Cero- 3R) los materiales, agua y/o energía en los procesos.



Fuente: Freepik, Licencia premium




Modelo de Basura Cero herramienta de la Estrategia Nacional de Economía Circular



Fuente: Adaptado de Memorias XII Congreso Internacional del Medio Ambiente. Economía Circular una herramienta para el desarrollo de los ODS, 2019.



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A  **Lineamiento No. 20**
Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre



➤ **Componente 1**

Circularidad en el proceso de trituración y molienda para el beneficio del cobre.



➤ **Alcance**

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.



➤ **Información requerida**

Identificar operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.



➤ **Actividades a desarrollar**

Flujos de agua


- a. Realizar la caracterización fisicoquímica de los flujos de agua para conocer su calidad.
- b. Determinar volumen y/o caudal generado, variaciones en el tiempo y tipo de almacenamiento.

Flujos de materiales/ residuos [metales asociados al proceso de explotación]

- a. Determinar las características identificando sus contenidos y propiedades.
- b. Determinar volumen generado y tipo de almacenamiento.
- c. Identificar las fuentes, cantidades, variaciones en el tiempo y calidad.



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A  **Lineamiento No. 20**
Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre



➤ **Flujos de energía:**

- a. Realizar la caracterización energética del proceso (cualitativa y cuantitativa).
- b. Elaboración de gráficos de consumo y producción en el tiempo para determinar la variación del consumo de energía en paralelo con la producción obtenida durante un periodo de tiempo.
- c. Identificar y establecer los índices de eficiencia y plantear metas de reducción de pérdidas en el consumo de energía.

Medidas de reducción, reúso y reciclaje en los procesos de trituración y molienda

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Reducción de pérdidas de mineral.	Flujo de materiales-residuos
	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
Reúso	Recirculación de agua residual con la calidad requerida en el proceso.	Flujo de agua
Reciclaje	Reciclaje de residuos metálicos.	Flujo de materiales-residuos

Fuente: ATG Ltda., 2022.



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₁

Lineamiento No. 20
Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre



➤ **Componente 2**

Circularidad en el proceso de concentración del cobre.



➤ **Alcance 1**

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.



➤ **Información requerida**

Identificar operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.



➤ **Actividades a desarrollar**

Flujos de agua

- a. Realizar la caracterización fisicoquímica de los flujos de agua para conocer su calidad.
- b. Determinar volumen y/o caudal generado, variaciones en el tiempo y tipo de almacenamiento.

Flujos de materiales/ residuos (relaves deshidratados)

- a. Determinar las características identificando sus contenidos y propiedades.
- b. Determinar volumen producido y frecuencia de producción.

Flujos de energía

- a. Realizar la caracterización energética del proceso (cualitativa y cuantitativa).
- b. Elaboración de gráficos de consumo y producción en el tiempo para determinar la variación del consumo de energía en paralelo con la producción obtenida durante un periodo de tiempo.



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B
A₁

Lineamiento No. 20
Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre



- c. Identificar y establecer los índices de eficiencia y plantear metas de reducción de pérdidas en el consumo de energía.

Medidas de reducción, reúso y reciclaje en el proceso de concentración

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/ materiales-residuos/ agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
Reúso	Reúso-recirculación de agua de procesos con la calidad requerida (Agua del espesamiento y filtrado del concentrado y de relaves deshidratados).	Flujo de agua
	Aprovechar los subproductos generados en el proceso mediante su reutilización, ej Relaves filtrados para procesos de retrolenado de la mina.	Flujo de materiales-residuos

Fuente: ATG Ltda., 2022.



8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B

A₂



Lineamiento No. 20

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de beneficio del cobre



Alcance 2

Identificar materiales dispuestos en depósitos de relaves con potencial de recuperación y/o aprovechamiento (biolixiviación de relaves).



Información requerida

- a. Ubicación y descripción detallada de las zonas de disposición de relaves.
- b. Tipo de material dispuesto (identificar la composición teniendo así la posibilidad de determinar qué minerales tienen potencial de recuperación y/o aprovechamiento).
- c. Método de disposición del material, edad del depósito, volúmenes y secuencia de llenado, así como algunas observaciones que se consideren pertinentes para conocer las características del depósito y de los materiales.



Actividades a desarrollar

Caracterización del mineral recuperable y/o aprovechable en depósitos de relave para procesos de biolixiviación

- a. Pruebas físicas (granulometría).
- b. Pruebas químicas de laboratorio (análisis de nutrientes presentes, tipos de microorganismos, diseminación de los minerales, análisis de liberación del mineral).
- c. Análisis químico para determinar la cantidad remanente de minerales de interés en los relaves.
- d. Pruebas hidrometalúrgicas (columnas bacterianas variando temperaturas, entre otras).
- e. Simulaciones tales como mCell, para identificar variables importantes en el funcionamiento de la microbiología.



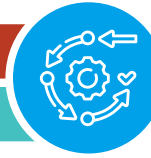
8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A

A₁



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Componente 1

Circularidad en procesos pirometalúrgicos.



Alcance 1

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de secado de concentrados y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.



Información requerida

Identificar operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.

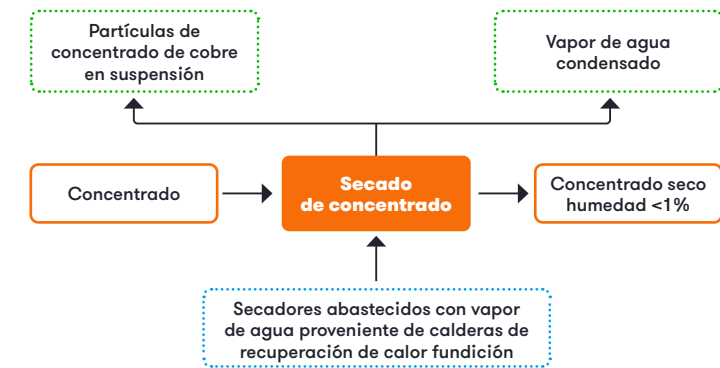


Diagrama de circularidad en el secado de concentrados de cobre. Fuente: ATG Ltda., 2022.



8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A

A₁



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Actividades a desarrollar

Flujos de agua: el agua es usada en el proceso de secado del concentrado en forma de vapor cuya temperatura puede oscilar desde 180°C hasta 300°C. Asimismo, se produce vapor de agua condensado el cual se puede dirigir a un estanque recuperador de condensados para su posterior reutilización.

Flujos de materiales (concentrado de cobre): corresponden principalmente a las partículas de concentrado de cobre que se encuentran en suspensión en el vapor generado en el secado.

Flujos de energía: corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos para el secado del concentrado. Los equipos requieren de electricidad y combustible y en general, la principal fuente energética corresponde a combustibles.

Medidas de reducción, reúso y reciclaje proceso de secado de concentrados

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/ materiales-residuos/ agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
Reúso	Reúso de vapor de agua Reúso de vapor de agua para el desarrollo del proceso, el cual proviene generalmente de la temperatura emitida por las calderas de recuperación de calor de los gases generados en la fundición.	Flujo de agua
	Recuperación de partículas en suspensión Recuperación de partículas de polvo del vapor producido durante el secado, las cuales pasan por un filtro de mangas en donde se recuperan las partículas sólidas, las que se dirigen y adicionan a la tolva de almacenamiento de concentrado seco que ya pasó por el proceso de secado.	Flujo de materiales
	Recuperación de condensados El vapor de agua condensado (líquido) se dirige a un estanque recuperador de condensados para su posterior reutilización.	Flujo de agua

Fuente: ATG Ltda., 2022.



8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A

A₂



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



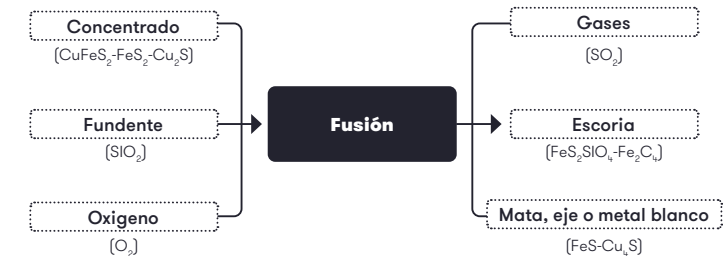
Alcance 2

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de la Fundición de concentrados y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

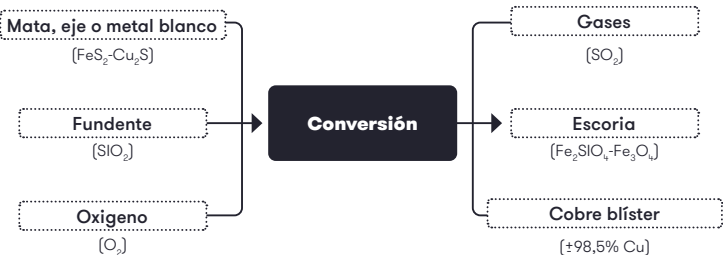


Información requerida

Determinar y definir claramente las entradas y salidas en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso de fundición de cobre con las operaciones unitarias de fusión, conversión y pirorrefinación.



Esquema de insumos y productos del proceso de fusión de concentrados de cobre. Fuente: [Comisión Chilena de Cobre - COCHILCO, 2015].



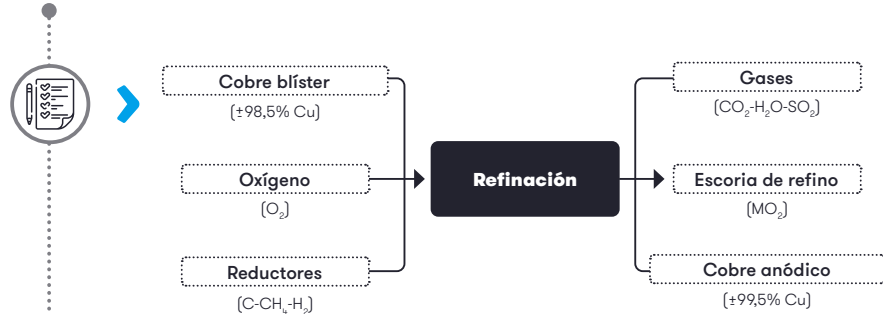
Esquema de insumos y productos del proceso de conversión de mata de cobre. Fuente: [Comisión Chilena de Cobre - COCHILCO, 2015].



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A
A₂ **Lineamiento No. 21**

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Esquema de insumos y productos del proceso de refinación de cobre blíster.
Fuente: [Comisión Chilena de Cobre - COCHILCO, 2015]

Actividades a desarrollar

Flujos de agua: el agua usada en el proceso de fundición puede ser condensada y recirculada en su totalidad dentro del mismo proceso, lo que generaría una mínima emisión de vapor de agua.

Flujos de materiales [metal blanco y escoria] / gases primarios: corresponden principalmente a las partículas de metal blanco y escoria que se encuentran en suspensión en el vapor generado en la fusión y las de escoria que se generan en los procesos de conversión y refinación. Asimismo, se pueden recuperar gases primarios en una planta de limpieza de gases para la producción de ácido sulfúrico requerido para procesos dentro del mismo proyecto.

Flujos de energía: corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de los hornos de fusión, conversión y pirorrefinación.



8 Línea Estratégica
ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A
A₁ **Lineamiento No. 21**

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre

Medidas de reducción, reúso y reciclaje en el proceso de fundición

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/ materiales-residuos/ agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/ materiales-residuos/ agua
Reúso	Recuperación de mata Fusión secundaria de escoria.	Flujos de materiales/ residuos (escorias)
	Recuperación de vapor Reúso de vapor saturado proveniente de las calderas de recuperación de calor de los gases generados en los respectivos hornos de fusión y conversión.	Flujo de Agua
	Recuperación de partículas en suspensión Los gases generados por la extracción (metal blanco y escoria), son captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al horno de fusión).	Flujo de materiales
Reciclaje	Recuperación de gases primarios para la producción de ácido sulfúrico La recuperación se realiza en plantas de limpieza de gases cuyo objetivo es acondicionar los gases metalúrgicos primarios (SO ₂ humo, vapores metálicos, partículas de cobre arrastradas y material particulado) para su utilización como insumo en la producción de ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄).	Flujo de materiales
	Escoria La escoria de cobre se emplea en diversos sectores productivos como sustituo parcial del cemento hidráulico, en gravilla para líneas de ferrocarriles, como árido en mezclas asfálticas de obras civiles, como árido constituyente de los morteros y hormigones de cemento, como abrasivos para la limpieza por chorros de arena en estructuras metálicas y en bloques moldeados de escoria para la albañilería.	Flujos de materiales

Fuente: ATG Ltda., 2022.



8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

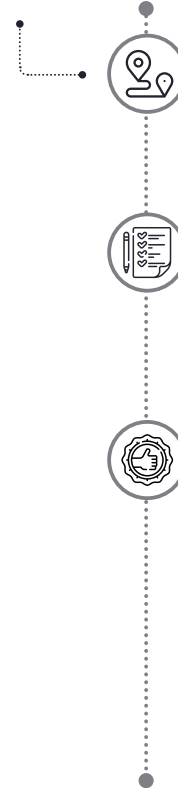
A

A₃



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Alcance 3

Identificar y cuantificar los sobrantes del proceso de electrorrefinación y el potencial desarrollo de prácticas de reducción, reúso y/o reciclaje.

Información requerida

Determinar para el proceso de electrorrefinación las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.

Actividades a desarrollar

Flujos de agua: el agua es usada en el proceso de electrorrefinación para preparar las soluciones de las celdas electrolíticas.

Flujos de materiales (soluciones de las celdas electrolíticas y ánodos de cobre): corresponden principalmente a las soluciones usadas en las celdas electrolíticas (H₂SO₄+ H₂O). Asimismo, se usan los ánodos de cobre provenientes del proceso de fundición.

Flujos de energía: corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de las celdas electrolíticas.

8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

A

A₃



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Medidas de reducción, reúso y reciclaje en el proceso de electrorrefinación

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
Reúso	Reúso de soluciones Recalibración de las concentraciones de las soluciones.	Flujo de materiales
Reciclaje	Reciclaje de ánodos: Al final de un ciclo, cada ánodo ha sido disuelto electroquímicamente en casi el 85%. Los restos de los ánodos sin disolver (desperdicio o chatarra) se retiran de las celdas y después de lavados, se funden y se vuelven a vaciar como ánodos nuevos.	Flujo de materiales
	Recuperación de metales preciosos del lodo anódico Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son transportados a la planta de recuperación de metales preciosos.	Flujo de materiales

Fuente: ATG Ltda., 2022.





8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Componente 2

Circularidad en procesos hidrometalúrgicos.



Alcance

Identificar y cuantificar los sobrantes (salidas de agua y/o materiales) para determinar su potencial de reúso.



Información requerida

Determinar para el proceso de transformación hidrometalúrgica las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.



Actividades a desarrollar

Flujos de agua: el agua es usada en el proceso de transformación hidrometalúrgica como insumo fundamental para el sistema de riego y goteo de la mezcla de $H_2SO_4 + H_2O$ para el desarrollo del proceso de lixiviación. El agua también es usada en las etapas de extracción por solvente y en el proceso de electroobtención.

Flujos de materiales (ácidos, solventes, soluciones de lixiviación y rípios de lixiviación): los reactivos normales en el proceso de lixiviación suelen ser ácido sulfúrico para minerales oxidados y sulfato férrico acidificado en medio oxidante, para minerales sulfurados. Asimismo, son usadas resinas orgánicas para la captura de los iones de cobre en el proceso de extracción por solvente. El material no diluido en el proceso de lixiviación o rípio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal.

Flujos de energía: corresponde a la energía requerida para el funcionamiento de los equipos para la extracción por solvente y de las celdas electrolíticas.



8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

B



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



Medidas de reducción, reúso y reciclaje en el proceso de hidrometalurgia

Tipo de medida	Descripción	Tipo de flujo
Reducción	Mejoras en la eficiencia del proceso productivo.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
	Mejoras tecnológicas dentro del proceso.	Flujo de energía/materiales-residuos/agua
Reúso	Recolección y reúso de soluciones Recolección por medio de sistema de canaletas en las pilas de lixiviación. Recalibración de las concentraciones de las soluciones para su posterior reúso.	Flujo de materiales
	Reúso-Recirculación de agua de procesos con la calidad requerida.	Flujo de agua
	Reúso de rípio de lixiviación El material no diluido en el proceso de lixiviación o rípio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de lixiviación para extraer más metal.	Flujo de materiales
Reciclaje	Recuperación de metales preciosos del lodo anódico Se retira el electrolito de las celdas y los residuos del ánodo se canalizan hacia un sistema de donde se recolectan y desde donde son transportados a la planta de recuperación de metales preciosos.	Flujo de materiales
	Rípios de lixiviación Usos alternativos. Ej. Uso en hormigones de cemento de estructuras secundarias, de corta vida útil y en ambientes de desempeño de baja humedad.	Flujo de materiales

Fuente: ATG Ltda., 2022.

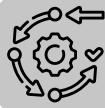


8

Línea Estratégica

ECONOMÍA CIRCULAR EN LOS PROCESOS DE BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

C



Lineamiento No. 21

Potencializar el desarrollo de prácticas para reducir, reusar y/o reciclar en los procesos de transformación del cobre



➤ **Componente 3**

Circularidad en el proceso de biolixiviación.



➤ **Alcance**

Identificar y cuantificar los sobrantes (salidas de agua y/o materiales) para determinar su potencial de reúso.



➤ **Información requerida**

Determinar para el proceso de Biolixiviación las operaciones unitarias y definir claramente las entradas y salidas de cada una en términos de flujos de Materiales, Agua, Energía y demás asociados al proceso.



➤ **Actividades a desarrollar**

Flujos de agua: el agua es el recurso más usado en el proceso de Biolixiviación.

En este proceso se identifica potencial desarrollo de circularidad en términos de recuperación y reúso de aguas ácidas generadas por la acción de las bacterias. Se puede considerar el reúso de aguas asociadas a Drenaje Ácido de Mina (DAM).

Flujos de materiales (ripios de biolixiviación): el material no diluido en el proceso de biolixiviación o ripio se transporta a botaderos donde se podría iniciar un segundo proceso de biolixiviación para extraer más metal.

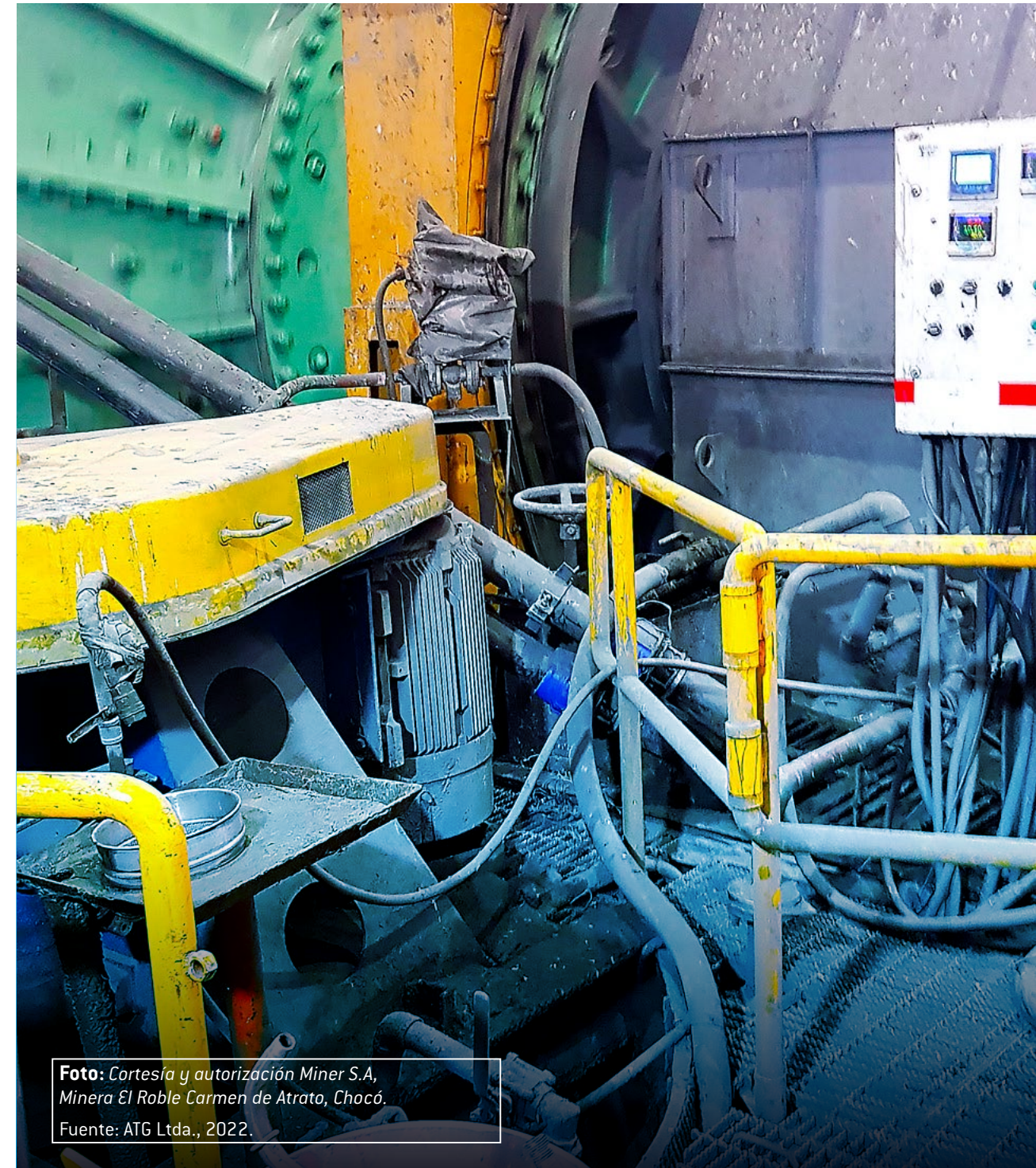


Foto: Cortesía y autorización Miner S.A, Minera El Roble Carmen de Atrato, Chocó. Fuente: ATG Ltda., 2022.



09

CONCLUSIONES

1

La caracterización del mineral y productos generados (concentrado, cobre blíster, cátodos, ánodos, residuos, etc.) en cada proceso de beneficio y transformación del cobre es fundamental para planificar, diseñar y operar la planta.

2

Se deben simplificar los circuitos de beneficio y transformación utilizando equipos y tecnología más eficiente, que optimice la operación, garantice seguridad y minimicen el impacto ambiental.

3

La medición, seguimiento y control a través de la automatización e instrumentalización de equipos e instalaciones es fundamental para lograr eficiencia en los procesos de beneficio y transformación, minimizando la incertidumbre en la toma de decisiones.

4

Se deben establecer flujos de materia y energía en cada proceso para desarrollar la gestión de calidad, ambiental y aplicar principios de Economía Circular.

5

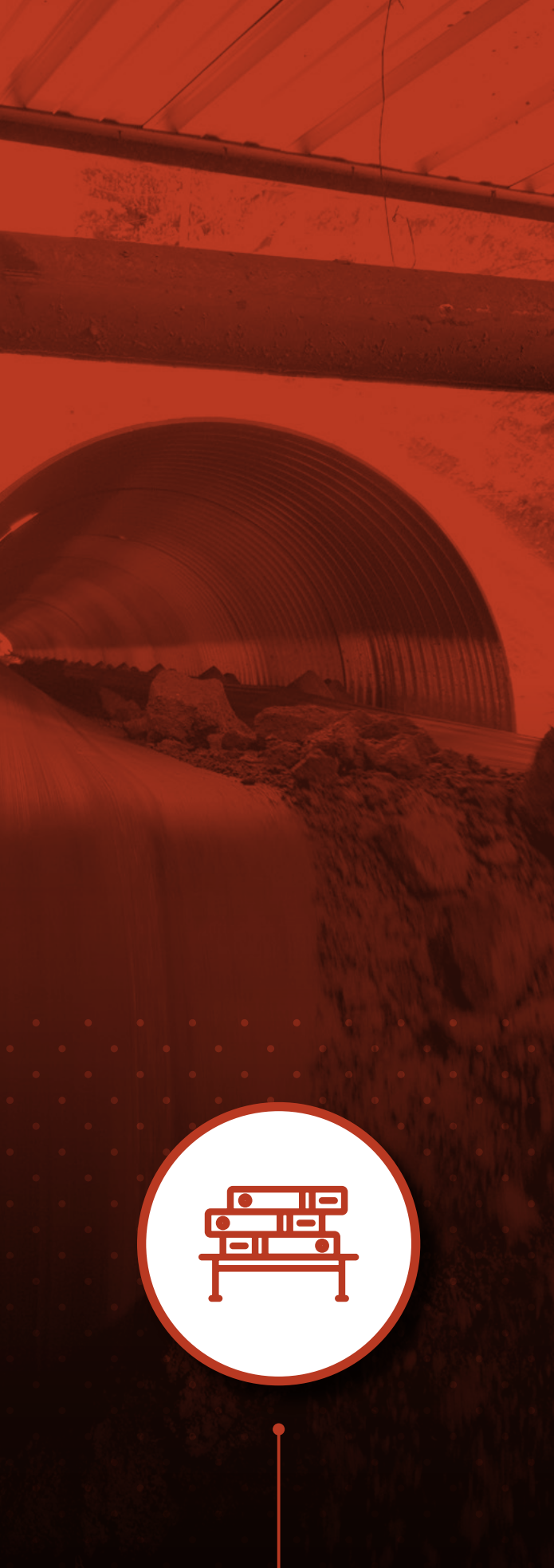
Se requiere conocer las consideraciones básicas del diseño y parámetros operativos para obtener la mayor eficiencia en el beneficio y transformación del cobre.

6

Implementar un proceso con buenas prácticas en cada operación unitaria impactará en el buen uso de los recursos aprovechables, con el mínimo uso de agentes químicos y energía en los procesos.

7

En el ejercicio de diseñar, planificar y operar la planta el objetivo es proyectar operaciones capaces de producir el producto final de cobre (concentrado, ánodo o cátodo) y subproductos a partir de un mineral de cobre determinado para lograr la capacidad esperada, a un costo de capital apropiado, teniendo en cuenta todas las restricciones operativas, ambientales y sociales.



10

BIBLIOGRAFÍA





- Andrades, R.A. (2016). *Estandarización del proceso planificación minera del presupuesto división El Teniente*. Chile. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/141058/Estandarizacion-del-proceso-planificacion-minera-del-presupuesto-revision-0-Division-El-Teniente-Codelco-Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- AngloGold Ashanti. (s.f.). *Quebradona Esencia para la transición energética*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://anglogoldashanticolombia.com/portfolio/quebradona/>
- Arriagada, M. A. (2013). *Hidrometalurgia - Curso de Molienda (Primera Parte)*. Obtenido de es.slideshare.net/miguelangelarriagada/molienda-24994633
- ATG Ltda. (2022). *Asesorías Técnicas y Geológicas*.
- Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA. (6 de octubre de 2022). *Proyectos de Interés en Evaluación Soto Norte*. Obtenido de https://www.anla.gov.co/01_anla/documentos/normativa/leyes/177.pdf
- Ávila Pinto, R. (2021). *Libro blanco del cobre en Colombia*. Colombia.
- Bnamericas (2022). *Bajo la lupa: los desafíos de las fundiciones de cobre de Chile*. (junio 30 de 2022) <https://www.bnamericas.com/es/reportajes/bajo-la-lupa-los-desafios-de-las-fundiciones-de-cobre-de-chile>
- Boletín Agrario. *Xantato - ¿Qué es xantato? - significado, definición, traducción y sinónimos para xantato*. Obtenido de <https://boletinagrario.com/ap-6,xantato,821.html>
- Bravo Gálves, A. C. (2003). *Manual de molienda y clasificación empresa minera Yauliyacu S.A. Casapalca*.
- Britannica. (n.d.). *mate | metalurgia | británica*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.britannica.com/technology/matte-metallurgy>
- Bustamante Escobedo, M. (2020). *Diseño óptimo de circuitos de flotación*. https://inglomayor.cl/edicion_18/a/paper4.pdf
- Centro de Inversión Sostenible de la Universidad de Columbia [CCS]. (2016). *Cartografía de la minería en relación con los objetivos de desarrollo sostenible*. https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/publications/Mapping_Mining_SDGs_An_Atlas_SP.pdf
- Codelco Educa. (2018a). *Biolixiviación "Bacterias come-piedras"*. Chile. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004857/biolixiviacion_media_t_cnico_060119.pdf
- Codelco Educa. (2018b). *Chancado "Reduciendo la roca"*. Chile. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109004934/chancado_media_t_cnico_060119.pdf
- Codelco Educa. (2019a). *Electroobtención "Obteniendo la máxima pureza"*. Chile. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005004/electroobtencion_media_t_cnico_060119.pdf
- Codelco Educa. (2019b). *Electrorrefinación "Ánodos y cátodos se encuentran"*. Chile. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005034/electrorrefinacion_media_t_cnico_060119.pdf
- Codelco Educa. (2019c). *Flotación "Burbujas de cobre"*. Chile. <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- Codelco Educa. (2019d). *Lixiviación "El riego"*. Chile. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixivacion_media_t_cnico_080119.pdf
- Codelco Educa. (s.f.)c. *Fundición "Recién salido del horno"*. Chile: Codelco Educa. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/fundicion.html#:~:text=%22Reci%C3%A9n%20salido%20del%20horno%22,un%20cobre%20de%20mayor%20pureza.>
- Codelco Educa. (s.f.)a *Exploración "En búsqueda del metal rojo"*. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20181204/asocfile/20181204185608/exploracion_media_t_cnico_060119.pdf
- Codelco Educa. (s.f.)b. *Extracción subterránea: El cobre profundo*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/extraccion.html#:~:text=Extracci%C3%B3n%20es%20la%20etapa%20que,de%20cobre%20de%20alta%20pureza.>
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2007). *Buenas Prácticas y uso eficiente de agua en la industria Minera*. Chile. https://www.academia.edu/30924783/BUENAS_PR%C3%81CTICAS_Y_USO_EFICIENTE_DE_AGUA_EN_LA_INDUSTRIA_MINERA
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2015a). *Tecnologías en fundiciones de cobre*. Ministerio de Minería de Chile. https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2015b). *Reseña de la Innovación Tecnológica en la Minería del Cobre: "El Caso Codelco"*. Chile. <https://docplayer.es/11955517-Resena-de-la-innovacion-tecnologica-en-la-mineria-del-cobre-el-caso-codelco-dg-12-05.html>
- Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO]. (2017). *Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades*. Chile. https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/sulfuros%20primarios_desaf%C3%ADos%20y%20oportunidades.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (29 de Marzo de 2022). *CONPES 4075 de 2022*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.) a. *Biolixiviación*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://www.codelco.com/sustentabilidad/publicaciones/informe-sustentable/biolixiviacion>
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.) b. *Glosario*. https://www.codelco.com/flipbook/reporte_sustentabilidad/2011/sitio/pdf/glosario.pdf
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. [Codelco] (s.f.) c. *Glosario de conceptos mineros*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de https://www.codelco.com/glosario/prontus_codelco/2016-06-22/175933.html
- Decreto 1076 de 2015. [Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. 26 de mayo de 2015. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=7153
- Decreto 284 de 2018 [Departamento Administrativo de la Función Pública]. Por el cual se adiciona el Decreto 10476 de 2015, Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la Gestión Integral de Aparatos Eléctricos y electrónicos -RAEE y se dictan otras disposiciones. 15 de febrero de 2018. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=85199
- Delgado Abril, G. G. (2016). *Operaciones en planta concentradora de mineral polimetálico y óxidos de plomo – plata - cobre de sociedad minera corona S.A. Perú*.
- Departamento Nacional de Planeación. (2016, 21 de noviembre). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*. (Documento CONPES 3874). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016, 8 de agosto). *Política Nacional de Desarrollo Productivo de 2016*. (Documento CONPES 3866). <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016, 8 de agosto). *Política Nacional de Desarrollo Productivo*. (Documento CONPES 3866). <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018, 10 de julio). *Política de crecimiento verde*. (Documento CONPES 3934). <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Pol%C3%ADtica%20CONPES%203934/CONPES%203934%20-%20Pol%C3%ADtica%20de%20Crecimiento%20Verde.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018, 15 de marzo). *Estrategia para la Implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia*. (Documento CONPES 3918). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3918.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2022, 29 de marzo). *Política de Transición Energética*. (Documento CONPES 4075). <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4075.pdf>
- Dirección de Asuntos Ambientales Sectorial y Urbana del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [DAA-SU-MADS] (2020). *Listado de impactos ambientales específicos en el marco del licenciamiento ambiental*. <https://www.andi.com.co/Uploads/listado-de-impactos-ambientales-espec%C3%ADficos-en-el-marco-del-licenciamiento-ambiental.pdf>
- Domic Mihovilovic, E. M. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Santiago, Chile.
- Doroteo Reyes, E. (2009). *Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos*.
- Ellen MacArthur Foundation (s.f.). *Introducción a la economía circular ¿Qué es una economía circular?* Recuperado el 6 de Octubre de 2022 de <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- FAusIMM, M. R., P.Geo., R. S., & FAusIMM, B. D. (2022). *Reporte técnico NI 43 - 101*. Colombia.
- Freeport - McMoRan (s.f.). *La marca del cobre*. Recuperado el 30 de septiembre de 2022 de <https://www.fcx.com/sustainability/coppermark>





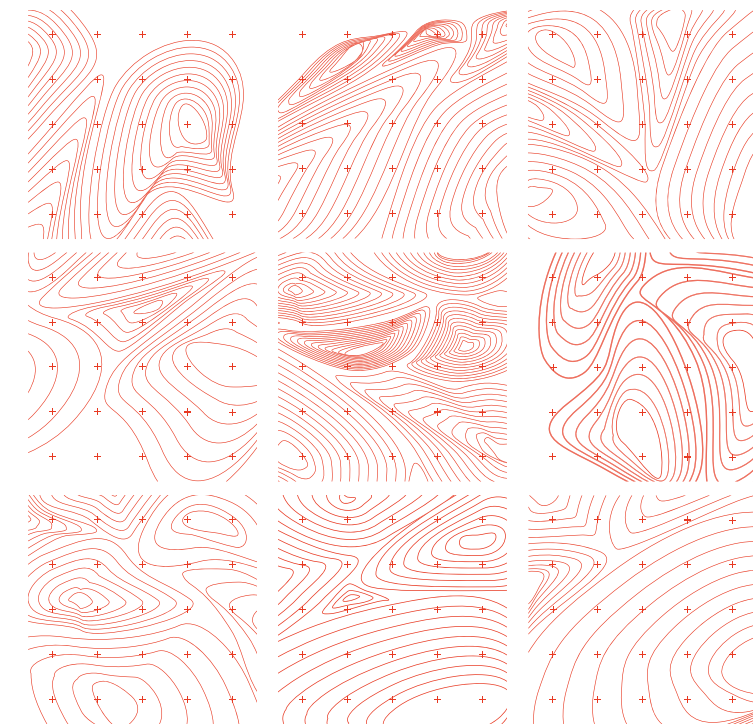
- Gardez Incivil. (2021). *Procesos de la Hidrometalurgia del Cobre*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=UFB7pUQ1U44&t=29s>
- Gobierno de Chile - Consejo Minero. (6 de Octubre de 2022). *Uso Eficiente de Aguas en la Industria Minera y Buenas Practicas*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/view/38040834/uso-eficiente-de-aguas-en-la-industria-minera-y-buenas-practicas>
- International Copper study group. (2015). *ICSG statistical database* www.icsg.org/index.php/external-database. Lisbon, Portugal.
- Jones, B., Acuña, F., & Rodríguez, V. (2021). Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina. Cepal. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47136-cambios-la-demanda-minerales-analisis-mercados-cobre-litio-sus-implicaciones>
- Lagos, G., Peters, D., Salas, J. C., Parra, R., & Pérez, V. (2021). *Análisis económico de las cadenas globales de valor y suministro del cobre refinado en países*. CEPAL. Cooperación Alemana. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47451-analisis-economico-cadenas-globales-valor-suministro-cobre-refinado-paises#:~:text=El%20cobre%20de%20mina%20producido,se%20exporta%20actualmente%20en%20concentrados>
- Ley 1333 de 2009. Por la cual se establece el procedimiento sancionatorio ambiental y se dictan otras disposiciones. Julio 21 de 2009. D.O: 47417. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=3687>
- Ley 1450 de 2011. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010-2014. Junio 16 de 2011. D.O: 48102. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=43101>
- Ley 1753 de 2015. Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018 "Todos por un nuevo país. Junio 9 de 2015. D.O: 49538. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=61933>
- Ley 1955 de 2019. Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 Pacto por Colombia, pacto por la equidad. Mayo 25 de 2019. D.O: 50964 http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1955_2019.html
- Ley 685 de 2001. *Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones*. Agosto 17 de 2001. D.O: 44.545. http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0685_2001.html
- Linares Gutiérrez, N. (2020). *Procesamiento de minerales - mineralurgia*. Colombia: Instituto Nacional de Colombia.
- LME An HKE Company (s.f.) Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <http://www.lme.com/Metals/Non-ferrous/LME-Copper#Trading+day+summary>
- Lundgren, D. S. (1980). *Ore leaching by bacteria*. *Annu. Rev. Microbial*.
- MarkE, S. K. (2022). *Extractive Metallurgy of Copper*. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128218754/extractive-metallurgy-of-copper>
- Metallurgist. (s.f.) *Floculación Selectiva*. Recuperado el 6 de Octubre de 2022 de <https://www.911metallurgist.com/selective-flocculation/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (17 de Marzo de 2015). *Resolución 0631 de 2015*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/11/resolucion-631-de-2015.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Listado de Impactos Ambientales específicos en el marco del Licenciamiento Ambiental*. <https://www.andi.com.co/Uploads/listado-de-impactos-ambientales-espec%C3%ADficos-en-el-marco-del-licenciamiento-ambiental.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y Ministerio de Comercio, Industria y Turismo. (2019). *Estrategia nacional de economía circular. Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. https://www.andi.com.co/Uploads/Estrategia%20Nacional%20de%20EconA%CC%83%C2%B3mia%20Circular-2019%20Final.pdf_637176135049017259.pdf
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 4741 de 2005. Residuos peligrosos*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2005). *Decreto 838 de 2005. Disposición final de residuos sólidos*.
- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile- Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (en alemán GIZ). (s.f.). *Energía en minería*. Recuperado el Noviembre de 2022, de Eficiencia energética en la minería: <https://www.energiaenmineria.cl/procesos/fundicion>

- Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Ambiente. (2002). *Guía minero ambiental - Beneficio y transformación*. Colombia. <https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/handle/001/865/3%20Gu%EDa%20minero%20ambiental%20-%20Beneficio%20y%20transformaci%F3n.pdf;jsessionid=3FE2D-397730351F1FCA88421127CD82D?sequence=3>
- Ministerio de Minería (s.f.). *Política nacional Minera*. <https://www.politicanacionalminera.cl>
- Ministerio de Medio Ambiente [MMA]. (1997) *Política para la Gestión Integral de Residuos*. https://archivo.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Polit%C3%ACcas_de_la_Direcci%C3%B3n/Pol%C3%ADtica_para_la_gesti%C3%B3n_integral_de_1.pdf
- Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones. (28 de Mayo de 2015). *Conozca el Marco de Referencia, un instrumento para estructurar la gestión de tecnología en su entidad*. Recuperado el 18 de noviembre de 2022 de <https://mintic.gov.co/portal/inicio/9354>
- Naciones Unidas. (1999). *El desarrollo de la minería del cobre en la segunda mitad del siglo XX*. CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. Chile. Serie 4. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/6391-desarrollo-la-mineria-cobre-la-segunda-mitad-siglo-xx>
- Naciones Unidas. (2015) *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nordmin Engineering Ltd. (2022). *Reporte técnico y estudio de prefactibilidad*. Colombia: Córdoba Minerals. <https://cordobaminerals.com/assets/docs/2019-07-29-san-matias-pea.pdf>
- Outletminero. (s.f.). *Mina El Teniente alcanza la mayor producción de su historia, Chile*. Recuperado el 6 de octubre de 2022 de <https://outletminero.org/mina-el-teniente-alcanza-la-mayor-produccion-de-su-historia-chile/>
- País minero. (21 de septiembre de 2022). *Colombia está en la mira de multinacionales para ser potencia mundial en producción de cobre*. <https://www.pais-minero.com/mineria/mineria-colombiana/25333-colombia-esta-en-la-mira-de-multinacionales-para-ser-potencia-mundial-en-produccion-de-cobre>
- Pietrzyk, S., & Tora, B. (2018). *Tendencias en la minería mundial del cobre: Una revisión*. Polonia: IOP Publishing.
- Pradhan., N., Nathsarma, K., Rao, K. S., & L.B. Sukla, B. M. (2008). *Heap bioleaching of chalcopyrite*. Elsevier. Minerals Engineering.
- Ramírez Oscco, L. A. (2015). *Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración*. Perú.
- Resolución 1312 de 2016. [Auroridad Nacional de Licencias Ambientales]. Por medio del cual se adoptan los *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA*. Obtenido de <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-1312-de-2016.pdf>
- Resolución 1326 de 2017. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se establecen los sistemas de recolección selectiva y gestión ambiental de las llantas usadas y se dictan otras disposiciones. 6 de Julio de 2017. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>
- Resolución 1407 de 2018. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por la cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones. 26 de Julio de 2018.
- Resolución 2206 de 2016. [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. Por el cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA, requerido para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de explotación de proyectos mineros y se toman otras determinaciones. 27 de Diciembre de 2016. https://www.anla.gov.co/documentos/normativa/terminos_referencia/resolucion_2206_tr_mineria_2016.pdf
- Resolución 40599 de 2015. [Ministerio de Minas y Energía]. Por medio del cual se adopta el *Glosario Técnico Minero. 27 de mayo de 2015*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/res_40599_15_glosario_tecnico_minero.pdf
- Robinson, T. G. (2013). *Copper electrowinning-2013 world operating tankhouse data. Vol. V*.
- Rodriguez Vasquez, C. M. (2010). *Criterios de selección de equipos de chancado en una planta concentradora*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rumbo Minero Internacional. (2021). *Rumbominero.com*. Obtenido de <https://www.rumbominero.com/revista/informes/chancado-y-molienda-en-mineria-paso-previo-hacia-el-material-fino/>





- Schlesinger Mark, Davenport, W., Sole, K., & Alevear Flores, G. [2021]. *Extractive Metallurgy of Copper, sixth edition*. Elsevier.
- Servicio Geológico Colombiano. [2012]. *Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado*. Colombia.
- Servicio Geológico Colombiano. [2012]. *Áreas con potencial mineral para definir áreas de reserva estratégica del Estado*. Colombia.
- Servicio Geológico Mexicano. [2017]. *Beneficio y transformación de minerales*. Gobierno de México. Recuperado el 9 de octubre de 2022 de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html
- Siezen, R. J. [2009]. *Genómica de biolixiviación*.
- Silver, R. [1995]. *Minería con microbios, Biotecnología*.
- Sole, K. C., Davenport, W. G., Alvear, G. R., & Schlesinger, M. E. [2021]. *Metalurgia extractiva del cobre - Sexta Edición*. Amsterdam.
- SOTO, A. M. [2006]. *CARACTERIZACIÓN DE POLVOS DE FUNDICIÓN DE COBRE Y ESTABLECIMIENTO DE RUTAS DE PROCESADO*. BARCELONA.
- Tecnología minera. [8 de abril de 2022]. Los 10 principales países productores de cobre. *Los 10 principales países productores de cobre - Revista Tecnología Minera [tecnologiamineracom]*
- Tiempo Minero. [27 de Julio de 2021]. *Tiempo Minero*. Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/colombia-busca-ser-el-tercer-mayor-productor-de-cobre-en-latinoamerica-al-2030/>
- Uceda Herrera, D. [2016]. *Hidrometalurgia química e ingeniería*. Perú.
- Unidad de Restitución de Tierras y Agencia Nacional de Minería (ANM). [Noviembre de 2015]. *Cartilla Minería*. Obtenido de https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/cartilla_de_mineria_final.pdf
- Universidad de Santiago de Chile - Departamento de Ingeniería en Minas. [2016]. *Dimensionamiento Planta de Hidrometalurgia de Minerales de Cobre*.
- UPME. [2022]. *Aprovechamiento de minerales en Colombia bajo el esquema de Economía Circular*. Colombia. https://www1.upme.gov.co/Documents/Aprovechamiento_minerales_en_Colombia.pdf
- Valdes, J., I., P., R., Q., R.J., D., H., T., & R., B. [2008]. *Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from genome sequence to industrial applications*. BMC Genomics.
- Valenzuela Piñero, P. [2018]. *Análisis de consumo eléctrico y propuesta de medidas de eficiencia energética en procesos de minería en Chile*. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46138/3560900259712UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vargas Olivares, A. [2010]. *Evaluación técnico-económica de tecnología de conexión multicircuital en proceso de electrorrefinación, refinería No 2. Codelco Chile - División Codelco Norte*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Young, C. A. [2019]. *Manual de procesamiento de minerales y metalurgia extractiva para PYMES*. [https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4hKGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Young,+C.+A.+\[2019\]&ots=1kyp-XFmMQ&sig=s_7fN-32LIV0LtP97HNVJeEG53MM#v=onepage&q=Young%2C%20C.%20A.%20\[2019\]&f=false](https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4hKGDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Young,+C.+A.+[2019]&ots=1kyp-XFmMQ&sig=s_7fN-32LIV0LtP97HNVJeEG53MM#v=onepage&q=Young%2C%20C.%20A.%20[2019]&f=false)



PROPUESTA DE LINEAMIENTOS TÉCNICOS DE POLÍTICA DE BUENAS PRÁCTICAS PARA ESTANDARIZAR LOS PROCESOS ASOCIADOS AL BENEFICIO Y TRANSFORMACIÓN DEL COBRE

Contrato de Consultoría **GGC-631-2022**

Ministerio de **Minas y Energía**

Dirección de **Minería Empresarial**

Asesorías Técnicas Geológicas **ATG Ltda.**

