

2019

Hoja de Ruta 2.0 de la Minería Chilena

Actualización
y consensos
para una mirada
renovada



ALTALEY
DE LOS RECURSOS NATURALES
AL CONOCIMIENTO



Esta publicación fue elaborada por la
Corporación Alta Ley

Primera edición

Santiago, 2019

Comité editorial

Mauro Valdés

Javier Ruiz del Solar

Carlos Ladrix

Equipo de redacción y desarrollo de contenidos

Leonel Contreras, Javier Jara, Enrique Jélvez,

Cleve Lighfoot, Miguel Meza, Ángela Oblasser,

Roberto Parra, Víctor Pérez, Juan Carlos Salas,

Agustín Sepúlveda y Alejandra Wood.

Equipo de edición

Carolina Aguayo, Jonathan Castillo,

Isabel Covarrubias, Pía Hurtado, Antonia Muzzo,

Guillermo Olivares y Juan Pablo Rubilar.

Colaboradores

Elias Arce, Andrés Costa, Fernando Flores,

Jaime Henríquez, Diego Hernández, Leandro

Herrera, Gustavo Lagos, Pablo Lira, Isabel

Marshall, Alejandra Molina, Rodrigo Moya,

Carlos Urenda, Iván Valenzuela, Pascual Veiga,

María de la Luz Vásquez y Paula Zambrano.

Diseño y diagramación

José Covarrubias

Cristián González

Joce Quezada

Edición de textos

Patricio Urzúa

ISBN

978-956-09443-0-6



Índice

Cartas de presentación

Baldo Prokurica, Ministro de Minería	9
Andrés Couve, Ministro de Ciencia, Tecnología Conocimiento e Innovación	10
Ricardo Irarrázabal, Subsecretario de Minería	11
Pablo Terrazas, Vicepresidente Ejecutivo de Corfo	12
Diego Hernández, Presidente de la Sociedad Nacional de Minería	13
Joaquín Villarino, Presidente Ejecutivo del Consejo Minero	14
Andrés Costa, Presidente de Minnovex	15
Pascual Veiga, Presidente de Aprimin	16
Mauro Valdés, Presidente Ejecutivo de Corporación Alta Ley	17

Prólogo	18
----------------------	----

Núcleo Exploraciones

Antecedentes	24
Visión del Núcleo	42
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	44
Fortalecer la institucionalidad en los aspectos tecnológicos.....	45
Desarrollo y transferencia tecnológica en la captura y almacenamiento de información geológica	46
Desarrollo tecnológico en el uso de información	47
Desarrollar y profundizar modelos de asociación	49

Núcleo Operación y Planificación Minera

Antecedentes	52
Visión del Núcleo	62
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	64
Aumento de la productividad y reducción de costos	65
Incremento de las reservas minerales	70
Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	71
Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo	73

Núcleo Concentración

Antecedentes	80
Visión del Núcleo	82
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	84
Aumento de la productividad	85
Incremento de los recursos y reservas minerales	87

Núcleo Relaves	89
Antecedentes	91
Visión del Núcleo	102
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	104
Enfrentar la creciente escasez de agua y superficie	105
Asegurar la estabilidad química y física de los depósitos de relaves	107
Promover la conversión desde un pasivo a un activo	111
Propiciar la inclusión y aceptación comunitaria	114
Núcleo Fundición y Refinería	116
Antecedentes	118
Visión del Núcleo	125
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	127
Aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería	128
Disminuir el impacto medioambiental	131
Mejorar las condiciones laborales	133
Núcleo Hidrometalurgia	135
Antecedentes	137
Visión del Núcleo	141
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	143
Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	144
Aumento de la productividad	145
Incremento de los recursos y reservas minerales	146
Núcleo Minería Verde	147
Antecedentes	149
Visión del Núcleo	155
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	158
Sustentabilidad energética, hídrica y huella de carbono	159
Trazabilidad e indicadores de sustentabilidad	169
Reducción de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas	172
Seguridad e higiene ambiental	179
Economía Circular (Minería Circular)	181
Núcleo Usos del cobre	183
Antecedentes	185
Visión del Núcleo	192
Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i	194
Producto de cobre con mayor valor agregado	195
I+D Industrias tradicionales	196
I+D Industrias no tradicionales	198

Índice de gráficos, tablas y figuras

Núcleo Exploraciones

Gráfico 1 _ Principales países productores de cobre de mina	24
Gráfico 2 _ Evolución del costo mundial en exploración e índice anual de precios de metales.....	27
Gráfico 3 _ Gasto en exploración mundial por yacimientos de cobre	28
Gráfico 4 _ Evolución del gasto en exploración mundial y participación de Chile	28
Gráfico 5 _ Gasto en exploración en Chile por etapa	29
Gráfico 6 _ Distribución porcentual del gasto en exploración en Chile por foco exploratorio	30
Gráfico 7 _ Distribución porcentual del presupuesto en exploración 2018 en Chile según compañía	31
Gráfico 8 _ Distribución porcentual del presupuesto en exploración en Chile según el tipo de compañía	32
Gráfico 9 _ Año de descubrimientos y tamaño de los principales yacimientos de Cu-Au en Chile por región	33
Gráfico 10 _ Evolución hectáreas concesionadas	34
Figura 1 _ Distribución de la propiedad minera	35
Gráfico 11 _ Porcentaje de área transada promedio por región en el período 2006-2013	36
Figura 2 _ Estimación de pertenencias mineras	38

Núcleo Operación y Planificación Minera

Figura 1 _ Categorización de recursos y reserva mineral	52
Gráfico 1 _ Total de reservas de cobre en el mundo, consumo mundial y vida útil estimada	53
Gráfico 2 _ Evolución de las reservas de cobre en Chile (2001-2017)	54
Gráfico 3 _ Evolución de las reservas y recursos medidos + indicados de cobre en Chile (2001-2016)	55
Gráfico 4 _ Mineral de cobre extraído en el mundo, período 2000-2035	56
Gráfico 5 _ Proyección de cobre fino por tipo de minería hacia 2035	57
Gráfico 6 _ Mayores operaciones en Chile (principalmente rajo) y su aporte de cobre fino	58
Figura 2 _ Las fases de conversión y niveles de estudios	59

Núcleo Concentración

Figura 1 _	Costo operacional de la etapa de molienda	80
Figura 2 _	Recuperación metalúrgica en función del tamaño de partículas	81
Figura 3 _	Los principios de preconcentración de partículas de minerales basados en sensores de medición	86

Núcleo Relaves

Figura 1 _	Composición de un tranque de relaves	91
Gráfico 1 _	Procesamiento de mineral y producción de cobre	92
Tabla 1 _	Incidentes recientes asociados a depósitos de relaves a nivel mundial	94
Figura 2 _	Recursos futuros mineros en la zona central	97
Tabla 2 _	Estado de los depósitos de relaves en Chile según región	98
Gráfico 2 _	Número de depósitos de relaves según metal de beneficio	99
Figura 3 _	Top 10 de los relaves chilenos en operación en base a toneladas depositadas a 2019	100

Núcleo Fundición y Refinería

Gráfico 1 _	Producción mundial de cobre refinado por país: 2009 vs 2018	118
Gráfico 2 _	Participación geográfica de producción de cobre de fundiciones ...	119
Gráfico 3 _	Capacidades y tecnologías de las fundiciones chilenas	120
Tabla 1 _	Margen bruto de fundición de concentrados de cobre	121
Gráfico 4 _	Tecnología de electro-depositación (cátodos permanentes)	122
Gráfico 5 _	Tecnología de electro-depositación (láminas iniciales)	122
Tabla 2 _	Margen bruto refinerías	123
Tabla 3 _	Comparación de margen bruto de refinerías	128

Núcleo Hidrometalurgia

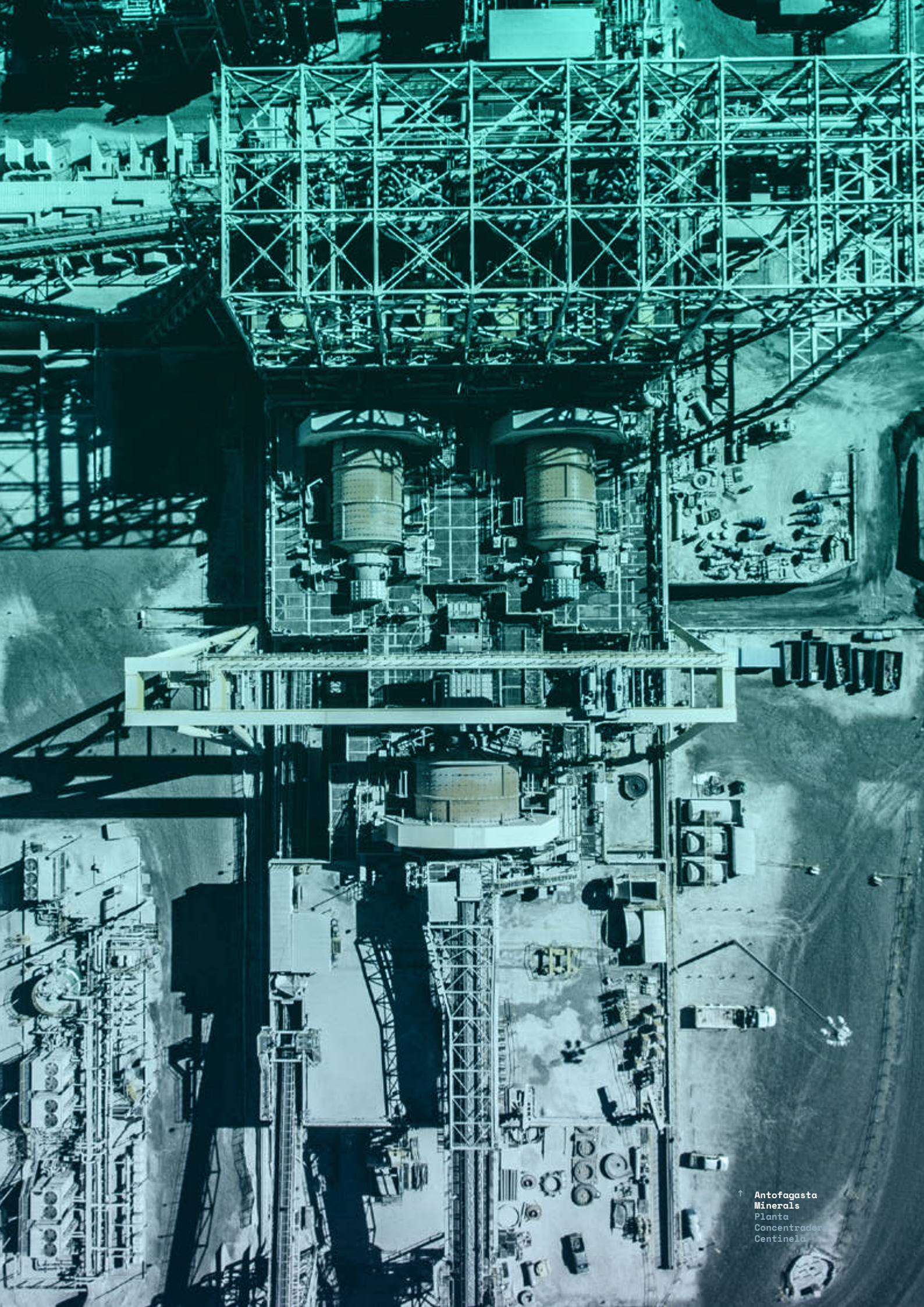
Gráfico 1 _	Ley de cobre de alimentación en función del tamaño de partículas	137
Figura 1 _	Diagrama de flujo simplificado de los procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención	138
Gráfico 2 _	Producción de cobre en Chile por la vía hidrometalúrgica de extracción por solventes y electro-obtención	138
Gráfico 3 _	Producción de cobre en Chile	139

Núcleo Minería Verde

Figura 1 _	Minería y su relación con los ODS	149
Figura 2 _	Diagrama del concepto de Minería verde	151
Figura 3 _	Principales indicadores de sustentabilidad minería chilena	154
Gráfico 1 _	Consumo energético y producción de cobre fino	159
Gráfico 2 _	Intensidad del uso de energía	160
Gráfico 3 _	Utilización de energía en procesos	161
Gráfico 4 _	Consumo de combustible en procesos mineros	162
Gráfico 5 _	Consumo de electricidad en procesos mineros	162
Figura 4 _	Diagrama de procesos de consumo energético y relación de mayores demanda	163
Gráfico 6 _	Proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica (MW) requerida por la minería del cobre, 2018-2028	163
Gráfico 7 _	Evolución del consumo de agua según fuentes	164
Figura 5 _	Proyección de plantas desaladoras y proyectos mineros nuevos y en operación al 2029	166
Gráfico 8 _	Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile	173
Gráfico 9 _	Emisiones de GEI directos por tonelada de cobre fino, 2001 – 2017	174
Gráfico 10 _	Emisiones directas de GEI en la industria minera	175
Gráfico 11 _	Emisiones de GEI directos de la minería del cobre por proceso, 2001 – 2017	175

Núcleo Usos del cobre

Gráfico 1 _	Principales países consumidores de cobre refinado 2009-2018	186
Gráfico 2 _	Usos del cobre a nivel global en 2018	187
Gráfico 3 _	Producción de cobre refinado 2009-2018	188
Tabla 1 _	Tipo de aplicación/industria según propiedad	190



↑ Antofagasta
Minerals
Planta
Concentradora
Centinela



**Baldo
Prokurica**

Ministro
de Minería

Cuando asumimos el Gobierno en marzo de 2018 nos fijamos la meta de posicionar nuevamente a la minería como un motor de crecimiento económico del país que contribuya al desarrollo de las familias chilenas.

Precisamente en esta senda, en la cual hemos trabajado con mucha dedicación, constatamos que la minería está enfrentando nuevos desafíos en ciberseguridad, digitalización de faenas, reprocesamiento de relaves y lixiviación de minerales sulfurados, los cuales se suman a la necesidad de incrementar los niveles de productividad y reducir los costos de operación de la minería chilena.

En este contexto y conscientes de las grandes transformaciones tecnológicas que ha experimentado esta actividad, lo cual nos demandará desarrollar una minería 4.0, es que valoramos profundamente como Gobierno del Presidente Sebastián Piñera que la Corporación Alta Ley -junto al respaldo de nuestro Ministerio-, avance en esta repriorización del Roadmap Tecnológico de la Minería 2.0 o nueva Hoja de Ruta.

Al mismo tiempo, destacamos el trabajo, esfuerzo y dedicación de más de 100 personas de 40 instituciones que participaron en esta actualización y revisión de los desafíos de la minería nacional con la idea de determinar cuáles son prioritarios o qué se debe incorporar.

Al revisar esta investigación, constatamos con agrado la incorporación de tres núcleos temáticos, como es el caso de los nuevos usos del cobre, la minería verde y las exploraciones, lo que da cuenta de que este documento evoluciona y se ajusta a las nuevas necesidades del sector como es impulsar una producción del metal rojo con una menor huella ambiental o fomentar la exploración minera para proyectar esta industria en el largo plazo.

Felicitamos a la Corporación Alta Ley por liderar esta Hoja de Ruta Tecnológica que irá en beneficio de una minería más productiva, limpia y respetuosa del medio ambiente y normativa vigente y sepan que cuentan con nuestro respaldo para seguir avanzando hacia la minería del futuro.



Andrés Couve

Ministro de
Ciencia,
Tecnología,
Conocimiento
e Innovación

La riqueza mineral que posee Chile es un pilar de la innovación y el desarrollo tecnológico a nivel mundial—desde el cobre, con usos variados como conductor eléctrico y en construcción, hasta el litio, pieza clave para el almacenamiento de energía en las baterías que alimentarán las nuevas tecnologías limpias. Adicionalmente, la actividad minera es la base de la economía chilena, ligada a nuestra historia como nación.

Dada la importancia de estos recursos para Chile y el mundo, es fundamental que el crecimiento de la industria minera vaya de la mano con las transformaciones tecnológicas que la misma ha permitido desarrollar. Es clave también que la minería en Chile incorpore progresivamente investigación e innovación desarrollada en el país, no solo para generar y fortalecer capacidades que le permitan garantizar la seguridad y el bienestar de los trabajadores mineros, optimizar la cadena de procesos, minimizar los consumos de agua, aumentar la productividad y reducir los costos sino además para contribuir a agregar valor a nuestra economía. A medida que avanza el proceso minero, el recurso mineral se va haciendo progresivamente más profundo y costosa su explotación. Por lo tanto, las herramientas de exploración deben, paralelamente, ir siendo más precisas y sofisticadas. Nuevas tecnologías permiten la extracción del material que, de lo contrario, no sería económicamente rentable.

Por sobre todo, la minería debe desarrollarse en un entorno de protección y respeto hacia al medio ambiente. Este año, Chile asumió la presidencia de la cumbre de cambio climático más importante del mundo, la COP25, y como país nos hemos propuesto la meta de ser carbono neutral antes del 2050. El desarrollo de nuestra industria minera debe ser acorde y tan ambiciosa como estos compromisos en materia medioambiental. En lo que respecta a la minería verde, quizás más que cualquier otro país, Chile posee una oportunidad única en el mundo: los desiertos del norte conjugan la presencia de amplios depósitos minerales de clase mundial, con uno de los mayores campos para la producción de energía eólica y solar que podrían solucionar en gran medida sus necesidades energéticas.

Es necesario contar con soluciones actualizadas, pertinentes y que estén alineadas al plan de desarrollo país y al Chile que queremos formar entre todas y todos los chilenos. Esto requiere una revisión y análisis continuo de los desafíos que enfrenta la industria minera. En ese sentido, la actualización de la Hoja de Ruta Tecnológica Minera provee una herramienta de diagnóstico dinámica, fundamental ante la velocidad con la que surgen nuevos desafíos y se producen los cambios tecnológicos y sociales hoy en día.



Ricardo Irarrázabal

Subsecretario
de Minería

Chile es un país eminentemente minero: la industria aporta un 10% al PIB, representa un 55% de las exportaciones y un 18% de la inversión extranjera. Esto nos pone el desafío de potenciar de –forma constante– nuestra productividad. Una vía que presenta oportunidades para ello es la innovación, a través de la cual se puede optimizar procesos de orden productivo, de gestión de factores ambientales, de personas y mucho más.

Construir un ecosistema sólido, donde cada actor tenga un rol estratégicamente definido es el primer paso, pues éste es la base y espacio propicio para la toma de decisiones de innovación. Muchas veces puede ocurrir que en pleno proceso de cambios surja desafíos no previstos, sin embargo, es justamente la solidez del ecosistema la que permitirá gestionar el cambio y la innovación de manera oportuna.

¿Y cómo construir ese ecosistema para la industria minera? Son varios factores fundamentales. En primer lugar, debemos hacer un buen mapeo de las necesidades de la industria, precisando las de la pequeña, mediana y gran minería; luego, es primordial la generación oportuna de espacios y redes de colaboración entre quienes emprenden y proponen innovaciones, con quienes las requieren; asimismo, y considerando que según datos de Datalab un trabajador minero levanta solo 0,02 sugerencias de mejora por año, es crucial que la industria potencie los procesos de innovación abierta; al mismo tiempo, se requiere que tanto la academia como la gestión de personas en el sector, orienten la formación del capital humano a los tiempos actuales, donde la automatización de procesos, el internet de las cosas, la robotización, entre otros, son las tendencias que rigen la producción. Una vez se construye el ecosistema que, dicho sea de paso, está en permanente mutación, se facilita la toma de decisiones y se genera el cambio de manera integral y sostenida.

Y así, mandatados por la búsqueda de la sostenibilidad a través de innovaciones en todos los procesos, es cómo entre todos los actores del sector seguiremos colaborando con uno de los principales desafíos que tiene la minería chilena hoy: transitar de la exportación de materias primas a la de conocimientos y experiencia. Son estos saberes los que deben aprovechar las futuras generaciones para potenciar la productividad y así resguardar la tradición minera que tiene Chile a nivel mundial.



Pablo Terrazas

Vicepresidente
Ejecutivo de
Corfo

La industria minera es uno de los principales motores que impulsa nuestra economía, representa el 10% del PIB de nuestro país y entrega empleos y oportunidades a muchas familias de Chile.

Sin embargo, en los últimos años, ha estado desafiada por múltiples factores, entre los cuales se encuentra la baja productividad con respecto a otros países. El diagnóstico está claro y parte de las soluciones también.

Uno de los principales compromisos del Gobierno del Presidente Sebastián Piñera, es transitar hacia una completa transformación digital del Estado. Pero para ello, el sector privado no puede sino ir en sintonía. Tanto en el ámbito público como en el privado, el desarrollo de nuevas tecnologías ha significado un cambio cultural relevante, a ratos complejo, pero absolutamente necesario.

En este sentido, vemos con urgencia la necesidad de abordar este importante desafío que nos permitirá fortalecer nuestra economía y avanzar hacia un buen desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras que impacten en la competitividad y productividad de nuestro país, mejorando cada vez más la calidad de vida de los chilenos y chilenas.

Es fundamental que una industria tan importante como la minera se suba al carro de la transformación digital. Para ello, es necesario identificar tanto los desafíos como las oportunidades y de I+D, incorporar en sus procesos productivos más herramientas provenientes de la ciencia y la innovación, para así generar capacidades tecnológicas en el país y poder seguir ampliando la base de nuestra economía de la mano de una industria cada vez más desarrollada.

Como Corfo, somos conscientes que existen innumerables incentivos para seguir avanzando en esta revolución 4.0, hacia una minería cada vez más sostenible. Esto traerá beneficios medioambientales, ventajas en materia de productividad, reducción de costos de operación, uso más eficiente de la energía, mayor seguridad y más calidad de trabajo en las faenas, entre muchos otros.

En este contexto, queremos destacar enormemente el esfuerzo y trabajo que está realizando Alta Ley por impulsar el desarrollo en I+D+i dentro de la cadena de valor de la minería, así como también por fortalecer y fomentar el trabajo colaborativo entre el sector público-privado en esta esfera.

No cabe duda que esta nueva versión de la Hoja de Ruta Tecnológica de la Minería, ayudará a crear soluciones innovadoras para enfrentar los problemas actuales del sector y avanzar con el desarrollo de nuevas tecnologías hacia una minería más sostenible y con proyección de futuro.



Diego Hernández

Presidente de
la Sociedad
Nacional de
Minería

El Roadmap Tecnológico de la Minería 2015-2035, elaborado en el año 2016, se ha transformado en un referente para la realización de proyectos colaborativos de innovación y emprendimiento en minería. Dado que este es un proceso vivo, la actualización que ahora se presenta reviste la mayor importancia para el desarrollo del país.

Sonami valora el diálogo público -privado que nuevamente se ha dado en el ecosistema vinculado a la minería para actualizar la Hoja de Ruta que permitirá articular los esfuerzos de investigación e innovación del sector con una mirada de largo plazo. Este diálogo constituye, a su vez, una genuina innovación social, que no tan solo identifica los desafíos específicos de largo plazo que puedan traducirse en un portafolio de I+D+i de alto potencial, sino también orienta las políticas públicas que el sector requiere.

Deseamos destacar en esta actualización de la Hoja de Ruta de la Minería la incorporación de dos nuevos núcleos traccionantes (Exploración y Nuevos Usos del Cobre) y de un nuevo núcleo habilitador (Minería verde). Este último núcleo, está íntimamente relacionado con el esfuerzo que está haciendo la minería para reducir las emisiones de gases efecto invernadero, a través de eficiencia energética y la búsqueda de sustitución de combustibles fósiles, entre otros.

Chile posee todas las condiciones para potenciar la industria minera como principal motor de innovación tecnológica y generador de encadenamientos productivos. Para lograr dicho cometido se requiere potenciar la investigación aplicada a la problemática minera, fortalecer las capacidades de I+D en la minería y propiciar el desarrollo de proveedores intensivos en conocimiento y tecnologías. Contar con la versión 2.0 de la Hoja de Ruta Tecnológica de la Minería constituye un gran aporte para alcanzar dicho cometido.



**Joaquín
Villarino**

Presidente
Ejecutivo
Consejo Minero

El desafío de incorporar nuevas tecnologías no es una tarea que recién hemos asumido como industria. La inclusión de éstas ha sido parte del crecimiento de la minería desde hace décadas. Sus beneficios se pueden ver tanto en la optimización de los procesos, como en el aumento de la eficiencia, sustentabilidad, competitividad y en mayor inclusión. Los avances en este ámbito también han traído consigo un aumento en el uso de los minerales, lo que se puede ver reflejado en el rol que se le ha dado al cobre en áreas como la salud y la industria textil -atendiendo a sus propiedades antibacterianas- y ahora en el desarrollo de la electromovilidad y el almacenamiento de energía.

Si bien esta incorporación ha sido beneficiosa para la industria, también ha abierto un debate en materia laboral en el que no podemos estar ausentes. Hay cierto temor y mitos que apuntan a que la tecnología quitará puestos de trabajo, existiendo así un reemplazo de personas por máquinas. Es importante aclarar que la minería no ha planteado afirmaciones como éstas; más bien ha manifestado que habrá una adecuación y una actualización en la formación de los actuales y futuros trabajadores, temática que ha sido objeto de análisis para el Consejo de Competencias Mineras (CCM) durante los últimos siete años.

La industria nunca ha permanecido indiferente ante este asunto. A principios del año pasado, el CCM presentó un estudio preliminar titulado *"Impactos de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria"*, donde evidenció cuáles serán los cambios que traerá la incorporación de nuevas tecnologías en las habilidades requeridas por la industria. Este tema también fue tratado en nuestro seminario anual, *"Automatización y tecnología: oportunidades y desafíos"*, instancia donde el economista de Harvard, Geoff Colvin, se refirió a cómo las empresas y las personas se deben adaptar a un mundo cada vez más tecnologizado. Tanto las conclusiones que nos ha aportado el CCM; como las lecciones que nos dejó nuestro seminario, coinciden en la idea de que para enfrentar la incorporación de mayor innovación es fundamental contar con una formación adecuada y acorde al avance de éstas.

La experiencia nos ha enseñado que cada desafío que ha enfrenta la industria debe ser trabajado de manera colaborativa, con una mirada siempre puesta en el corto, mediano y largo plazo. Precisamente esta es la virtud que ha caracterizado a la Hoja de Ruta desde sus inicios. El primero nos planteó el desafío de avanzar hacia una industria más sostenible y trabajar colaborativamente en la superación de ciertas brechas; hoy el llamado es a prepararnos para afrontar las transformaciones tecnológicas, a través de un trabajo compuesto por más de 100 personas y 40 instituciones diferentes. Como Consejo Minero destacamos la labor que se está haciendo, y apoyamos la iniciativa de que su contenido sea actualizado con mayor regularidad. La industria minera lo exige, y el desarrollo sostenible del país también.



**Andrés
Costa**

Presidente
Minnovex

Ha sido valioso el proceso de actualización de la Hoja de Ruta, tanto por la experiencia de colaboración, que permitió reunir las miradas de diferentes actores de la industria frente a los desafíos de una minería en constante cambio, así como por las oportunidades que este genera para los proveedores, sobre todo locales, de conocer las reales problemáticas y hacia dónde apuntar el desarrollo de sus soluciones tecnológicas. Esperamos que esta Hoja de Ruta cuente en un futuro próximo de mecanismos de financiamiento para la ejecución con apoyo público y privado.



**Pascual
Veiga**

Presidente
Aprimin

En Aprimin apoyamos con alto interés la institucionalización del Programa Alta Ley a través de la estructura y capital del CIMM, lo que está permitiendo un mejor desarrollo de las capacidades de innovación. Precisamente la innovación, que está radicada principalmente en los proveedores de la minería, es el esencial desafío a vencer para el avance de la competitividad del país y la sostenibilidad en el sector. En este sentido, la Hoja de Ruta Tecnológica de la Minería constituye una importante herramienta de apoyo a este objetivo país.



**Mauro
Valdés**

Presidente
Ejecutivo
Corporación
Alta Ley

Cuando iniciamos el Programa Nacional de Minería Alta Ley en 2015, teníamos un propósito claro: acelerar la transformación de Chile de un país productor de minerales a un exportador de minería. Para ello, había que articular actores del mundo público y privado, traspasar barreras políticas e ideológicas y levantar una visión compartida de lo que el país necesita para mantener la competitividad de este sector productivo, a la vez que convertirlo en palanca de desarrollo para nuestro país.

El hito inicial fue la publicación de la primera versión del Roadmap Tecnológico de la Minería en 2016, en el cual se plasmó una Hoja de Ruta clara y consensuada para enfrentar los desafíos más importantes de la minería del cobre, de manera que mantengamos nuestra posición líder a nivel global, y desarrollemos tecnología, emprendimiento, innovación y colaboración que nos hagan más competitivos, no sólo en minería, sino en todas las cosas que aprendemos y solucionamos, y los productos que generamos en este camino.

Hoy, mientras observamos cómo las nuevas generaciones demandan con fuerza acciones inmediatas para reducir el impacto ambiental de todas las actividades económicas, ya nadie duda que éste camino es el correcto, y que hay que acelerarlo y profundizarlo. Esta nueva versión de la Hoja de Ruta da cuenta de eso: éste es un documento vivo, que debe ir evolucionando a la par de los nuevos desafíos que enfrentamos como sociedad y como sector industrial. Así, mientras el Roadmap original señalaba como desafío principal la energía eléctrica más cara del continente y de todos los países mineros, hoy la generación renovable abre un espacio enorme de innovación para bajar los costos de este insumo clave para la actividad, y también para poblar de I+D+i la interfase entre minería y energía solar, eólica o geotermia. Es por ello que la Hoja de Ruta 2019, elaborado participativamente con todos los actores del ecosistema, está indicando con fuerza la oportunidad que significa la minería baja en emisiones, y la minería verde en general si le sumamos otras dimensiones de la sustentabilidad donde Chile ya es un líder mundial reconocido.

Tras cuatro años liderando este proyecto, y ya terminando mi periodo como presidente ejecutivo de Alta Ley, parto con la convicción que el futuro de la minería no se juega entre la inversión industrial y el medioambiente, o entre productividad y sustentabilidad. Todas estas dimensiones no son excluyentes ni menos contradictorias. En la minería moderna éstas son caras de la misma moneda, y así lo ha manifestado la industria chilena del cobre en múltiples ocasiones. La minería chilena en su conjunto, con sus actores públicos y privados, industriales y académicos, empresariales, emprendedores y ciudadanos, ha hecho una apuesta definitiva por conjugar sustentabilidad, conocimiento, tecnología e innovación junto con inversión, crecimiento y productividad, que cristaliza en la Hoja de Ruta y en los proyectos que éste ampara y promueve. Y no puede ser de otra manera: en la época del "propósito" como la clave de la formulación de toda estrategia empresarial, la revolución tecnológica e industrial que estamos viviendo nos pone en una situación sorprendentemente ventajosa para conjugar el progreso minero con un propósito más grande, el de ser palanca para mover a Chile desde la economía de recursos naturales a la economía del conocimiento.

No habrá electromovilidad sin minería del cobre y del litio, ni avances tecnológicos ni energías renovables plausibles sin minerales para desarrollarlos. En este escenario, la innovación no es un plus, sino que el oxígeno de la industria. Por eso, invitamos a todos los actores del ecosistema de innovación minero, y especialmente a quienes estén desarrollando emprendimientos y tecnologías emergentes, a aportar en este cambio y a caminar en conjunto esta nueva versión de la Hoja de Ruta de la Minería Chilena. Una minería inteligente, inclusiva y sustentable.

prótoqo

La Corporación Alta Ley es una institución de derecho privado, sin fines de lucro, que nace de la fusión del Programa Nacional de Minería Alta Ley (iniciativa público-privada impulsada por CORFO, el Ministerio de Economía y el Ministerio de Minería) y el Centro de Investigación en Minería y Metalurgia (CIMM). Su propósito es contribuir al desarrollo de una industria de bienes y servicios basada en ciencia y tecnología para abordar los desafíos de productividad y sustentabilidad de la industria minera, con un fuerte foco en el mejoramiento de la competitividad de la industria.

En la actualidad, la industria minera en Chile enfrenta varios desafíos originados en las decrecientes leyes del mineral, mayores profundidades de las minas, mayores contenidos de impurezas en concentrados y regulaciones ambientales crecientes, entre otros, lo que conlleva un aumento en los costos de los procesos productivos y menores productividades. Por otra parte, tanto a nivel nacional como internacional, aumentan las oportunidades y tecnologías para la descarbonización de la matriz energética, el uso eficiente del recurso hídrico y de la energía, el reciclaje de los residuos y desechos de la industria y la seguridad de los trabajadores.

En este contexto, a través del Programa Nacional de Minería Alta Ley, se desarrolló la Hoja de Ruta Tecnológica de la Minería Chilena 2015 – 2035, cuyo objeto es señalar al ecosistema de innovación y sus actores cuáles son los principales desafíos de nuestra actividad, de manera de orientar sus esfuerzos, apoyar el trabajo colaborativo entre las mismas compañías mineras y sus desafíos compartidos, y por último, dar respaldo al Estado para la inversión de fondos públicos en innovación y desarrollo para que investigadores, proveedores y emprendedores puedan enfocar sus esfuerzos en dichos desafíos y desarrollar de esa manera un ecosistema de innovación de clase mundial, que apoye una actividad chilena de clase mundial como es nuestra minería.

Al amparo de esta Hoja de Ruta se comenzó a desarrollar una serie de programas y proyectos para abordar algunos de los desafíos de productividad y sustentabilidad de la industria minera, con la participación de proveedores, la industria, la academia y el Estado. El objetivo de estos programas y proyectos es abordar los desafíos más urgentes de la minería chilena, y generar a la vez las capacidades técnicas, de negocios y colaborativas para impulsar el desarrollo del ecosistema nacional de innovación y emprendimiento, y fortalecer la asociatividad entre los diversos actores involucrados.

Entre las iniciativas de mayor relevancia desarrolladas bajo la Hoja de Ruta se encuentran: Centros de Pilotaje, Plataforma de Innovación Abierta en Minería - Expande, Plataforma de Transferencia para la Formación Técnica en Minería - Eleva, Programa Tranque, Proyectos de Procesamiento y Recuperación de Elementos de Valor desde Relaves Mineros, Programa de Interoperabilidad Minera y los Proyectos de Hidrógeno para la Sustitución de Combustibles en Camiones de Extracción y Equipos Móviles Mineros.

El nuevo escenario al que nos enfrentamos, marcado por las megatendencias que irrumpen con fuerza a nivel mundial y la necesidad de transformar a la minería en una industria sustentable, nos llevó a realizar un profundo trabajo de análisis y repriorización de esta Hoja de Ruta, con el objetivo de desarrollar nuevos proyectos colaborativos de alto impacto que apunten a generar una mayor productividad y sustentabilidad en la industria. Así nace la idea de crear una Hoja de Ruta 2.0, documento que tiene como principal novedad la incorporación de tres nuevos núcleos: nuevos usos del cobre, minería verde y exploraciones.

Pero para conseguir este desarrollo del ecosistema vibrante y con impacto, es primordial contar con empresas de base tecnológica proveedoras de la minería que contribuyan a mejorar la competitividad de la industria nacional y generen las condiciones para, por medio de la generación y exportación de bienes, servicios y tecnologías relacionadas con la minería, se acelere la diversificación y sofisticación de nuestra economía. En este aspecto, las compañías mineras tienen un rol fundamental en generar la tracción necesaria para el desarrollo de soluciones de proveedores que permitan resolver y enfrentar sus desafíos y, por otra parte, los proveedores en capitalizar el aprendizaje, conocimiento y capacidades desarrollados, que habiliten el crecimiento su crecimiento acelerado y la exportación de dichos bienes, servicios y tecnologías a la industria internacional.

La minería puede ser un motor de innovación en el país, y necesita urgentemente incorporar el desarrollo tecnológico en sus actividades. Solo de esta manera seremos capaces de alcanzar las ambiciosas aspiraciones que nos propusimos para la minería al 2035: 7,5 millones de toneladas métricas de producción anual promedio; 80% de la producción en los primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global; 250 empresas proveedoras de clase mundial y US\$4.000 millones en exportaciones de bienes y servicios vinculados a minería.

La presente revisión de la Hoja de Ruta tiene por objeto dar cuenta de los principales avances tecnológicos de los últimos años, hacerse cargo de nuevos desafíos que la misma sociedad demanda producto de los fuertes cambios de contexto que enfrentamos -especialmente ligados a una economía más inclusiva y sustentable-, y abordar nuevos desarrollos tecnológicos que reflejen la creciente madurez de nuestro ecosistema de innovación. Los invitamos a ser parte de estas páginas y seguir avanzando, colaborativa y coordinadamente, en la construcción una mejor minería para un mejor país.

Cabe destacar que algunos núcleos e iniciativas de I+D siguen vigentes y solo han sido modificadas parcialmente respecto de la versión original de la Hoja de Ruta.



01 núcleo exploraciones

El capítulo **núcleo exploraciones** fue desarrollado en base al trabajo realizado por Elías Arze, Iain Cassidy, Diana Comte, Álvaro Egaña, Sergio Giglio, Vicente Irarrázabal, Javier Jara, José Joaquín Jara, Juan Carlos Marquard y Ricardo Muhr.



Antecedentes

Chile y su desafío por renovar recursos y reservas de cobre

En el 2018, Chile continúa siendo el mayor productor de cobre del mundo, con una participación del 28% en la producción mundial, seguido por Perú y China, quienes producen el 12% y 7%, respectivamente.

A nivel de empresa productora, Codelco ostenta el primer lugar en términos de producción de cobre fino totalizando 1,8 millones de toneladas al año.

Gráfico 1_ Principales países productores de cobre de mina



Fuente: Cochilco (2019)

La producción de Chile se ha mantenido relativamente estable en los últimos 15 años en torno a las 5,5 millones de toneladas. No obstante, la participación en la producción acumulada a nivel mundial ha decrecido progresivamente desde el año 2004, cuando se alcanzó el máximo de 36,9% sobre la producción global del metal. En este contexto, la minería peruana ha mejorado significativamente su participación, pasando de 8,1% al 12% en el mismo período¹.

Chile ha disminuido porcentualmente su participación en la producción de cobre de mina a nivel global, producto de un menor desarrollo de nuevos proyectos y una menor ley del mineral, a causa de la prolongada explotación de las minas.

¹ Cochilco - Panorama actual de la exploración y financiamiento, 2015.

La Exploración Minera

La exploración minera es una actividad económica orientada al descubrimiento de nuevos depósitos de minerales o bien a la expansión de depósitos ya descubiertos. La primera recibe normalmente el nombre de exploración *greenfield* mientras que a la segunda se le denomina *brownfield*.

Se trata en ambos casos del primer eslabón de la cadena de valor de la industria, toda vez que su objetivo es identificar nuevas fuentes de recursos que puedan ser explotados económicamente por los productores.

La exploración minera es una actividad de alto riesgo, debido a que la inversión que debe realizarse para identificar nuevos depósitos es significativa y las probabilidades de encontrar un depósito que sea económicamente viable de ser desarrollado son relativamente bajas. Al respecto, existen autores que han cifrado, para una jurisdicción como la chilena, la probabilidades de éxito en 1:1.000².

Dentro de la exploración minera, aquella denominada *greenfield* es significativamente más riesgosa que la *brownfield*, porque los indicios acerca de la existencia de un depósito son mucho menos evidentes que aquellos que pueden encontrarse en depósitos que ya fueron descubiertos y están en expansión.

La etapa más temprana de la exploración se conoce como *grassroots* y su característica principal es que se trata de una exploración a gran escala, en una extensión de terreno significativa y con muy poco impacto en el terreno. Este tipo de exploración comienza a ciegas, en la completa ignorancia de la existencia de un depósito. Posteriormente, etapas más avanzadas se basan en ciertos hallazgos geológicos que sugieren la presencia de un depósito. Mientras más indicios de la existencia de un depósito haya, más avanzado está el proyecto, y por ende su perfil de riesgo es menor.

Dado que es la exploración minera la que aporta nuevos recursos y reservas para ser explotados, su importancia es crítica para la sostenibilidad de la industria minera en nuestro país. Considerando el alto grado de inversión que ésta requiere, y el alto riesgo que implica, debido a las bajas probabilidades de éxito, la industria requiere de incentivos y reducción de barreras de entrada para dinamizar la exploración.

² Richard Schodde, MinEx Consulting, 2015.

Chile y la búsqueda de nuevos yacimientos

De acuerdo a datos obtenidos del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), Chile posee actualmente el 21% de las reservas de cobre conocidas, lo que constituye una importante ventaja como destino de inversión en exploración para ese mineral respecto de sus competidores. No obstante, urge mejorar y modernizar las condiciones para aprovechar estas ventajas.

La mejora de estas condiciones está dada por la implementación de políticas públicas orientadas a dar dinamismo al mercado de la exploración minera, especialmente *greenfield*, y destacan aquellas que propicien la utilización de la propiedad minera, su circulación, la obtención, publicación y disposición de la información geológica, entre otras.

Un elemento fundamental para la sustentabilidad económica de la actividad minera es la capacidad de la industria y del estado de reponer los recursos que se extraen. Si bien los recursos mineros no son renovables, existe el potencial para descubrir nuevos yacimientos, los cuales raramente se encuentran expuestos, y por ende, requieren costosas y complejas labores para ser descubiertos. En este sentido, la exploración, y muy particularmente la exploración *greenfield*, es fundamental para asegurar la sustentabilidad del negocio minero³.

Presupuestos de exploración a nivel global y en Chile

El costo en exploración es sensible al precio de los metales y parece estar íntimamente ligado al ciclo de éstos. Esta situación no es la ideal, ya que la exploración minera es una industria cuyos resultados se observan en el largo plazo, y por ende las decisiones asociadas a ésta no deberían estar influenciadas por la visión de corto plazo que proviene del ciclo de los metales. Después de cuatro años de una continua reducción en el gasto global de exploración minera en metales no ferrosos⁴, la industria volvió a mostrar signos de recuperación en el año 2018, con gastos estimados en US\$10.100 millones⁵, un incremento de 21,6 % respecto a 2017, lo que reafirma el carácter cíclico de la inversión exploratoria y está en concordancia con la tendencia de los precios de metales.

Por otra parte, en Chile durante el año 2018 se incrementó la participación porcentual de la exploración *brownfield*, que viene en ascenso desde 2011 y continúa superando a la exploración básica o *greenfield*. Esto demuestra la menor disposición al riesgo por parte de las empresas de exploración, el cual es más alto en las etapas tempranas de un proyecto minero y en prospectos tipo *greenfield*⁶.

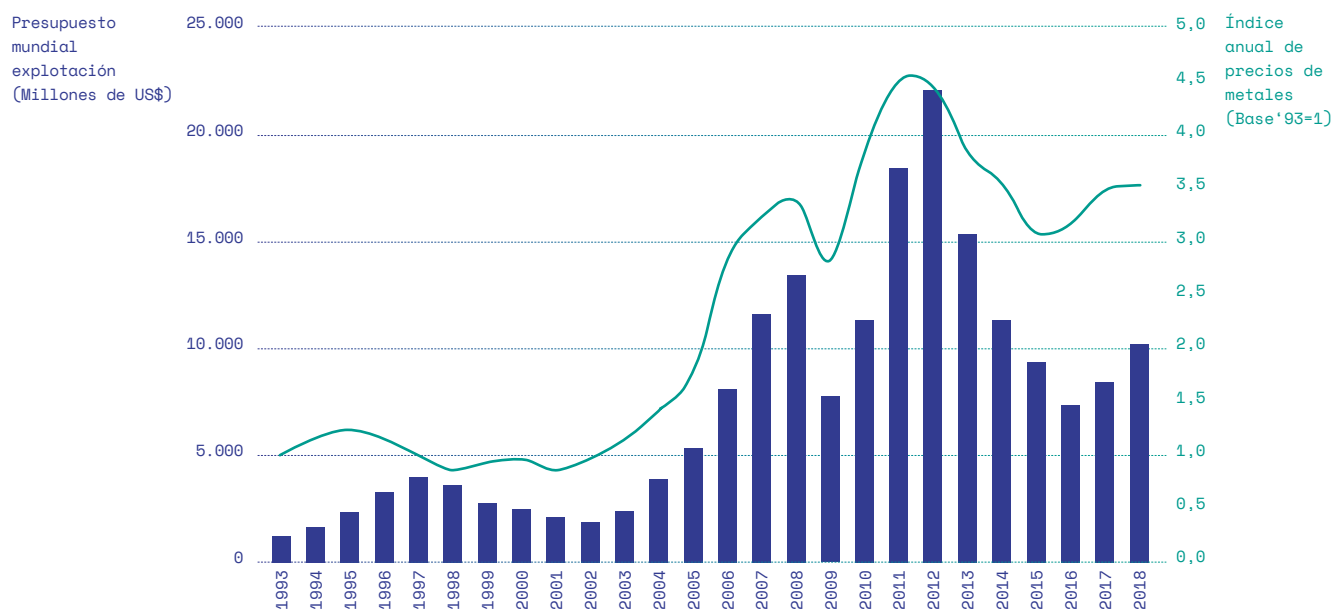
³ Desde el Cobre a la Innovación. Roadmap Tecnológico 2015 - 2035. Primera Edición 2016.

⁴ Los metales no ferrosos cubiertos por el estudio incluyen los presupuestos asociados a oro, metales base, metales del grupo del platino, diamantes, uranio, tierras raras, materiales para baterías y compuestos de potasio. No están incluidos en estas estimaciones el aluminio, carbón, mineral de hierro, petróleo, gas y minerales industriales.

⁵ Esta estimación (en US\$ nominales) corresponde al gasto total de exploración minera en metales no ferrosos que se diferencia del presupuesto total de exploración estimado en US\$9.620 millones (equivalente al 95% del total).

⁶ Minería Chilena, marzo 2017.

Gráfico 2_ Evolución del costo mundial en exploración e índice anual de precios de metales



Fuente: S&P Global Market Intelligence (2019)

Respecto de la distribución según el tipo de compañía minera, las denominadas *majors* o de gran minería siguen siendo las más relevantes con el 52,0% del presupuesto mundial, que representa además, para el 2018, un aumento de un 15,9% respecto al período anterior⁷.

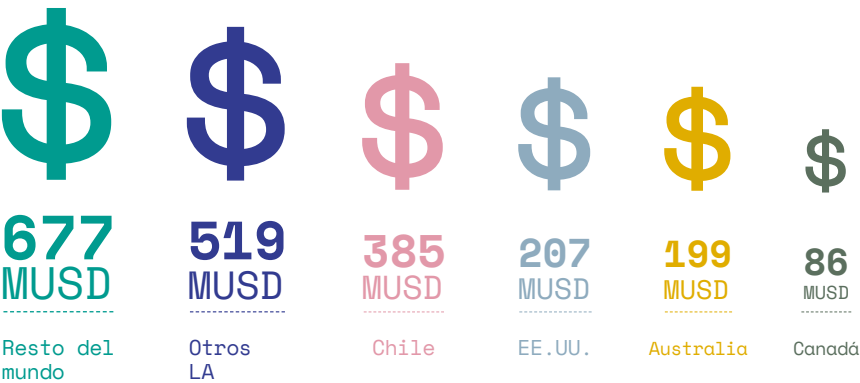
Por su parte, las empresas *juniors*, incrementaron su participación a un 32,0% en 2018 desde un 28,2% en 2017, con un incremento de su presupuesto en un 37,6%.

Canadá y Australia son los países que concentraron los mayores presupuestos de exploración a nivel global en 2018 con un 15% y 14% respectivamente. Latinoamérica se mantuvo como la zona más atractiva con presupuestos de exploración correspondientes al 28%.

En términos de presupuestos de exploración mundial asociados a la búsqueda de yacimientos de cobre en 2018 (por un total de US\$2.073 millones), Chile fue el principal destino, concentrando cerca del 18% (US\$ 385 millones), seguido por Perú y Australia.

⁷ Cochilco. Catastro de empresas exploradoras, 2018.

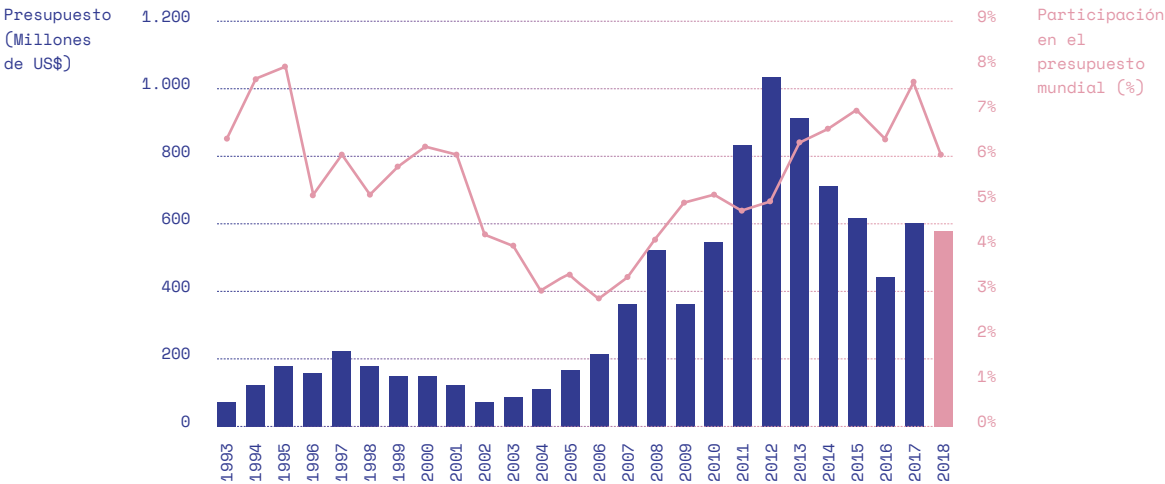
Gráfico 3_ Gasto en exploración mundial por yacimientos de cobre



Fuente: Cochilco (2019)

En Chile, el presupuesto en exploración minera se redujo durante el año 2018 a US\$ 576,2 millones, US\$ 27 millones por debajo el año anterior. Sin embargo, Chile vuelve a posicionarse entre las naciones más importantes en el sexto lugar a nivel mundial en el gasto en exploración.

Gráfico 4_ Evolución del gasto en exploración mundial y participación de Chile

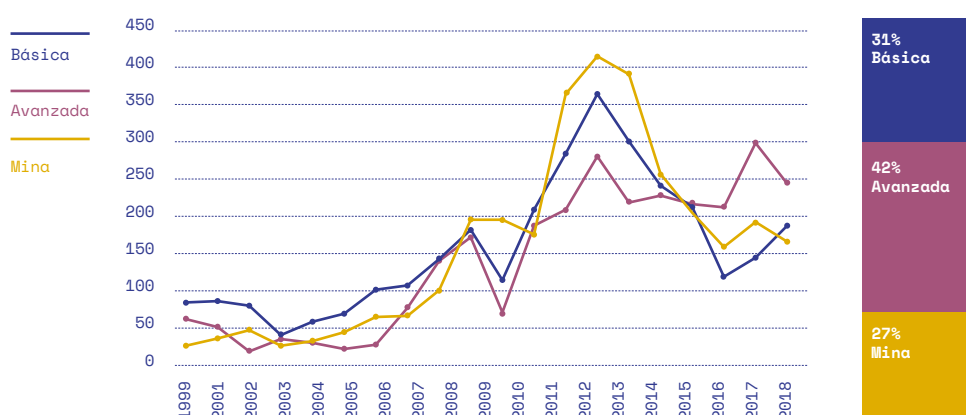


Fuente: Cochilco (2019)

En 2018, la etapa de exploración avanzada concentró el mayor presupuesto (US\$239,4 millones; 42%), seguida por la exploración básica (US\$178,2 millones; 31%) y finalmente la exploración «en la mina» (US\$ 158,6 millones; 27%).

Respecto al año 2017, el presupuesto destinado a exploración básica en el año 2018 se incrementó en un 40,7% y el tipo “mina” se redujo un 15,2%. En el caso de la exploración avanzada también se registró una baja de 23,7%.

Gráfico 5_ Gasto en exploración en Chile por etapa (Millones US\$)

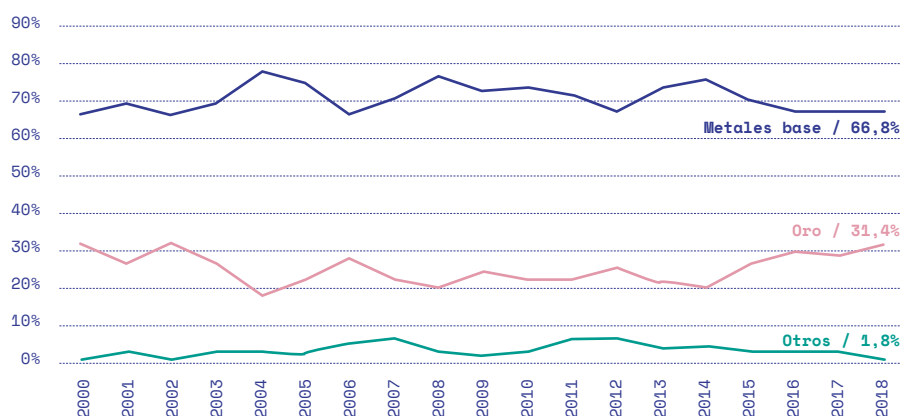


Fuente: Cochilco (2019)

Si se analizan los presupuestos según foco exploratorio, en Chile la búsqueda de metales base sigue siendo lo más importante, destinando en 2018 un 66,8% del presupuesto. Dentro de este grupo, predomina el cobre que recibe casi la totalidad de esta inversión. El segundo metal es el oro con un 31,4%. Un porcentaje mucho menor se invierte en prospectos de zinc, y el porcentaje restante es atribuible a un grupo mixto de otros recursos tales como la plata, molibdeno, rutilo o litio. Cabe destacar, que durante 2018, se observó una reducción en los presupuestos de exploración destinados a cobre (-6,3%) y un incremento en los presupuestos destinados a prospectos de oro (5,9%)⁸.

⁸ Sernageomin. Propiedad Minera, 2017.

Gráfico 6_ Distribución porcentual del gasto de exploración en Chile por foco exploratorio



Fuente: Cochilco (2019)

El listado de las diez empresas con mayores presupuestos en exploración en 2018 lo lidera la chilena Antofagasta Plc (AMSA) con un 18%, seguida por Gold Fields con 13%, Anglo American Plc con 9%, la estatal Codelco con 6% y la canadiense Barrick con un 5%. Destaca el ingreso de Gold Corp al ranking de las 10 principales empresas⁹.

⁹ Sernageomin. Propiedad Minera, 2017.

Gráfico 7_ Distribución porcentual del presupuesto en exploración 2018 en Chile según compañía



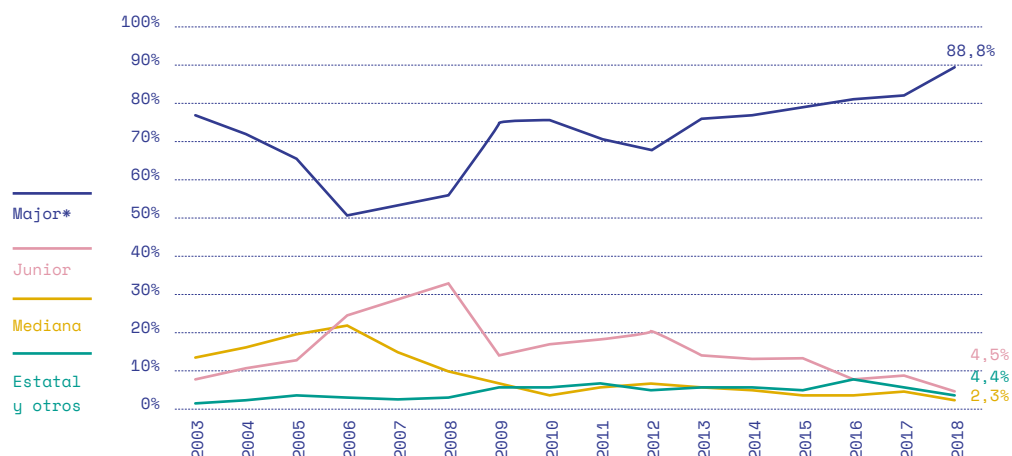
Fuente: Cochilco (2019)

En Chile, las empresas *major* o de gran minería son los actores más relevantes en el ámbito de la exploración con el 88,0% del presupuesto. Junto con mantener su participación, las *major* aumentaron su presupuesto para 2018 en alrededor de un 4% respecto al periodo anterior.

En el caso de las empresas *junior*, su participación se redujo a un 4,5% en 2018, y redujeron su presupuesto en un 52% . En tanto las estatales y otras, y las empresas medianas, alcanzaron participaciones de 4,4% y 2,3%, respectivamente¹⁰.

¹⁰ Sernageomin. Propiedad Minera, 2017.

Gráfico 8_ Distribución porcentual del presupuesto en exploración en Chile según el tipo de compañía



Fuente: Cochilco (2019)

Como se evidencia con estas cifras, Chile tiene la necesidad de retomar la senda del crecimiento en materia de producción de cobre, pero no sólo desde la perspectiva de la mejora operacional, sino que también desde el descubrimiento de nuevos depósitos que sumen a las reservas ya identificadas, y que permitan mantener la posición de liderazgo que nuestro país ha mantenido por muchos años.

Para ello, la exploración, y particularmente la exploración en etapas tempranas, y las realizadas por empresas junior, es uno de los focos en el cual debiera enfocarse la política pública.

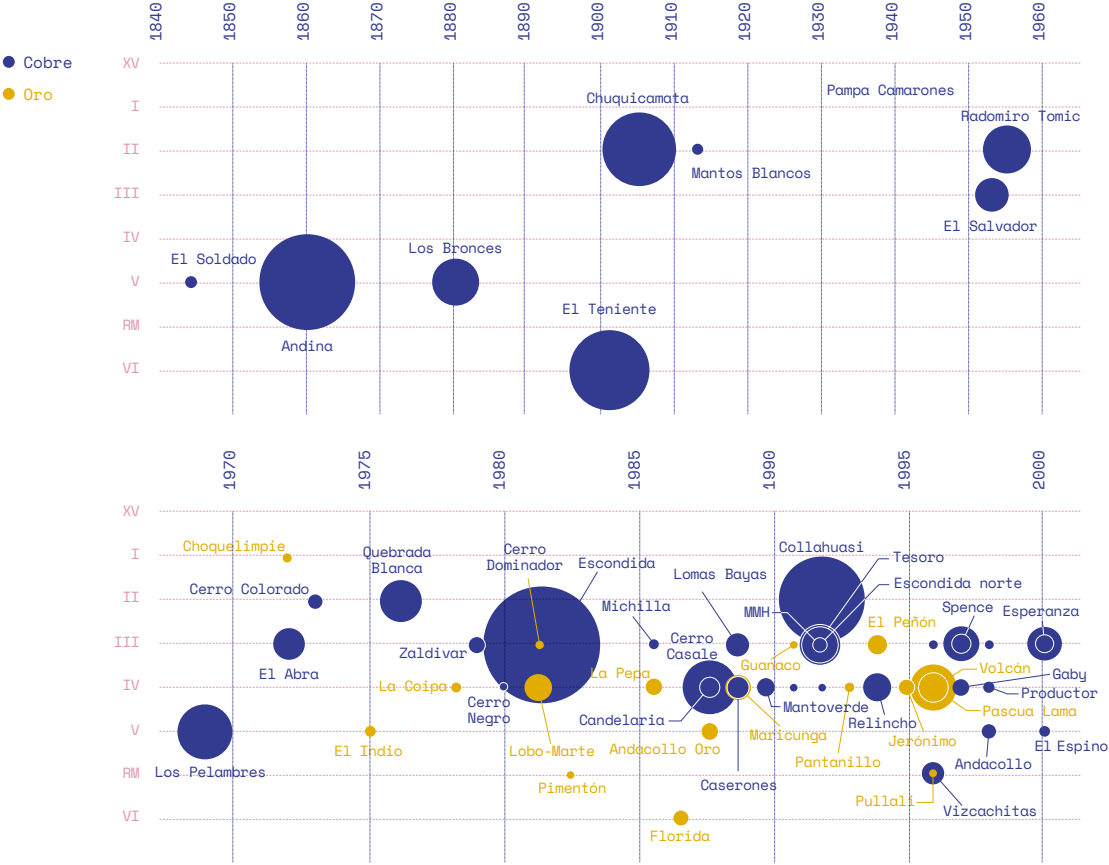
Gestión de la Propiedad Minera en Chile

En el caso de Chile, la propiedad minera se gestiona a través de concesiones, que pueden ser de exploración o explotación. La institucionalidad, regida por la Constitución de la República de Chile, la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras (Ley N° 18097, 1981), y el Código de Minería (1983), establece las bases del desarrollo de la actividad minera actual del país.

El actual sistema de propiedad minera ha sido clave para promover el desarrollo de la industria, como se evidencia en el fuerte aumento de la producción de cobre de mina en Chile a partir de los años 90, principalmente porque los yacimientos descubiertos después de su entrada en vigencia se convirtieron más tarde en las operaciones mineras de gran escala que sustentan la producción actual de cobre, y que distinguen a Chile como un país minero.

El gráfico siguiente representa el tamaño de cada yacimiento en toneladas y distingue entre yacimientos de oro y cobre.

Gráfico 9_ Año de descubrimientos y tamaño de los principales yacimientos de Cu-Au en Chile por región



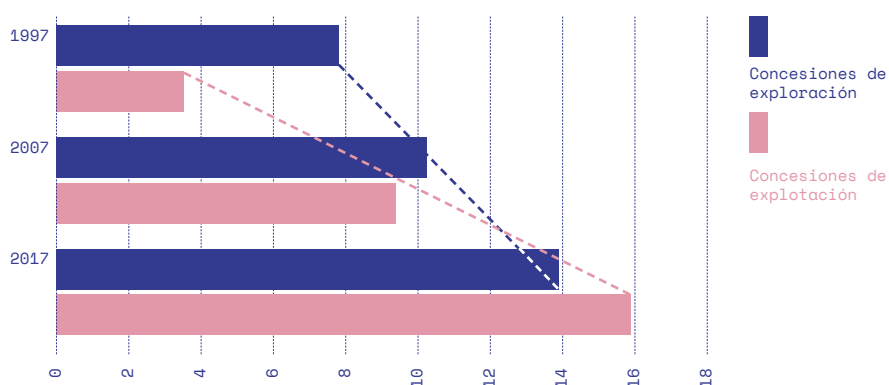
Fuente: Cochilco

Para el 2003, 20 años después de la entrada en vigencia del Código de Minería, la producción chilena se había multiplicado en 3,9 veces, llegando de 1,2 a 4,9 Millones de TM de cobre fino. Además de esta fuerte expansión de la producción, un aspecto clave a destacar es el aumento de la producción en manos de empresas privadas.

En efecto, entre 1983 y 2003, la minería privada aumentó su producción 13,6 veces (de 0,2 a 3,3 Millones de TM de cobre fino). En cambio, en el mismo período, Codelco también aumentó su producción 1,5 veces (de 1 a 1,5 Millones de TM cobre fino). El nuevo sistema de propiedad minera estableció un modelo confiable para otorgar derechos de exploración y explotación de sustancias minerales. Esto se refleja en los niveles de inversión de los últimos 30 años, los que se traducen en la expansión de la producción de cobre chileno.

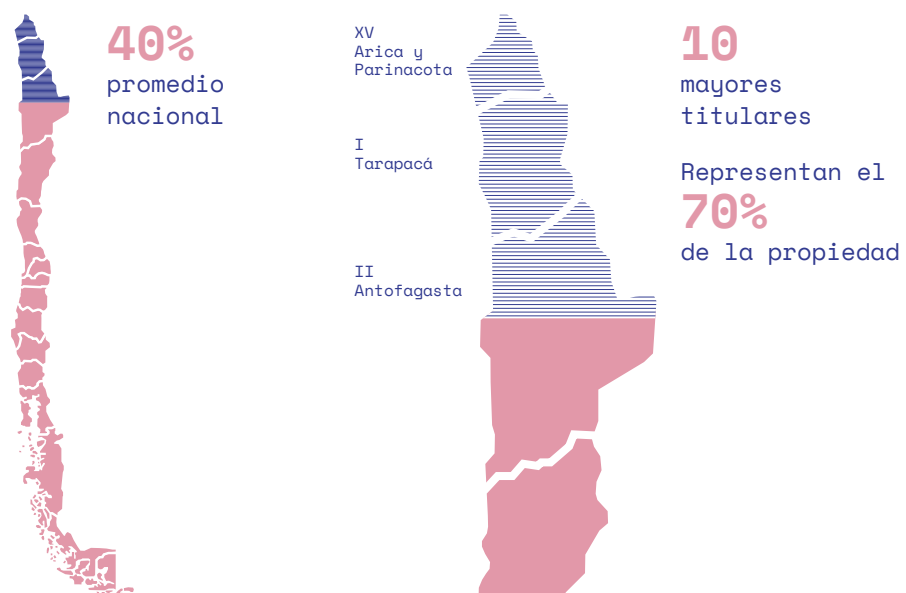
El siguiente gráfico muestra la evolución de áreas concesionadas para exploración y explotación en los últimos 20 años.

Gráfico 10_ Evolución hectáreas concesionadas (Millones de há)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Anuario Minería Sernageomin (1997, 2007 y 2017)

Figura 1_ Distribución de la propiedad minera



Fuente: Elaboración propia a partir de datos Cochilco

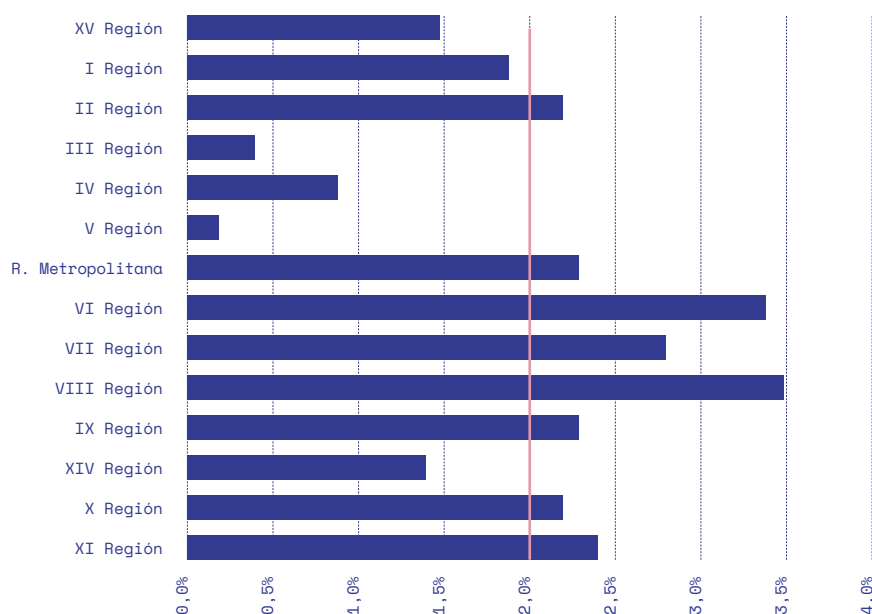
Se ha podido establecer que la concentración a nivel nacional se ha mantenido en un rango similar desde el año 2000, mientras que entre las regiones mineras solo Antofagasta ha mostrado un aumento significativo en su concentración de propiedad durante el período analizado.

Las regiones de Arica y Parinacota (XV) y Tarapacá (I) muestran una tendencia a disminuir su concentración desde el año 2006. Este fenómeno también se observa, aunque de manera menos marcada, en la región de Atacama que se mantiene bajo los niveles promedio del país.

Cabe destacar que la concentración en la propiedad minera no se asocia necesariamente a una ineficiencia del mercado, pues el titular de un proyecto minero desconoce a priori la extensión total de un yacimiento: Por esto, debe sobreestimar la superficie total a solicitar en primera instancia, para incorporar recursos valiosos. Desde otro punto de vista, un proyecto podría tener propiedad adicional y distante de la ubicación actual de la faena debido a que existen reservas consideradas en la planificación minera cuya explotación se llevaría a cabo en el mediano y largo plazo, lo que correspondería a un comportamiento natural desde el punto de vista de la industria y de la continuidad operacional de los proyectos.

Para el caso de la rotación de la propiedad, las mediciones de volatilidad o inestabilidad de un mercado representan maneras de dar cuenta del nivel de actividad y las transacciones que se dan internamente, lo que se asocia a las barreras de entrada y salida que éste posee.

Gráfico 11_ Porcentaje de área transada promedio por región en el periodo 2006 - 2013



Fuente: Cochilco en base a datos de Sernageomin

En este sentido, en promedio cada año los titulares deciden mantener un 95% del área de explotación del año anterior e intercambiar un 2%. El 3% restante del área no retenida se abandona para el año siguiente y, además, el área nueva incorporada representa un 10% del área total de explotación inmediatamente anterior.

Se aprecia que las regiones mantienen un comportamiento relativamente similar, por lo cual no podría afirmarse que ocurre un mayor nivel de movimiento en las propiedades en las regiones con mayor interés minero. Solo en las regiones VII, VIII, IX y XII se observa una disminución significativa. A nivel de los 10 mayores titulares de pertenencias mineras del país, se evidencia que éstos solo aportaron con un 17% de las concesiones de explotación que cambiaron de titular, lo que indica que la rotación es baja respecto de ellos.

Utilización de la propiedad

Las condiciones dadas sobre la concentración en polos de interés geológico y la estabilidad en la propiedad de la pertenencia minera no son condicionantes para determinar que el mercado se comporte de manera ineficiente. Ambos factores se pueden entender como decisiones racionales frente a titulares que se encuentren desarrollando actividades mineras en la zona concesionada.

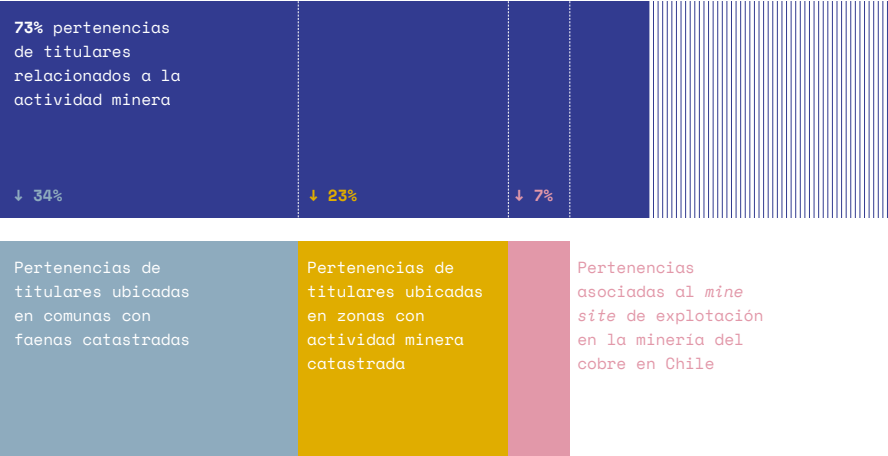
Por otra parte, tal como indica la Constitución Política de la República, la concesión minera da derecho al dueño a desarrollar la actividad necesaria para satisfacer el interés público que justifica su otorgamiento¹¹. Asimismo, distintos autores han destacado que el sistema de concesiones mineras actualmente no promueve el desarrollo y la utilización con fines mineros de la concesión, lo que crea una merma en el potencial minero del país, ya sea por fines especulativos o con fines de defensa del suelo¹².

Según el análisis realizado por Cochilco, la utilización de las pertenencias mineras se estima en un 23% del total del área de explotación, considerando las concesiones que posee un titular en la zona donde se declara una faena minera.

¹¹ Constitución Política del Estado de Chile, 1980.

¹² La defensa se refiere a que existan propietarios que crean concesiones mineras con el fin de defender la actividad que se realiza en superficie de agentes que buscan imponer el derecho del subsuelo sobre el suelo con el solo fin de una compensación económica y no necesariamente para realizar minería.

Figura 2_ Estimación de pertenencias mineras



Fuente: Cochilco en base a información de Sernageomin y León (2012)

Los resultados del análisis se resumen de la siguiente manera:

Existen por lo menos cuatro situaciones generales que explican un menor uso de una concesión con fines mineros. En primer lugar, se encuentran aquellas propiedades que, si bien no están actualmente en explotación, han sido previamente reconocidas, cuentan con información geológica y revisten cierto interés para el titular. En segundo lugar, podría ser que la propiedad no tenga ni haya tenido ningún tipo de actividad, debido a que el titular aún no define la manera de reconocer su propiedad o las condiciones externas aún no se lo permiten. En tercer lugar, se presenta el hecho de titulares que, sin el interés de realizar actividad minera, utilizan sus propiedades con fines especulativos en el sentido que esperan poder transarlas a una empresa minera que sí tenga interés en explorarla y explotarla. Por último, están los casos de titulares que usan la concesión minera para resguardar otras actividades que se realizan en la superficie, tales como proyectos agrícolas, inmobiliarios o energéticos, debido a la prioridad que el derecho de propiedad minera tiene bajo ciertas condiciones sobre el predio superficial. Para los dos últimos casos, la literatura cuenta con datos particulares que demuestran su existencia (León, 2012). El tercer caso aparece frecuentemente asociado a exploraciones *grassroots*.

La disponibilidad de información geológica

El acceso a la propiedad minera es un desafío que deben enfrentar los actores de la industria, y muy especialmente los interesados en desarrollar exploración greenfield. Sin embargo, un desafío no menor también está dado por el reducido acceso a la información geológica de la propiedad que se desea explorar.

El artículo 21 del Código de Minería ha exigido a las empresas desde 1983 la entrega de la información geológica básica de sus labores de exploración. Sin embargo, dicho artículo no tenía una sanción asociada, y por ende, no había manera para el Servicio Nacional de Minería de exigir su cumplimiento.

Si bien esto cambió con la dictación del reglamento que regula la entrega de información de carácter general obtenida de los trabajos de exploración geológica básica, del 20 de junio de 2016, lo concreto es que la disponibilidad de la información en la industria es aún un desafío pendiente de resolver.

A lo anterior se agrega la escasa información de importancia minera que el Estado ha generado a través del Servicio Nacional de Geología y Minería. Nuestro país, no cuenta con un levantamiento geofísico de toda su extensión territorial.

Estas barreras dificultan la entrada de nuevos actores a la exploración, y especialmente a la exploración greenfield para conocer y disponer de información que podría ser pública y de fácil acceso.

El escenario geológico y la tecnología

Los depósitos mineros pueden estar expuestos o cubiertos. Estos últimos pueden estar cerca de la superficie o ser más bien profundos. Históricamente, la mayoría de los descubrimientos correspondió a depósitos expuestos, es decir, a la vista del ojo humano. Sin embargo, tales depósitos han sido ya mayoritariamente descubiertos, por lo que la búsqueda actual se concentra en depósitos cubiertos cuya identificación es más difícil, ya que las técnicas tradicionales de geología regional, geoquímica y geofísica tienden a no ser efectivas.

Por otro lado, el potencial de depósitos bajo cubierta es alto, considerando que las características geológicas de los sectores expuestos y cubiertos son similares. Casi la mitad del norte de Chile está cubierto por grava, y la mitad restante cuenta con roca expuesta.

El desafío es, por ende, desarrollar nuevas herramientas tecnológicas que permitan aplicar técnicas de exploración a zonas cubiertas y/o profundas.

La planificación territorial

Otro de los desafíos que tenemos como país en materia de exploración corresponde a la planificación territorial. Se trata de un área en la que participan actores regionales y locales, sin que exista una política país al respecto.

Esta situación afecta a la industria minera, y especialmente a la exploración greenfield que busca depósitos donde no hay operaciones actualmente, porque deja un espacio de incertidumbre acerca de si la utilización de esa extensión de suelo puede ser ocupada por un proyecto minero o no.

Este tema es tan sensible que el ránking, que anualmente evalúa a los países como destino de inversión minera, castigó a Chile bajándolo del lugar 11 en 2015 al 39 en 2016. Sin embargo, en el año 2019, el Instituto Fraser volvió a clasificar a Chile como un interesante país para la inversión minera ubicándolo en el lugar 6° a nivel mundial.

Condiciones para potenciar la exploración minera en Chile

La minería del cobre es una actividad económica dedicada a la extracción de recursos no renovables y presenta características tan dinámicas y complejas que puede resultar poco realista analizarla sólo desde el punto de vista de la exploración.

Estimaciones de Bloomberg concluyen que las futuras necesidades de cobre en el mundo serán significativamente mayores que los recursos y reservas identificados actualmente, lo que desde luego representa una gran oportunidad para nuestro país, considerando la cuantía de este mineral de la que dispone nuestro territorio y el gran conocimiento que poseemos acerca de su explotación.

Por otra parte, la actividad exploratoria asegura la actividad minera en el país, al menos para los principales yacimientos por los próximos 50 años, manteniendo los niveles actuales de producción. No obstante, dada la mayor demanda de cobre que se estima para el futuro, se hace necesario aumentar los recursos y reservas en una proporción que permita satisfacer esta demanda elevada. Por lo tanto, el desafío de nuestro país es incentivar el descubrimiento de nuevos depósitos, lo que hace necesario generar una serie de condiciones que permitan aprovechar de mejor manera estos recursos, optimizar la utilización de la propiedad minera y propiciar su exploración y posterior explotación.

En el ámbito del fomento a la actividad exploratoria se identifican tres líneas de acción.

Generación de información geológica básica

La existencia de información geológica precompetitiva pública, que sea confiable y oportuna, es un factor determinante en la competitividad de los distritos mineros hoy en día. Chile ha dado pasos importantes en esta dirección, como es la existencia de la figura de Persona Competente y la aprobación del reglamento asociado al artículo 21 del Código de Minería. La ejecución de un plan nacional de geología por parte de Sernageomin también es un avance. No obstante, todavía hacen falta políticas y recursos para contar con un sistema de información geológica y de propiedad apropiado, dada la importancia que tiene y debe tener Chile en la industria de la exploración.

Desarrollo de instrumentos de fomento a la exploración

Se ha discutido acerca de las ventajas de un incentivo tributario a la actividad exploratoria, que permita deducir los gastos de esta etapa del negocio minero. Esto existe en economías más desarrolladas en este ámbito como Canadá y Australia, en donde la actividad de las empresas de exploración representa un motor de desarrollo para la industria financiera. Sin embargo, esta no es la única manera de fomentar la exploración, ya que existe la posibilidad de asignar fondos mediante concursos, o bien, mediante la asignación directa, como ocurre en Australia o Canadá en períodos donde el financiamiento de capital de riesgo se hace más escaso y la actividad exploratoria se deprime, con el consiguiente aumento del desempleo y el impacto en la sustentabilidad de largo plazo de la actividad extractiva. En este sentido, el instrumento de reconocimiento de reservas que tiene ENAMI es un antecedente de la existencia de este tipo de políticas, pero necesita una evaluación y probablemente una modernización para su potenciamiento.

Generación de infraestructura básica

Pocas veces se asocia la existencia de infraestructura básica para la explotación como un incentivo a esta actividad. La existencia de propiedad minera disponible, financiamiento e información geológica de calidad, no asegura que se realice la exploración, pues la inexistencia de infraestructura de caminos, distribución eléctrica, agua, plantas de tratamiento e instalaciones portuarias, restringe las zonas de exploración a lugares donde sí existen estas condiciones o la condiciona a la búsqueda de proyectos de un tamaño que permitan financiar esta infraestructura.

Como se puede apreciar, aún existe bastante espacio para mejorar el desempeño de la actividad exploratoria en Chile y de esa manera maximizar el valor del uso de los recursos minerales con los que contamos, generando adicionalmente todos los encadenamientos que se pueden derivar desde esta etapa del negocio minero.

Este es uno de los espacios de mejora que se suma a los ya identificados por el Programa Nacional de Minería Alta Ley y donde Cochilco ha aportado valiosa información y análisis de valor para la industria.

visión del núcleo

*Alcanzar un liderazgo
tecnológico mundial
para capturar,
procesar e interpretar
información para
la búsqueda de
yacimientos minerales
en zonas profundas*



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el Núcleo Exploraciones, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió cuatro desafíos. Para cada uno de ellos se identifican posibles soluciones y líneas de I+D+i.

La exploración minera es una actividad de captura y almacenamiento, procesamiento e interpretación sistemática de la información que se realiza en etapas sucesivas que requieren financiamiento.

En términos muy simples, la exploración minera corresponde a un proceso que puede dividirse en cuatro fases: i) Financiamiento; ii) Captura y almacenamiento de información; iii) Procesamiento de información; iv) Caracterización e interpretación. A continuación se indica cuáles de los desafíos identificados aplican a cada una de las fases.

Desafío 01

Fortalecer la institucionalidad en los aspectos tecnológicos

Esta iniciativa busca fomentar y dinamizar la exploración minera, y particularmente aquella denominada *greenfield*, contribuyendo a incrementar el número de proyectos y de agentes que realizan exploración en nuestro país.

Uno de los aspectos que se han definido como relevantes es simplificar el sistema de permisos asociados a exigencias de trabajo en altura y temas arqueológicos, por citar algunos.

Además, a partir del desarrollo de esta iniciativa se busca regularizar el sistema de coordenadas que referencia actualmente los vértices de las coordenadas determinadas en proyección U.T.M. de las concesiones mineras en Chile desde Sistema referencia Mixto Datum Provisorio Sudamericano La Canoa 1956 y/o al Datum Sudamericano Chua, Brasil 1969 a Coordenadas SIRGAS WGS84¹³.

Promover un marco regulatorio institucional que dinamice la exploración

Solución

01 Apoyar el desarrollo tecnológico en los aspectos relevantes

Líneas I+D+i

Mejoras en el trabajo en altura.

Herramientas tecnológicas para la mitigación de impactos en sitios arqueológicos.

02 Cambiar el sistema de referencia actual captura almacenamiento procesamiento

Técnicas de geomática y sistemas de información geográfica aplicados al cambio de sistemas de coordenadas.

Fuente: Elaboración propia

¹³ Sernageomin, Propiedad Minera 2017

Desafío 02

Desarrollo y transferencia tecnológica en la captura y almacenamiento de información geológica

Como tendencia global, y en particular en Chile, cada vez es menos probable descubrir yacimientos que afloran superficialmente. Esta realidad obliga a explorar en zonas profundas y logísticamente más desafiantes.

El desafío presentado y las iniciativas respectivas buscan generar oportunidades para el desarrollo y uso de tecnologías para la captura y almacenamiento de la información para el descubrimiento de yacimientos minerales bajo cubierta y en profundidad.

Se visualizan impactos importantes para el ecosistema de I+D+i relacionado al desarrollo de este tipo de tecnologías.

Desarrollo y transferencia tecnológica en la captura y almacenamiento de la información.

Solución

01 Transferencia de tecnologías de exploración

Líneas I+D+i

Tecnologías para evaluación de peligros geológicos.

Tectónica aplicada.

Instrumentación geofísica.

Virtual drilling.

Uso de drones.

02 Captura de información con énfasis de zonas profundas

Tomografía sísmica.

Paleomagnetismo.

Geo-tecnologías para la exploración minera en áreas cubiertas.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 03

Desarrollo tecnológico en el uso de información

Avances tecnológicos en distintas áreas asociadas a desarrollo de sensores, comunicaciones, internet o flujos de información en línea, han permitido generar un inmenso volumen de datos. Esto requiere del desarrollo de tecnologías para su procesamiento y utilización. En la actualidad, el análisis y la interpretación de grandes volúmenes de datos representa un desafío clave para la generación de conocimiento útil que apoye a las actividades de procesamiento, caracterización e interpretación para la búsqueda de yacimientos.

Por otra parte, se destaca la aplicación de los conceptos de *machine learning* y la técnica de reconocimiento de patrones que se aplican principalmente en procesos de ingeniería, computación y matemáticas y que tienen como objetivo analizar, organizar y compilar información, a partir de un cúmulo de datos, generando conocimiento y las relaciones entre estos.

Herramientas como Analytics y los algoritmos de aprendizaje automático están ayudando a las empresas mineras a obtener una visión integrada del negocio a partir de sus datos. Al alimentar estos algoritmos con datos en línea y analizar los registros históricos, podría extraerse conocimiento futuro a partir de características sobre el desempeño de cada una de las operaciones.

En el ámbito del desarrollo de técnicas de manejo y capitalización de la información para la búsqueda de blancos de exploración, se dispone de antecedentes de compañías mineras que utilizaron Internet para revelar información geológica y someter a concurso público -con premio monetario de por medio- la búsqueda de yacimientos minerales, experiencia que se conoce como *crowdsourcing*. Esta iniciativa permitió a una compañía minera descubrir varios yacimientos que incrementaron rápidamente su valor de mercado.

Desarrollo tecnológico en el uso de información

Solución

01 Incorporación de big data, herramientas analíticas e inteligencia artificial

Líneas I+D+i

Aplicación de minería de datos.
 Uso de machine learning, analytics y algoritmos de aprendizaje.
 Geoestadística supercomputacional.

02 Técnicas de manejo y capitalización de la información

Iniciativas asociadas a *crowdsourcing*.
 Caracterización geoquímica para la gestión de impactos medioambientales.
 Modelamiento geológico y estructural con herramientas computacionales avanzadas.
 Creación de modelos genéticos.
 Caracterización de rocas mediante análisis de imágenes para el desarrollo de modelos predictivos geo-metalúrgicos.
 Integración de información geológica y geoquímica en modelos computacionales de alto desempeño.

Fuente: Elaboración propia

Desafío

04

Desarrollar y profundizar modelos de asociación

Desarrollar modelos colaborativos en Chile entre los diferentes actores en el proceso para resolver los desafíos planteados en toda la cadena del valor del negocio de la exploración minera en Chile aparece como una necesidad creciente.

Iniciativas relacionadas al desarrollo de sondajes de menor costo o la migración de las técnicas de perforación y geofísica utilizadas en otras industrias son desafíos que pueden abordarse mediante modelos colaborativos.

Desarrollar y profundizar modelos de asociación

Solución	Líneas I+D+i
01 Modelo colaborativo para desarrollo de prototipos	Desarrollos de sondajes de menor costo. Migración de técnicas de perforación y geofísica desde otras industrias.
02 Contar con espacios de pruebas	Creación de centro de excelencia en geociencias.

Fuente: Elaboración propia

02 núcleo operación y planificación minera

El capítulo núcleo operación
y planificación minera fue
desarrollado en base al trabajo
realizado por Murray Canfield ,
Jorge Cubillos, José Ignacio Guzmán,
Enrique Jélvez, Javier Ruiz del
Solar, Paul Vallejos y Norma Vargas.



Antecedentes

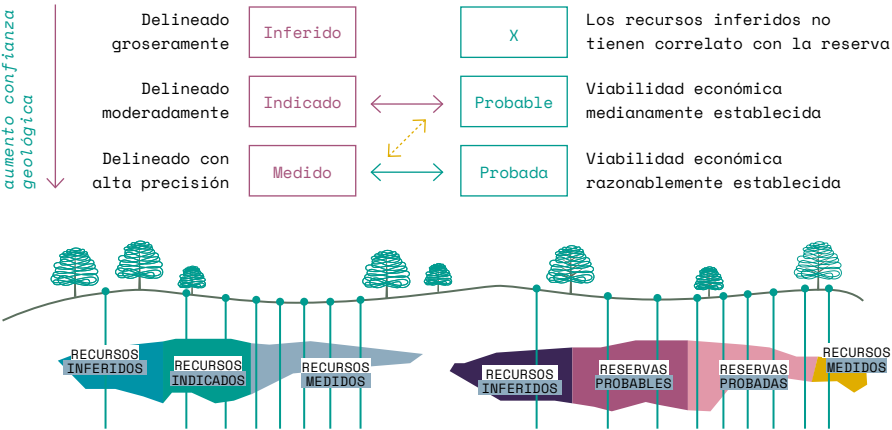
Evolución de los recursos y reservas en Chile

En las últimas décadas, ante aumentos importantes de la demanda de cobre, la reacción de la oferta ha sido aumentar la tasa de extracción e incrementar el gasto en exploración, generando dinamismo en el descubrimiento de nuevos yacimientos y el reconocimiento de nuevos recursos en los existentes. Sin embargo, la explotación eficiente de los recursos no renovables implica un nivel de extracción de reservas que maximice el valor en el tiempo de la dotación de recursos.

La figura muestra un esquema elemental de las categorías de recursos y reservas utilizadas por CRIRSCO (*Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards*), definiendo por nivel de delineación geocientífica (recurso) y viabilidad económica (reserva) y categorizando de acuerdo con el aumento de confianza geológica y riesgo de cada categoría. En términos de aumento de confianza geológica se distinguen recursos medidos, indicados e inferidos. La conversión de estos recursos a reservas (probadas y probables), requiere de la aplicación de factores modificantes, es decir, aquellos parámetros y factores técnicos, económicos, medioambientales, legales y gubernamentales relevantes que viabilicen un proyecto minero.

Figura 1_ Categorización de recursos y reserva mineral

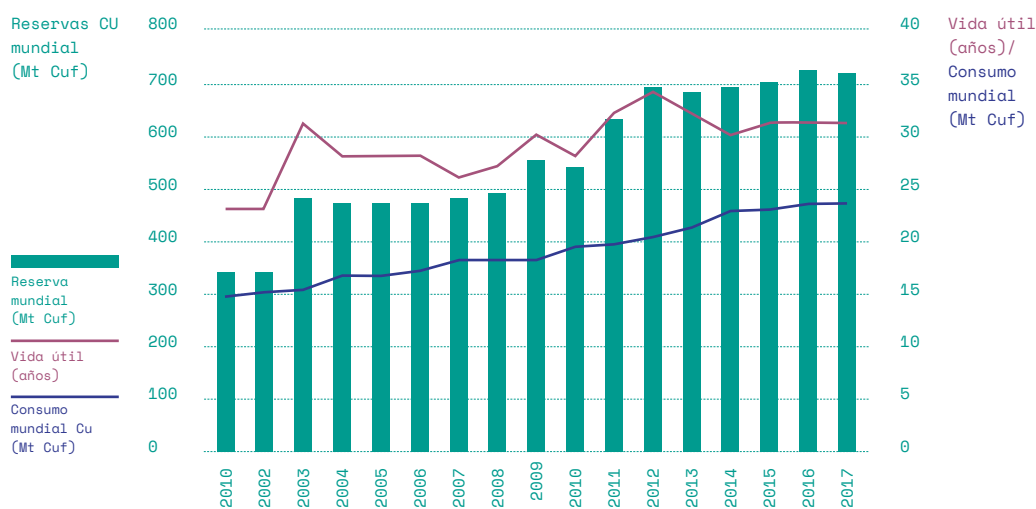
Delineación geocientífica Viabilidad económica confirmada



Fuente: González (2015)

A partir de las cifras del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y las cifras de consumo de cobre refinado proporcionadas por Cochilco, se observa en el siguiente gráfico que las reservas mundiales de cobre de 2001 deberían agotarse el año 2023. Sin embargo, las nuevas condiciones de mercado generadas en el denominado “super ciclo” de precios, que se registró desde fines de 2003 a 2014, condujeron a un boom de la exploración y a una reclasificación de los recursos, lo cual generó que las reservas reconocidas el año 2017, más el cobre que se extrajo durante el periodo 2001-2017, equivalgan a tres veces las reservas identificadas el año 2001.

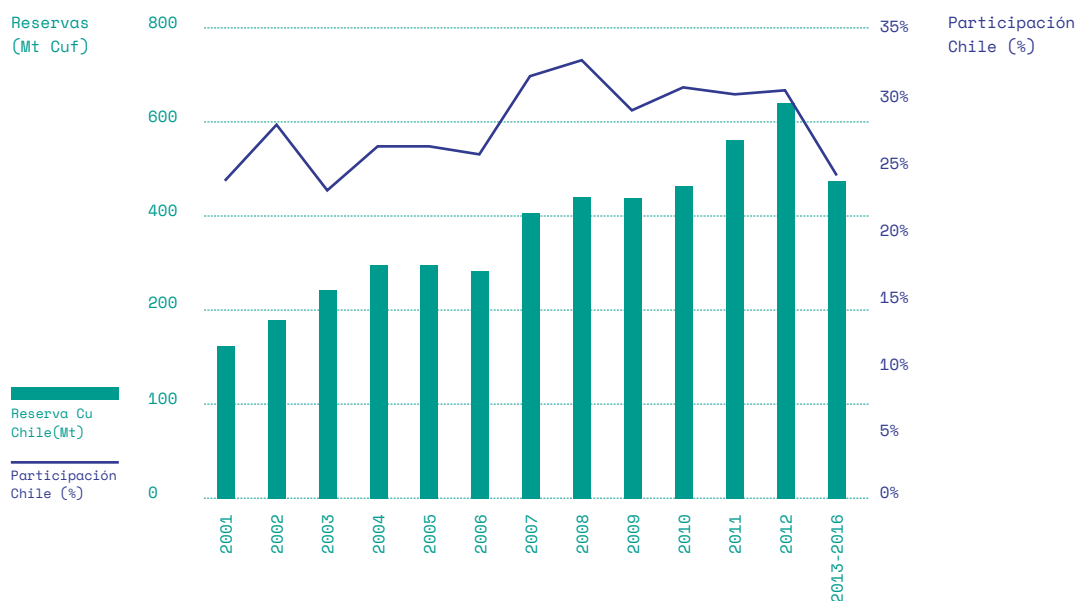
Gráfico 1_ Total de reservas de cobre en el mundo, consumo mundial y vida útil estimada



Fuente: Elaboración propia en base a USGS y anuario de Cochilco (2001-2017)

El gráfico 2, preparado con datos del Anuario 2016 del Servicio Nacional de Geología y Minería, muestra que el promedio anual de las reservas en el período 2013-2016 fue de 167 millones de toneladas de cobre, cifra que representa un 24 % de las reservas mundiales informadas por el USGS y que posiciona a Chile como el país con las mayores reservas de mineral de cobre del mundo.

Gráfico 2_ Evolución reservas de cobre en Chile (2001-2017)



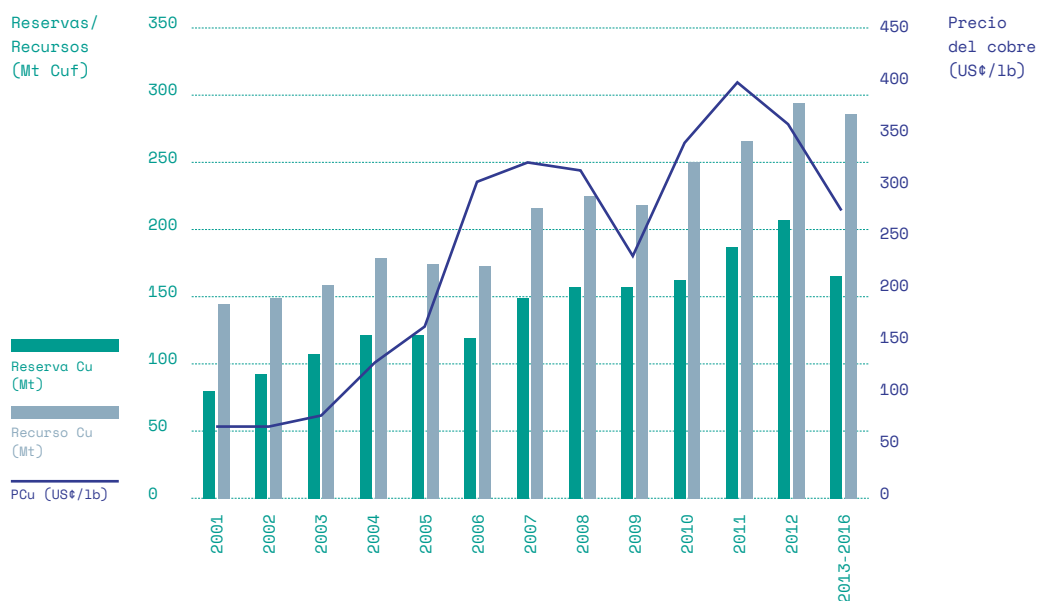
Fuente: Elaboración propia en base a cifras de Sernageomin y USGS

Estas cifras, sumadas a los casi 90 millones de toneladas que ya se han extraído en los últimos 17 años, los nuevos yacimientos, y el cambio en la clasificación económica de los recursos por razones de mercado, han generado un incremento en las reservas de cobre de 3,2 veces respecto a lo que existía en 2001.

El gráfico 3, preparado por Sernageomin, muestra la evolución de recursos (medidos e indicados) y reservas de cobre en Chile en el período 2001-2016 cuantificadas en millones de toneladas de cobre fino contenido. Cabe destacar que el tonelaje asociado a la reserva ha oscilado en torno al precio del cobre y lo notable es que los recursos medidos e indicados se han duplicado en este período.

Este inventario muestra que, a la tasa de extracción actual, la vida útil de los yacimientos podría sustentarse perfectamente por más de 80 años. En este gráfico, no se incorporan cerca de 350 millones de toneladas de cobre fino contenido en recursos minerales inferidos, que en el largo plazo podrían ser categorizados como recursos medidos e indicados y posteriormente convertidos en reservas.

Gráfico 3_ Evolución de las reservas y recursos medidos+indicados de cobre en Chile (2001-2016)

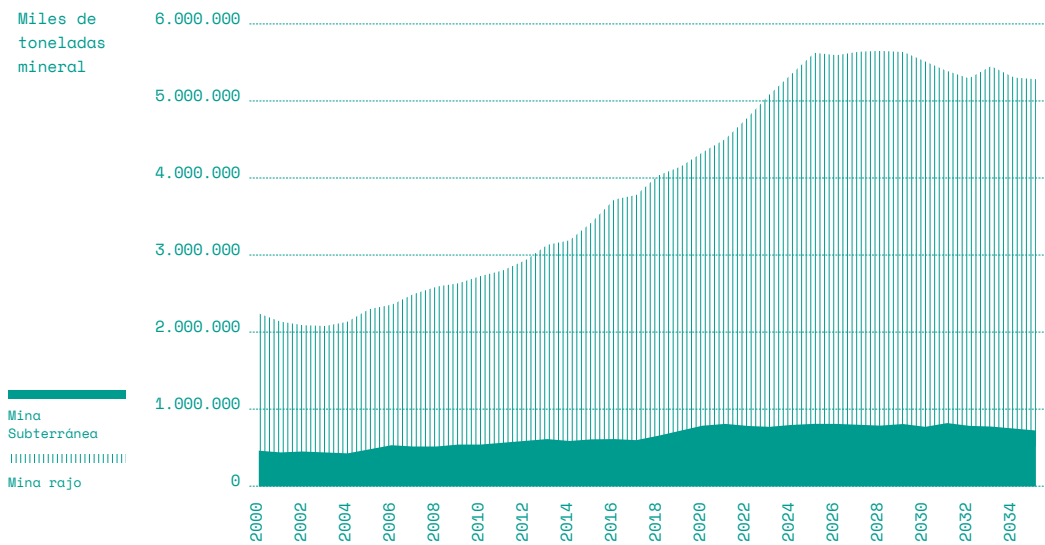


Fuente: Elaboración propia en base a cifras de Sernageomin y USGS

Minas de rajo abierto y subterráneas

El siguiente gráfico muestra que la mayor parte del mineral extraído actualmente en Chile y el mundo proviene de minas de rajo abierto. Durante el 2018, se extrajeron casi 4 mil millones de toneladas de mineral de cobre a nivel mundial, de las cuales cerca de un 85% corresponde a producción de minas de rajo y el resto a minas subterráneas.

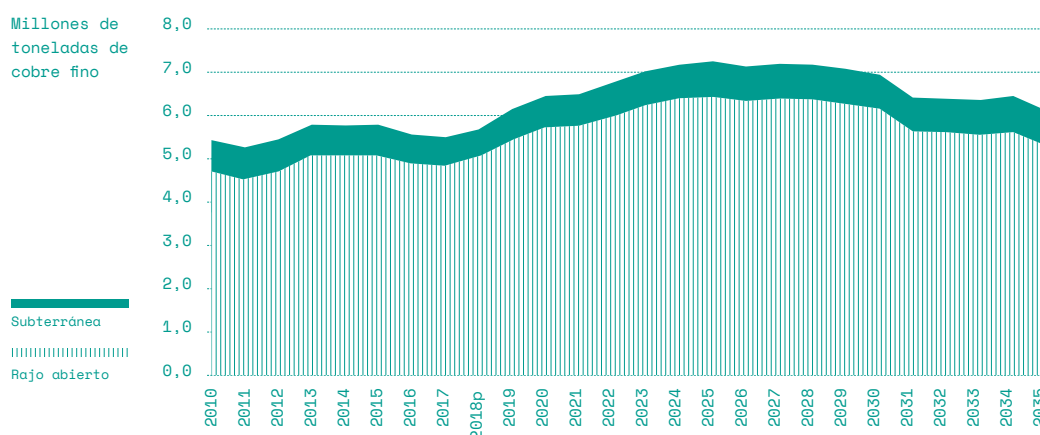
Gráfico 4_ Mineral de cobre extraído en el mundo, periodo 2000-2035



Fuente: Cochilco (2018)

El gráfico 5 muestra las proyecciones realizadas por Cochilco para la producción chilena de cobre por tipo de explotación de minería, a rajo abierto y minería subterránea. Se estima que hacia el año 2035, las minas a rajo abierto continuarán aportando la mayor parte de la producción total de cobre. En el gráfico 5 se observa además, que los aportes de producción de cobre fino desde minas subterráneas se mantendrán en torno a un 12%.

Gráfico 5_ Proyección de cobre fino por tipo de minería hacia 2035



Fuente: Cochilco (2018)

Se estima que en el largo plazo (después del 2050), las consideraciones ambientales y el agotamiento de los recursos minerales extraíbles mediante minería de rajo abierto darán prioridad a la extracción de recursos por minería subterránea. En particular en Chile, algunas de las minas de rajo abierto actuales migrarán hacia operaciones subterráneas, tal como lo está haciendo Chuquibambilla.

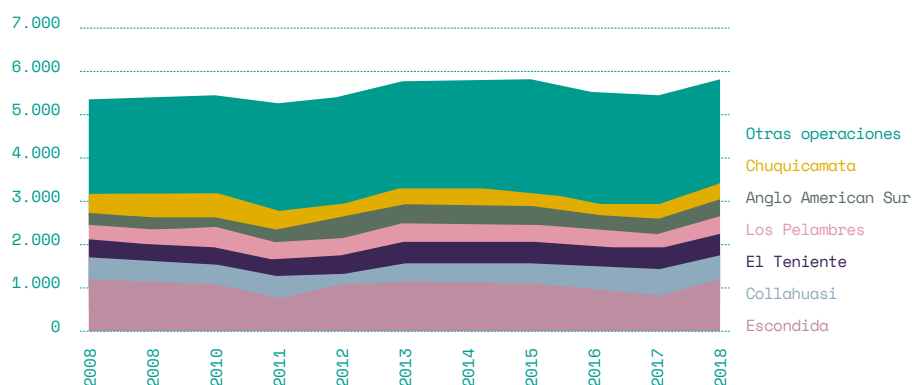
El método de explotación de superficie, denominado rajo o cielo abierto, constituye la primera opción a evaluar para el desarrollo de un proyecto minero, ya que habitualmente es el más económico si el cuerpo mineralizado se encuentra cercano a la superficie del terreno, posee una forma regular y no existen restricciones medio ambientales que impidan intervenir la superficie sobre él.

Dependiendo de la concentración de los elementos de interés económico, de los posibles contaminantes y en general de la geometría de los cuerpos mineralizados, las minas a rajo abierto pueden superar largamente los 800 metros de profundidad.

Por otra parte, cuando la mineralización se encuentra emplazada a mayor profundidad, o bien cuando se ha superado el límite económico de la extracción por rajo, la selección corresponderá a un método subterráneo. En este caso el método subterráneo quedará definido por un conjunto de factores relacionados con la forma del cuerpo, otras características tanto del mineral como de la roca que lo rodea, factores medioambientales, factores tecnológicos y consideraciones económicas relacionadas con las reservas minerales disponibles, tasa de producción requerida, vida de la mina, productividad y finalmente el costo por tonelada de mineral de cada método posible.

En Chile, más del 50% de la producción de cobre fino, en cualquiera de sus formas de comercialización, proviene desde las seis operaciones que se indican en el gráfico siguiente.

Gráfico 6_ Mayores operaciones en Chile (principalmente rajo) y su aporte de cobre fino



Fuente: Cochilco (2019)

La mayoría de las operaciones en Chile corresponden a minas de rajo abierto.

Las principales operaciones subterráneas en Chile son El Teniente y Andina, pertenecientes a Codelco, aunque ambas cuentan también con minas a cielo abierto. Cabe destacar el inicio de las operaciones de la mina subterránea en Chuquicamata el 2019, cuya producción en régimen permanente tardará un par de años. En el largo plazo, Escondida, Los Bronces y otras operaciones también podrían experimentar la transición de mina rajo a subterránea.

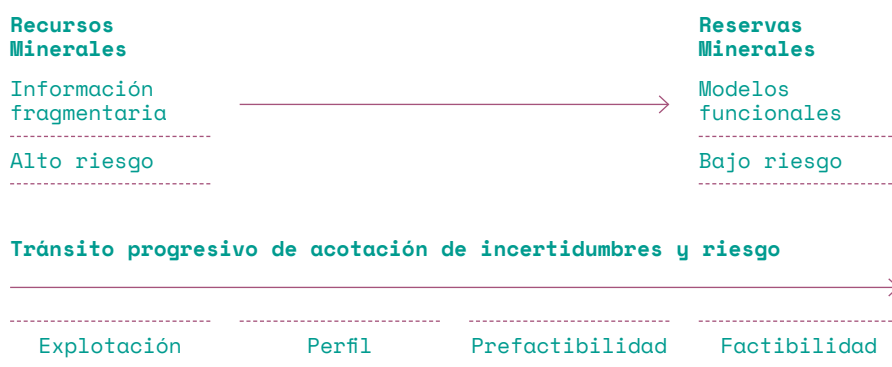
El negocio minero está condicionado por un entorno dinámico, en que es fundamental cuantificar y caracterizar los recursos geológicos y desarrollar una adecuada conversión de estos recursos geológicos a reservas mineras, incorporando, a partir de esta conversión, todos los aspectos geo-minero-metalúrgicos, económicos, financieros, comerciales, legales, medioambientales, sociales, gubernamentales y de infraestructura, los cuales deben actualizarse según la dinámica de lo mencionado precedentemente.

Debe tenerse presente que las bases de todo proyecto minero son: establecer una estrategia clara de consumo de las reservas, traducidos en un plan minero, y gestionar los riesgos de ese plan para maximizar los excedentes del negocio, procurando dar sustentabilidad a la compañía minera y a su entorno.

En el esquema siguiente, publicado por la Comisión Minera¹, la conversión de Recursos a Reservas incluye las siguientes fases: Prospecto de exploración que da origen a la idea; Análisis técnico-económico de orden de magnitud que da origen a un estudio de perfil; estudio de prefactibilidad y estudio de factibilidad, que proporciona una base de información que será utilizada por un proponente o entidad financiera para decidir sobre el desarrollo de un proyecto.

En las primeras fases la información es fragmentaria o insuficiente e implica un alto nivel de riesgo, lo que obliga a avanzar en las siguientes etapas de cada proyecto incorporando acciones que perfeccionen y robustezcan la información para crear niveles de riesgo cada vez menores, que permitan pasar a la etapa siguiente del proyecto.

Figura 2_ Las fases de conversión y niveles de estudios



Fuente: Tulcanaza (2014)

Los sucesivos estudios mineros deben reflejar el creciente nivel de certidumbre de los parámetros relevantes de la explotación y, en caso de contar con resultados económicos favorables, conducir a su construcción, puesta en marcha y operación.

La operación de una mina comprende un trabajo multidisciplinario el cual debe ser coordinado y realizarse de manera segura y eficaz. Dentro de los equipos de trabajo que intervienen podemos mencionar: geología, geotecnia, planificación, topografía, operaciones mina, mantención, administración, servicios y apoyo en materias de seguridad, medio ambiente y calidad, además de asesores en distintas materias.

¹ Comisión calificadora de competencias en recursos y reservas mineras, creada por Ley 20.235.

El equipo de geología tiene dentro de su misión proporcionar información sobre las características físicas, químicas y mineralógicas del material a extraer, constituyendo el punto de partida del proceso extractivo. Esta información es tomada por el grupo de ingeniería o planificación, que la integra con otras variables relacionadas con la operación, la geotecnia, la metalurgia, la mantención, la productividad y los costos para generar un plan de producción o “plan minero”. Dicho plan describe los movimientos de materiales que se llevarán a cabo en la operación y los recursos requeridos para ello.

El movimiento de materiales en la operación incluye la extracción y traslado de materiales de diferentes calidades o contenido del elemento de interés. Esto es, material sin ningún contenido valioso (estéril), material cuyo contenido valioso no justifica su procesamiento, y materiales con diferentes proporciones (leyes) de elementos de interés. Este material, denominado genéricamente mineral, tiene como destino alguna de las líneas de proceso o los respectivos acopios.

La planificación minera se desarrolla permanentemente durante la operación de la mina, de manera similar a como se realiza en las etapas previas del proyecto minero o ingeniería, pero con bases de información diferentes.

Un equipo calificado de personas denominado “Operaciones Mina” es el encargado de coordinar la extracción de los materiales desde la mina, siguiendo las directrices del diseño minero y la planificación. En la minería metálica esto se realiza siguiendo secuencialmente las siguientes operaciones unitarias: perforación, tronadura, carguío y transporte.

El conjunto de las operaciones unitarias, los equipos y tecnologías utilizadas para el desarrollo de cada una de ellas, constituyen un sistema minero, el cual está estrechamente ligado al método de explotación. Por ejemplo, en la actualidad la mayoría de las grandes minas en explotación mediante el método de rajo abierto utilizan un sistema donde el arranque o extracción del material se realiza mediante perforación (principalmente rotativa) y tronadura con explosivos, y el carguío y transporte con un sistema pala-camión.

Como se ha mencionado, la minería chilena se ha visto afectada por la disminución paulatina de la calidad de las reservas geológicas. Las leyes de cobre son cada vez más bajas y, debido a la mayor profundidad de las minas, las rocas son de mayor dureza. Además, en el caso de las minas a cielo abierto, la expansión de las explotaciones habitualmente implica que se requiera remover una mayor proporción de material estéril o lastre por cada tonelada de mineral a recuperar, con una mayor distancia de acarreo debido a la mayor profundidad de los recursos a explotar.

Este escenario incide directamente en un mayor consumo de energía por libra de cobre fino producida, y afecta de manera negativa la productividad del negocio minero. Más aún, a la necesidad de mover una mayor cantidad de lastre desde gran profundidad y de moler una mayor cantidad de mineral, se debe agregar la tendencia a encontrar mineral de mayor dureza, lo que impacta considerablemente el consumo energético.

Otra razón detrás del creciente requerimiento de energía en la minería está relacionada con la baja disponibilidad de agua continental para suplir los consumos de nuevas operaciones y futuros proyectos mineros, teniendo que recurrir al transporte de agua desde el nivel del mar, con el consiguiente gasto energético asociado.

Ciclos de precios altos propician la explotación de yacimientos de menor ley que resultan ser económicamente convenientes, no obstante, la disminución de las leyes del mineral, la mayor dureza e impurezas y el aumento de las distancias de transporte sitúan a la productividad y los costos como un foco prioritario y un gran desafío para la minería de cobre en Chile. Hay que tener presente que la minería es un negocio de largo plazo con precios volátiles. Por lo tanto, la productividad y el costo son claves para sostener el negocio en el largo plazo.

visión del núcleo

Ser el referente mundial en Planificación y Operación de minas a gran escala con altos estándares de eficiencia operacional, seguridad y sustentabilidad social y medioambiental



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En esta fase de actualización de la Hoja de Ruta, el grupo de expertos del núcleo consideró la base del trabajo realizado en la versión anterior y desarrolló un trabajo de redefinición para soluciones y nuevas líneas I+D+i, ratificando los desafíos de la Hoja de Ruta anterior, es decir:

- / Aumento de la productividad y reducción de costos
- / Incremento de las reservas minerales
- / Cuidado del medioambiente y responsabilidad social
- / Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo

La planificación y operación minera fue dividida en tres fases. Éstas son:

- / Proyecto minero, ingeniería y control y planificación minera (C&PM)
- / Extracción rajo abierto
- / Extracción subterránea

Desafío 01

Aumento de la productividad y reducción de costos

La productividad y el costo son un tema central que la industria minera debe abordar en el corto y largo plazo. Este desafío es transversal a todas las fases definidas en el marco de este núcleo. No obstante, debido a los antecedentes expuestos, la productividad adquiere particular importancia en el proceso de planificación minera y operaciones, ya sea mediante la extracción por rajo abierto o mediante minería subterránea.

En la fase de Proyecto minero, Ingeniería, y control y planificación minera (C&PM), se destacan líneas de investigación asociadas a métodos de optimización estocástica para el secuenciamiento de la producción minera que incorporen las distintas fuentes de incertidumbre en su evaluación, y al desarrollo de herramientas de simulación, y diseño integrado y automatizado de procesos mina-planta para planificación, debiendo considerar su operación y control a distancia desde centros integrados de operación.

En la extracción a rajo abierto, se consideraron relevantes las soluciones asociadas al mejoramiento del manejo de grandes volúmenes de material a largas distancias y al desarrollo de metodologías de diseño de taludes de mayor pendiente.

Las soluciones asociadas al aumento de productividad en la extracción subterránea se relacionan con el desarrollo de minería profunda a gran escala, lo cual implica, entre otros aspectos, desarrollar tecnología para equipos autónomos o teleoperados en las distintas operaciones unitarias en etapa de preparación, desarrollo y construcción.

A continuación se presentan los principales temas que fueron abordados por el grupo de expertos del núcleo y fueron considerados para la extracción a cielo abierto y subterráneo. Los principales elementos desarrollados corresponden a la integración y caracterización de operaciones mina – planta y el desarrollo de nuevas metodologías para gestión de activos, mantenimiento y sintomatización de equipos principales.

Aumento de la productividad

Solución

01 Estrategia óptima de consumo de reservas

Líneas I+D+i

Métodos de optimización estocástica/robusta para secuenciamiento de la producción minera.

Herramientas de simulación y diseño integrado y automatizado de procesos mina-planta para planificación.

Diseño integrado de perforación y tronadura en tiempo real / Combinación de tecnologías de perforación (caracterización macizo rocoso) y tronadura (diseño y predicción de resultados).

Operaciones

Ra Sub

Ra Sub

Ra Sub

02 Incrementar la eficiencia en perforación y tronadura

Monitoreo y seguimiento del mineral desde la tronadura para optimizar su procesamiento, en particular optimizar el uso de energía en explosivo y en molienda SAG.

Automatización/teleoperación de manejo de explosivos en el proceso de tronadura.

Desarrollo de la tecnología para equipos autónomos/teleoperados en las distintas operaciones unitarias en las etapas de preparación/desarrollo y construcción.

Ra

Ra Sub

Sub

Ra Mina Rajo abierto

Sub Mina Subterránea

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
03 Desarrollo de una minería profunda a gran escala: preparación, desarrollo y preacondicionamiento	Automatización integrada de flota de equipos de transporte y carguío sin dependencia de GPS.	Ra Sub
04 Mejoramiento del manejo de grandes volúmenes de material a través de largas distancias: carguío y transporte	Desarrollo de sistemas híbridos de manejo de grandes volúmenes de materiales en rajo y subterráneo.	Ra Sub
	Desarrollo visión sintética/3D e interfaces hápticas que faciliten la operación remota de los procesos y la teleoperación inmersiva de equipos.	Sub
	Desarrollo sistemas de coordinación para la interacción sinérgica entre equipos autónomos, teleoperados y operados manualmente, permitiendo la interacción a través de interfaces estándares entre ellos y con otros sistemas (interoperabilidad).	Ra Sub
	Desarrollo de la tecnología para la automatización/teleoperación de equipos para las distintas operaciones unitarias de apoyo como reducción secundaria, limpieza, descuelgue de puntos, manejo de materiales contaminados con alta humedad (agua, barro), etc.	Sub

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
05 Aumentar / Mejorar el control de estabilidad de taludes	Metodologías de diseño de taludes de mayor pendiente.	Ra
	Desarrollar tecnologías de tronadura que permitan un mejor ángulo de banco.	Ra
06 Integración y caracterización de operaciones mina-planta	Desarrollo de aplicaciones con información en línea para la toma de decisiones integrada del proceso mina-planta, con inferencia de resultados y modelamiento de escenarios posibles.	Ra Sub
	Sistema de monitoreo y caracterización en tiempo real.	Ra Sub
	Diseño e instalación de centros integrados de operación para control y operación a distancia.	Ra Sub
07 Desarrollo de nuevas metodologías para gestión de activos, mantenimiento y sintomatización de equipos principales	Mantenimiento predictivo totalmente automatizado.	Ra Sub
	Automatización/remotización de ciertos procesos de mantenibilidad permitiendo disminuir el tiempo de mantenimiento de equipos críticos.	Ra Sub
	Mantenimiento inmersivo online.	Ra Sub
	Desarrollo de sistemas utilizando big data/IoT para manejo de grandes volúmenes de datos, que permitan inferir comportamientos de la flota, equipos, sistemas o procesos.	Ra Sub

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
08 Detección de anomalías	Detección robusta de inchancables. Sistemas de control para predicción en línea de estallidos de roca, inundaciones y otros fenómenos relevantes, usando sensores fijos y en equipos.	Ra Sub Sub
09 Nuevos métodos de extracción	Minería in situ.	Ra Sub
10 Capacitación y entrenamiento	Desarrollo de nuevas tecnologías para capacitación de operadores y mantenedores.	Ra Sub
11 Gestión del cambio	Desarrollo de herramientas que aseguren las transformaciones definidas (Transformación digital).	Ra Sub

Fuente: Elaboración propia

Desafío 02

Incremento de las reservas minerales

El segundo desafío identificado en este núcleo da origen a los temas que se muestran en tabla siguiente. Estos temas tienen relación con la fase de desarrollo del Proyecto minero, ingeniería y control, y planificación minera. Por su parte, el incremento de las reservas de minerales en la fase de ingeniería y planificación implica perfeccionar herramientas que permitan, entre otros aspectos, desarrollar una estrategia óptima de consumo de reservas, nuevos métodos de extracción minera y el desarrollo de tecnología para el modelamiento del macizo rocoso, incluyendo mediciones de leyes, esfuerzos y humedad.

Se debe considerar además, nuevos métodos de explotación y procesamiento de minerales que hagan rentables recursos que con los métodos y tecnologías actuales no lo son.

Incremento de las reservas minerales

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
01 Estrategia óptima de consumo de reservas	Métodos de optimización estocástica/robusta para secuenciamiento de la producción minera.	Ra Sub
02 Incrementar la eficiencia en perforación y tronadura	Validación de curvas de fragmentación determinadas con información en línea y tecnologías (hardware/software) 2D y 3D.	Ra Sub
03 Aumentar/mejorar el control de estabilidad de taludes	Metodologías de diseño de taludes de mayor pendiente.	Ra
04 Nuevos métodos de extracción	Minería in situ. Biolixiviación mineral <i>run of mine</i> a tamaño controlado por tronadura optimizando la recuperación.	Ra Sub Ra

Fuente: Elaboración propia

Desafío 03

Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

Los aspectos socioambientales han adquirido una particular relevancia en el desarrollo y sustentabilidad futura de la industria minera. Entre ellos, el más relevante para los proyectos en desarrollo es la licencia para operar. En este contexto, la siguiente tabla muestra las líneas de I+D para cada solución identificada en el marco del desafío. Estas líneas I+D se encuentran orientadas a incrementar la eficiencia en perforación y tronadura, mejorar el control en la emisión de contaminantes, la reducción de su impacto ambiental y el desarrollo de proyectos de minería *in situ*. Cabe destacar que el comportamiento de las operaciones actuales es un referente para los *stakeholders* de los proyectos mineros, siendo muy relevante la consecuencia entre lo que se declara y lo que se materializa, lo que influye en la imagen que la compañía proyecta.

Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
01 Incrementar la eficiencia en perforación y tronadura	Diseño integrado de perforación y tronadura en tiempo real/ combinación de tecnologías de perforación (caracterización macizo rocoso) y tronadura (diseño y predicción de resultados) controlando los efectos en el medio ambiente: vibraciones y polvo, entre otros.	Ra
02 Mejor control en la emisión de contaminantes y reducción de su impacto ambiental	Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en rajo Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en puntos de carguío/vaciado/chancado. Sistemas tecnológicos para el tratamiento/utilización de aguas de contacto mina en forma ecológica. Desarrollo y validación de vehículos/equipos de producción eléctricos, para eliminación de gases.	Ra Sub Ra Sub Sub Sub

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
03 Nuevos métodos de extracción	Minería in situ.	Ra Sub
04 Modelo para viabilidad de proyecto y prevención de conflictos socioambientales	Nuevas metodologías.	Ra Sub

Fuente: Elaboración propia

Desafío 04

Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo

Las operaciones mineras son intrínsecamente riesgosas: el desafío ha sido trabajar bajo un riesgo controlado, siendo una opción alejar a los trabajadores de las zonas de riesgos mediante la incorporación de nuevas tecnologías.

La seguridad laboral es un foco de atención prioritario en la industria minera, lo que se puede observar en la mayoría de las compañías mineras que declaran en la carta de valores la seguridad como valor más importante. La tasa de accidentabilidad de la minería es menor en comparación con el resto de las actividades económicas que se desarrollan en el país. Lamentablemente, no ha sido posible erradicar la fatalidad, aunque la tasa de mortalidad ha ido disminuyendo paulatinamente. Cabe señalar que una menor accidentabilidad tiene una relación con el aumento de la productividad y la reducción de costos de las operaciones mineras, ya que incide en la continuidad de marcha de ellas.

En el marco de la hoja de ruta se identifica que este aspecto representa un importante desafío, dada su implicancia para el desarrollo de líneas de I+D asociadas a:

- / Monitoreo de signos vitales de operadores.
- / Desarrollo de aplicaciones con drones para detección de anomalías en la gestión territorial de reservas / botaderos / escurrimientos para alertas tempranas.
- / Sistemas para detección en línea de eventos sísmicos que pueden provocar estallidos de roca, inundaciones y otros fenómenos relevantes, usando sensores fijos y en equipos.
- / Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en minas a rajo abierto y subterráneas.
- / Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en puntos de carguío / vaciado / chancado, tanto en rajo abierto como en subterráneo.
- / Desarrollo y validación de vehículos y equipos de producción eléctricos para la eliminación de gases.
- / Desarrollo de tecnologías robustas y de menor costo para el monitoreo y control de estabilidad de taludes.
- / Desarrollo de sistemas para captura y utilización de la información en la etapa de desarrollo minero que permitan una mejora en la caracterización geotécnica / Preacondicionamiento del macizo rocoso / Soporte y fortificación dinámica.
- / Desarrollo de nuevas tecnologías para capacitación de operadores y mantenedores.
- / Automatización integrada de flota de equipos de transporte y carguío sin dependencia de GPS.
- / Desarrollo de sistemas de posicionamiento masivos con interacción con otros sistemas de seguridad y sistemas de ventilación para casos de emergencia por incendios.

- / Sistemas de coordinación para la interacción sinérgica entre equipos autónomos, teleoperados y operados manualmente, considerando distintos fabricantes que permitan la interoperabilidad.
- / Desarrollo Visión sintética / 3D e interfaces hápticas que faciliten la remotización de los procesos y la teleoperación inmersiva de equipos.
- / Automatización / remotización de ciertos procesos de mantenibilidad permitiendo disminuir el tiempo de mantenimiento de equipos críticos.
- / Centros integrados de operación que gestionen las operaciones mina-planta y operen a distancia los equipos tele-operados y controlen los equipos autónomos.
- / Desarrollo de sistemas para la gestión del cambio y asegurar la implementación.
- / Minería in situ.

Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
01 Incrementar la eficiencia en perforación y tronadura que permita un mayor control de los riesgos asociados	Diseño integrado de perforación y tronadura en tiempo real/ combinación de tecnologías de perforación (caracterización macizo rocoso) y tronadura (diseño y predicción de resultados).	Ra Sub
	Automatización/teleoperación de manejo de explosivos en el proceso de tronadura.	Ra Sub
02 Desarrollo de una minería profunda a gran escala: preparación y desarrollo.	Desarrollo de la tecnología para equipos autónomos/teleoperados en las distintas operaciones unitarias en etapa de preparación/ desarrollo y construcción.	Sub
	Desarrollo de sistemas para captura y utilización de la información en la etapa de desarrollo minero que permitan una mejora en la caracterización geotécnica/preacondicionamiento del macizo rocoso/soporte y fortificación dinámica.	Sub

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
03 Mejoramiento del manejo de grandes volúmenes de material a través de largas distancias: carguío y transporte	Automatización integrada de flota de equipos de transporte y carguío sin dependencia de GPS.	Ra
	Sistemas de coordinación para la interacción sinérgica entre equipos autónomos, teleoperados y operados manualmente.	Ra Sub
	Desarrollo de sistemas híbridos de manejo de grandes volúmenes de materiales en rajo.	Ra
	Desarrollo de visión sintética/3D e interfaces hápticas que faciliten la remotización de los procesos y la teleoperación inmersiva de equipos.	Sub
	Desarrollo de sistemas de posicionamiento masivos con interacción con otros sistemas de seguridad.	Sub
	Desarrollo de la tecnología para la automatización/teleoperación de equipos para las distintas operaciones unitarias de apoyo como reducción secundaria, limpieza, descuelgue de puntos, manejo de materiales contaminados con alta humedad (agua, barro), etc.	Sub
04 Aumentar/mejorar el control de estabilidad de taludes	Desarrollo de tecnologías robustas y de menor costo para el monitoreo y control de estabilidad de taludes.	Ra
	Metodologías de diseño de taludes de mayor pendiente.	Ra
	Diseñar tronaduras y uso de explosivos para el control de daño de las paredes de los bancos.	Ra

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
05 Integración y caracterización de operaciones mina-planta	Sistema de monitoreo y caracterización en tiempo real.	Ra Sub
06 Desarrollo de nuevas metodologías para gestión de activos, mantenimiento y sintomatización de equipos principales	Mantenimiento predictivo totalmente automatizado.	Ra Sub
	Automatización/remotización de ciertos procesos de mantenibilidad permitiendo disminuir el tiempo de mantenimiento de equipos críticos.	Ra Sub
	Monitoreo de signos vitales de los componentes principales de los equipos mayores que optimicen un mantenimiento predictivo.	Ra Sub
	Mantenimiento inmersivo online.	Ra Sub
07 Detección de anomalías	Monitoreo de signos vitales de operadores.	Ra Sub
	Desarrollo de aplicaciones con drones para detección de anomalías en la gestión territorial de reservas/botaderos/escurremientos para alertas temprana.	Ra
	Sistemas predictivos para detección en línea de eventos sísmicos que puedan redundar en estallidos de roca, inundaciones y otros fenómenos relevantes, usando sensores fijos y en equipos.	Sub

Solución	Líneas I+D+i	Operaciones
08 Mejor control en la emisión de contaminantes y reducción de su impacto ambiental	Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en rajo.	Ra
	Tecnología de mitigación de emisiones de polvo en puntos de carguío/vaciado/chancado.	Sub
	Desarrollo y validación de vehículos/equipos de producción eléctricos, para eliminación de gases.	Sub
09 Nuevos métodos de extracción	Minería in situ.	Ra Sub
10 Capacitación y entrenamiento	Desarrollo de nuevas tecnologías para capacitación de operadores y mantenedores.	Ra Sub
11 Mejorar medidas de control para mitigar riesgos operacionales basado en la experiencia de cada operación	Desarrollar sistemas de predicción que considere los registros de los eventos informados permitiendo mejorar las acciones preventivas.	Ra Sub

Fuente: Elaboración propia

03 núcleo concentración

El capítulo **núcleo concentración**
fue desarrollado en base al trabajo
realizado por Manuel Duarte,
Francisco Gutiérrez, Willy Kracht,
Cleve Lighfood, Diego Lizana y
Miguel Meza.



Antecedentes

La productividad de la minería ha disminuido a nivel nacional principalmente por la calidad del recurso geológico medido a través de la razón estéril y la ley del mineral, además del incremento de energía por el mayor procesamiento en la concentración de minerales.

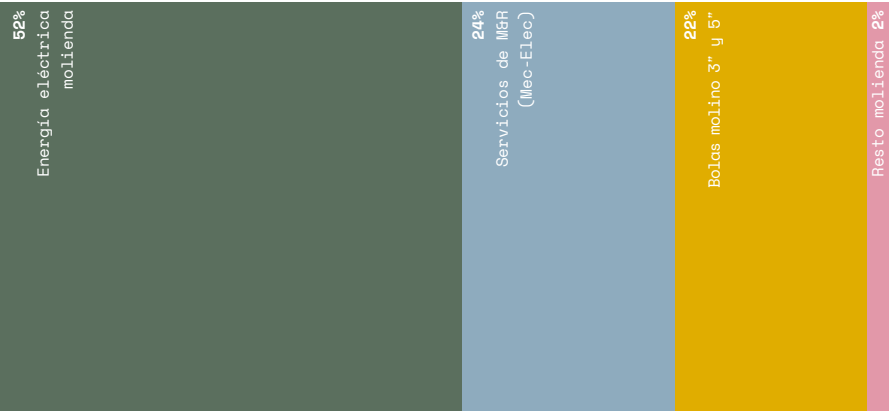
La concentración de minerales se realiza en una etapa posterior a la extracción del mineral sulfurado y constituye un proceso muy relevante en los desafíos de productividad que enfrenta la industria. El proceso de concentración consiste en varias etapas secuenciales: chancado, molienda, flotación, espesamiento y depositación de relaves.

La concentración se inicia con la reducción de tamaño o conminución, la cual está compuesta por las etapas de chancado y molienda húmeda. Éstas últimas constituyen una parte importante del costo asociado al proceso de concentración, debido al alto consumo energético que implica la molienda, la energía eléctrica, los aceros y el agua, insumos importantes que aumentan los costos.

Después de la molienda, los minerales sulfurados de cobre se concentran a través del proceso de flotación, siendo separados de otros minerales de menor o nulo beneficio económico. De esta forma, se obtiene un concentrado formado principalmente por sulfuros de cobre. La etapa siguiente, de espesamiento, busca recuperar el agua y luego los residuos del proceso de flotación son depositados como relaves.

El proceso de molienda dentro de la concentración de minerales genera la mayor parte del costo asociado al proceso de concentración debido al alto consumo energético. De hecho, más de un tercio del consumo de energía eléctrica en la minería metálica corresponde a aquella utilizada en molienda. La siguiente figura muestra la distribución del costo del proceso de concentración en las etapas más relevantes. En relación a los costos de la etapa de molienda, que corresponde en promedio en la industria nacional al 49% de los costos del proceso de concentración, el 52% de éstos son en energía eléctrica, el 24% costos de mantenimiento y reparación y el 22 % a los aceros de las bolas de molienda. Se estima que el consumo en aceros en el año 2025 alcanzará sobre el millón de toneladas, lo que equivale a un incremento de 127%, respecto al año 2014 (Cochilco, 2014).

Figura 1_ Costo operacional de la etapa de molienda



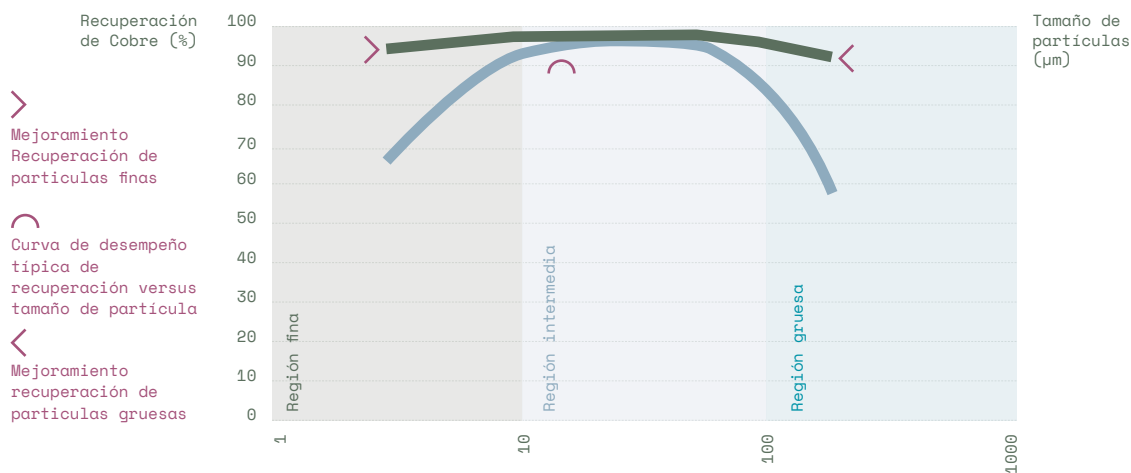
Fuente: Cochilco (2014e)

El agua es un insumo relevante en el proceso de concentración, desde la molienda hasta la flotación y para facilitar el transporte de las colas del proceso o relaves. Tradicionalmente, se ha utilizado agua continental, pero desde hace años se ha incorporado crecientemente el agua de mar, lo que ha tenido un impacto en el consumo de energía.

Algunos desafíos se presentan en molienda y flotación debido a la presencia de partículas finas y gruesas que llegan a las celdas de flotación primarias (*rougher*) y que afectan el patrón de flujo de la pulpa debido a cambios reológicos (partículas finas) y acumulación de material (partículas gruesas), afectando el desempeño del proceso de flotación. Esto aumenta tanto los costos de mantenimiento como la productividad. Por lo tanto, el proceso de flotación enfrenta la necesidad de identificar estrategias para recuperar eficientemente las partículas finas y gruesas que contienen valor.

La figura 2 muestra la curva de desempeño típica de recuperación metalúrgica de cobre en función del tamaño de partículas. Se observa que las regiones de material fino y grueso de este diagrama pueden ser mejoradas para así optimizar el desempeño de éstas.

Figura 2_ Recuperación metalúrgica en función del tamaño de partículas



Fuente: Adaptado de Trahar (1981)

Es importante destacar que la inversión requerida para la concentración de minerales es alto, por lo que la gestión de activos se vuelve particularmente relevante en las plantas de concentración.

Las tecnologías de control aparecen como un medio para optimizar el uso de activos y mejorar la eficiencia de los procesos. Junto con proporcionar seguridad a las personas, estas tecnologías permiten estabilizar los procesos (menor variabilidad), reducir los costos, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos intermedios y finales.

Por otra parte la oferta de servicios de mantenimiento ha ido incorporado las tendencias de la industria en términos de incluir metodologías y tecnologías que permitan la realización de mantención predictiva en los equipos e instalaciones productivas.



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes y de la visión establecida para este núcleo, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió los siguientes desafíos, para los cuales se identifican las soluciones y líneas de I+D que se presentan a continuación.

Desafío

01

Aumento de la productividad

Se considera esencial en el contexto presentado avanzar en la gestión de activos, disminuir el consumo de energía y aceros, así como también hacer más eficiente el uso y transporte de agua para aumentar la productividad de la etapa de concentración de minerales.

La tabla siguiente resume las líneas de I+D asociadas a las soluciones propuestas para este desafío.

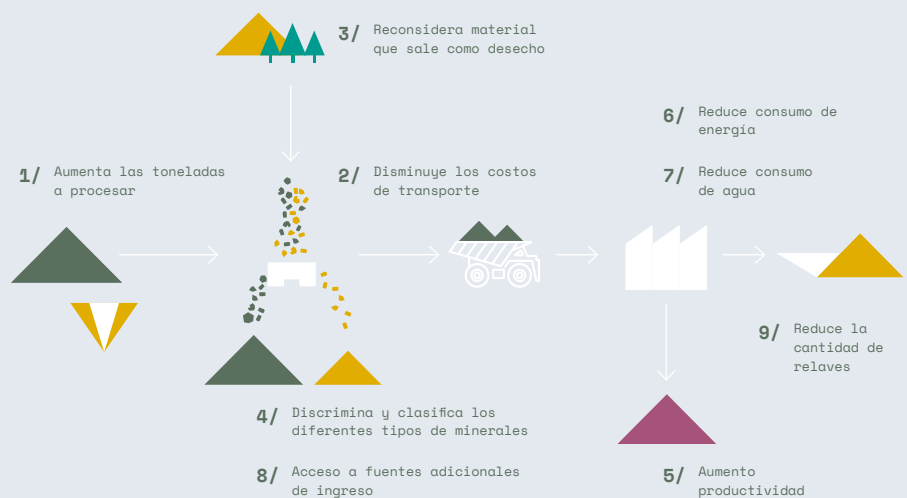
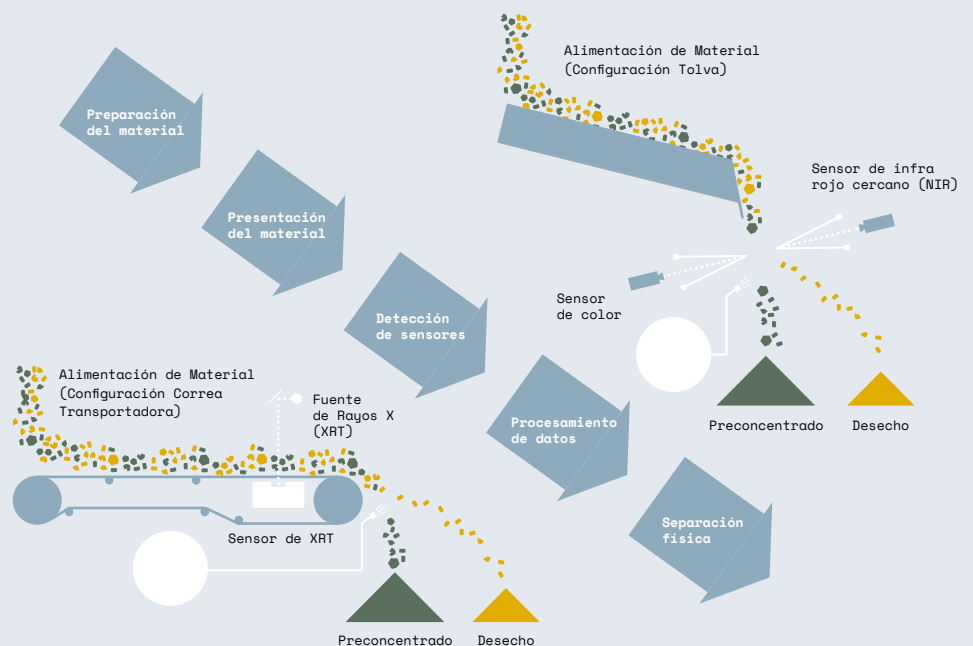
Aumento de la productividad

Solución	Líneas I+D+i / Estudios
01 Gestión de activos	Monitoreo de equipos principales. Manejo de inchancables. Mantenibilidad de instrumentación. Robotización y operación autónoma. Impacto del uso de agua de mar.
02 Disminución del consumo de energía y aceros	Fragmentación. Pre-clasificación. Pre-concentración. Desarrollo de nuevos equipos y adaptación de tecnologías existentes. Eficiencia de clasificación. Desarrollo de sensores y control automáticos/optimización de procesos. Impacto del uso de agua de mar. Medios de molienda y revestimientos. Impacto de la presencia de arcillas en la conducta reológica de pulpas.
03 Eficiencia en el uso y transporte de agua	Uso de agua de mar o desalada. Disminución del <i>make-up</i> de agua. Mayor eficiencia de bombeo.

Fuente: Elaboración propia

La priorización de los desafíos y soluciones de este núcleo reveló que el área de preconcentración y clasificación es prioritaria para optimizar el uso de insumos y acceder a reservas no consideradas en el pasado. La figura 3 señala el proceso de preconcentración (*sorting*), su concepto de utilización, y los beneficios de implementarlo.

Figura 3_ Los principios de preconcentración de partículas de minerales basados en sensores de medición



Fuente: La figura proviene de sitio web: <https://www.outotec.com/company/newsletters/minerva/minerva-issue-2--2017/ore-sorting-the-road-to-optimizing-your-operation/>

Desafío
02

Incremento de los recursos y reservas minerales

Para aumentar la base de recursos y reservas minerales se debe mejorar el desempeño metalúrgico de los procesos, el control de impurezas y el desarrollo de nuevas tecnologías. La tabla siguiente resume las líneas de I+D asociadas a las soluciones propuestas para este desafío.

Incremento de los recursos y reservas minerales

Solución	Líneas I+D+i / Estudios
01 Aumento de la ley de cobre en concentrados y de la recuperación de elementos de interés	Flotación selectiva de subproductos. Desarrollo de sensores y control automático/optimizante de procesos. Depresión de pirita. Flotación de finos, gruesos y arenas. Explorar el uso de nano partículas en flotación. Impacto del uso de agua de mar.
02 Control de impurezas	Desarrollo de tecnologías para asegurar la calidad del concentrado.
03 Desarrollo de nuevas tecnologías	Desarrollo de nuevos métodos de concentración.

Fuente: Elaboración propia

En este núcleo también destaca la importancia de recuperar valor desde las partículas finas y gruesas. La práctica operacional indica que los procesos actualmente en funcionamiento muestran una baja eficiencia de recuperación en las regiones finas y gruesas (ver figura 2).

En este contexto la preclasificación y preconcentración de minerales es una línea de interés en desarrollar en base a los siguientes argumentos:

La ley de alimentación a los procesos va en disminución lo que implica procesar más tonelaje para mantener la producción, por lo tanto, la preclasificación o preselección del material de valor es esencial para enfocar esfuerzos energéticos y de uso de insumos.

Las mineralogías de los yacimientos son más complejas y requerirán de múltiples etapas de reducción de tamaño. Idealmente, se requiere conminuir la fracción que contiene los componentes de valor para no desperdiciar energía.

Los procesos de preconcentración también se pueden extender para situaciones de minería secundaria, por ejemplo el retratamiento de relaves, que serán muy útiles para manejar grandes tonelajes a procesar.

Por otra parte el mejoramiento de la flotación de finos, gruesos y arenas cobra relevancia debido a los siguientes antecedentes:

El procesamiento de minerales con mineralogías cada vez más complejas requiere etapas de molienda fina y super fina. Estos procesos generan desafíos importantes en la separación de partículas finas por flotación, por lo tanto, la innovación y tecnologías que aborden estos aspectos son de suma importancia para la eficiencias de los procesos de separación en la minería chilena.

Para optimizar los procesos de separación (tanto en consumo de energía y agua como en tiempos de residencia), es necesaria la remoción temprana de partículas gruesas que contengan valor y que cumplan con los requerimientos de liberación y características de hidrofobicidad. Por lo tanto, deberán identificarse e implementarse estrategias que aborden la separación de partículas gruesas.

04 núcleo relaves

El capítulo **núcleo relaves** fue desarrollado en base al trabajo realizado por Carla Calderón, Manuel Caraballo, Fernando Concha, Francisco Costabal, Jaime Henríquez, Leandro Herrera, Cristina Ihle, Rodrigo Moya, Ángela Oblasser, Juan Rayo, Brian Townley y Luis Valenzuela.



↑ Codelco
Depósito de
Relaves Pampa
Austral

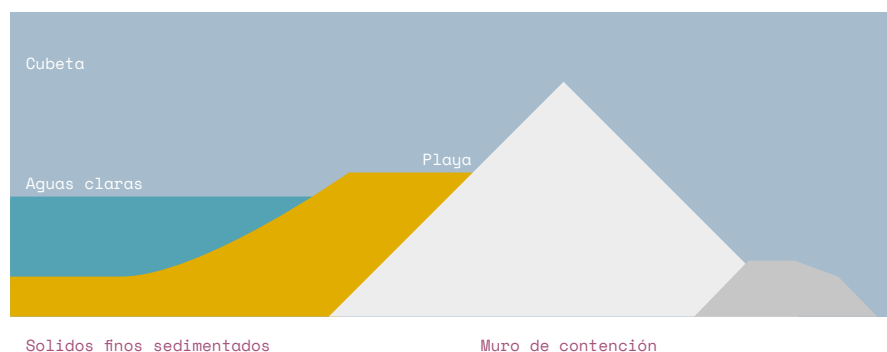
Antecedentes

La minería del cobre extrae grandes cantidades de material, del cual sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico principal que se desea recuperar. Una vez que este material ha sido procesado y se ha extraído el cobre, y eventualmente otros elementos de valor, se generan residuos (compuestos por roca molida y agua con elementos químicos y reactivos remanentes) denominados relaves, que representan entre el 97% y el 99% del mineral procesado.

Los relaves son transportados a través de canaletas, hasta lugares especialmente habilitados para su almacenamiento final, denominados depósitos, embalses o tranques de relaves dependiendo del método utilizado para la construcción del muro de contención.

El muro de contención de un embalse de relaves está construido con material de empréstito (material de cantera o estéril de la mina) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. Por su parte, el muro de contención de un tranque de relaves está construido con la fracción más gruesa del relave y también dispone de muros de partida y pie, impermeabilizados por talud interna y con drenes de fondo. En la cubeta los sólidos finos sedimentan y en la superficie se forma una laguna de aguas claras (Sernageomin, 2013).

Figura 1_ Composición de un tranque de relaves

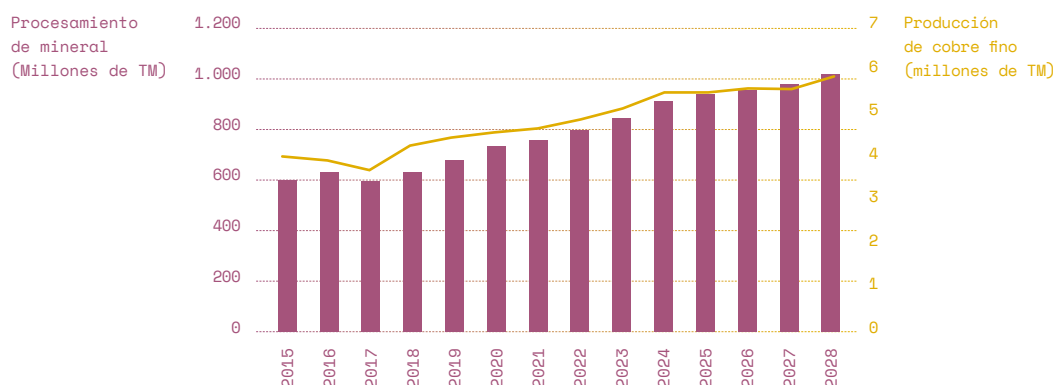


Fuente: Adaptado de Sernageomin (2016)

Debido a la disminución de las leyes de mineral de los yacimientos actualmente en explotación y de los que forman parte de los proyectos de desarrollo de las compañías mineras, éstas deberán aumentar sus esfuerzos para extraer cada vez mayores tonelajes de material para mantener sus niveles de producción o para crecer según la demanda de mercado, lo que significará un aumento proporcional de la cantidad de desechos que deben ser dispuestos, ya sea como material estéril o en forma de relaves. Se estima que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035. El siguiente gráfico representa una proyección al 2028 de la relación entre mineral tratado y cobre fino contenido en el concentrado producido.

Frente a una tasa anual de crecimiento del 3,1% en cobre fino contenido en concentrado, la tasa de crecimiento del tratamiento de mineral sería de 3,6% anual, aumentando desde 631 millones de toneladas de mineral tratado en 2016 a 1000 millones de toneladas en 2028 (Cochilco, 2018).

Gráfico 1_ Procesamiento de mineral y producción de cobre



Fuente: Cochilco (2018)

Por otra parte, los relaves constituyen hoy una importante y creciente fuente de conflicto entre compañías y comunidades. Un 47% de la producción de relaves en el país posee reclamos o algún tipo de conflicto con la población (JRI, 2015), lo que constituye un desafío importante que se debe abordar con la participación de todos los actores (compañías mineras, comunidades y sector público).

En nuestro país no se han reportado en forma reciente mayores incidentes asociados a los depósitos de relaves en operación. El último evento de impacto mundial ocurrió en la década del 60, y fue el colapso del Tranque N°2 de la compañía Minera Disputada. Sin embargo, la experiencia internacional reciente ha demostrado que uno de los principales riesgos asociados a los depósitos de relaves radica en la ruptura de los muros de contención y la consecuente inundación de los terrenos adyacentes. Estos eventos pueden ocurrir como consecuencia de eventos naturales, como sismos o tormentas extremas, en especial asociados al cambio climático mundial, o por decisiones operacionales o de diseño, y representan un riesgo importante para las comunidades aledañas.

En los últimos eventos se han identificado elementos común en los tranques que tuvieron los incidentes, encontrando que características como el sistema construcción (aguas arriba) y el estatus de operación (inactivos), y la carencia de ciertos controles operacionales podrían ser factores en común en estos incidentes.

Desde el año 2015 hasta marzo de 2019 se han registrado rupturas de depósitos de relaves, incluyendo la destrucción de valles completos. El fallo catastrófico en Brumadinho, Brasil, el 25 de enero de 2019 es una tragedia humana y ambiental, el derrumbe del relave produjo una liberación de 11,7 millones de metros cúbicos de desechos mineros hacia una ciudad local y aguas abajo lo que resultó en más de cinco millas de destrucción. A septiembre de 2019, 248 personas están confirmadas muertas y 22 están desaparecidas. Esto es un claro recordatorio de que, si bien la industria de la minería y los metales ha recorrido un largo camino en la mejora de su funcionamiento, todavía hay mucho más que se debe hacer para salvaguardar vidas, mejorar el rendimiento y demostrar transparencia.

En esta línea el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y los Principios para la Inversión Responsable (PRI) comparten el compromiso de adoptar mejores prácticas mundiales sobre las instalaciones de almacenamiento de relaves, conformando el grupo Global Tailing Review dirigido por el Dr. Bruno Oberle.

En la actualidad el Global Tailings Review¹ ha establecido un proceso de consulta de un nuevo proyecto de Norma Global de relaves tiene como objetivo prevenir fallas catastróficas mediante un cambio de estado para la industria en la prevención de riesgos y seguridad de las instalaciones de relaves.

La prevalencia de este tipo de incidentes asociados a depósitos de relaves a nivel mundial se debe tener presente para la gestión, diseño y seguimiento de los depósitos de relaves en Chile.

Por su parte, las infiltraciones de depósitos de relaves, activos e inactivos han adquirido importancia en las evaluaciones de impacto ambiental. Éstas representan un desafío de largo plazo para las operaciones mineras, ya que pueden generar impactos ambientales incluso muchos años después de haber sido depositado el relave. Controles deficientes y falta de mitigación de las infiltraciones pueden ocasionar efectos nocivos sobre la salud y la calidad de vida de la población, contaminar los cuerpos de agua y suelos, y generar impactos negativos en otras actividades económicas como la agricultura y ganadería.

¹ <https://globaltailingsreview.org/>

Tabla 1_ Incidentes recientes asociados a depósitos de relaves a nivel mundial

Fecha	Localidad	Compañía
25/01/2019	Represa Brumadinho Minas Gerais, Brasil	Minera Vale
04/06/2018	Mina Cieneguita Urique Chihuahua, México	Minera Rio Tinto (Cluster Minero de Chihuahua A.C.)
09/03/2018	Cadia New South Wales, Australia	Newcrest Mining Ltd.
03/03/2018	Huancapetí, Provincia de Recuay, Perú	Compañía Minera Lincuna S.A. (Grupo Picasso)
17/02/2018	Barcarena Pará, Brasil	Hydro Alunorte/ Norsk Hydro ASA
17/09/2017	Kokoya Gold Mine Bong County, Liberia	MNG Gold Liberia (Redwood Global Inc.)
30/06/2017	Mishor Rotem Israel	Rotem Amfert Negev Ltd. Israel Chemicals (ICL)
12/03/2017	Tonglvshan Mine Provincia Hubei, China	China Daye Non-Ferrous Metals Mining Limited
27/10/2016	Mina Antamok (inactiva) Itogon, Filipinas	Benguet Corp.
27/08/2016	Planta New Wales Florida, EE.UU.	Mosaic Co

Fecha	Localidad	Compañía
08/08/2016	Villa Dahegou Provincia Henan, China	Luoyang Xiangjiang Wanji Aluminium Co. Ltd.
21/11/2015	Hpakant Kachin State, Myanmar	Hlan Shan Myonwesu
05/11/2015	Mina Germano Minas Gerais, Brasil	Samarco Mineração S.A. (50% BHP Billiton, 50% Vale)
10/09/2014	Mina Herculano Minas Gerais, Brasil	Herculano Mineração Ltda.
07/08/2014	Mina Buenavista del Cobre Sonora, México	Southern Copper Corp. Grupo México
04/08/2014	Mina Mount Polley British Columbia, Canadá	Imperial Metals Corp.
02/02/2014	Dan River Steam Station North Carolina, EE.UU.	Duke Energy
15/11/2013	Zangezur Copper Molybdenum Combine Provincia de Syunik Armenia	Cronimet Mining AG
31/10/2013	Mina de carbón Obed Mountain Alberta, Canadá	Sherritt International
4/11/2012	Sotkamo Provincia Kainuu, Finlandia	Talvivaara Mining Company Plc
01/08/2012	Mina Padcal Provincia de Benguet, Filipinas	Philex Mining Corp.
21/07/2011	Mianyang Provincia de Sichuan, China	Xichuan Minjiang Electrolytic Manganese Plant

Fecha	Localidad	Compañía
04/10/2010	Kolontár Hungria	MAL Magyar Aluminium
25/06/2010	Huancavelica Perú	Unidad Minera Caudalosa Chica
27/02/2010	Las Palmas, VII Región, Chile	Grupo Errázuriz Cominor
29/08/2009	Karamken, Región Magadan, Rusia	Karamken Minerals Processing Plant
27/04/2009	Barcarena Pará, Brasil	Hydro Alunorte / Norsk Hydro ASA
22/12/2008	Planta fósiles Kingston Tennessee, EE.UU.	Tennessee Valley Authority
08/09/2008	Taoshi Provincia Shanxi, China	Tashan Mining Company
10/01/2007	Mirai Minas Gerais, Brasil	Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda.
06/11/2006	Nchanga Chingola, Zambia	Vedanta Resources plc
30/04/2006	Zhen'an County Gold Mining Provincia Shaanxi, China	Zhen'an County Gold Mining Co. Ltd.
14/04/2005	Lago Bangs Mississippi, EE.UU.	Mississippi Phosphates Corp.

Fuente: World Information Service on Energy, (2019)

Por último, resulta necesario considerar la creciente escasez de agua y superficie de terreno disponible para uso agrícola, un aspecto particularmente crítico si tomamos en cuenta el aumento de relaves que se proyecta en este escenario. A futuro se espera que una parte importante de la producción minera se realice en la zona central, definida como las regiones IV a VI, donde existe una mayor densidad poblacional y, por ende, mayor competencia y celo por el uso e impacto en el suelo y en el recurso hídrico.

Figura 2_ Recursos futuros mineros en la zona central

En la zona central de Chile, considerada desde la IV a la VI región, se encuentra actualmente sobre el 50% de los futuros recursos de cobre del país.

Región de Coquimbo

Región de Valparaíso

Región Metropolitana de Santiago

Región del Libertador General
Bernardo O'Higgins

● Operaciones



Fuente: Iniciativa Scenario Planning (2014)

A pesar de que se han realizado avances desde el marco regulatorio para proteger a las personas y al medio ambiente, aún existen temas pendientes que deberán abordarse en conjunto con la autoridad, como es el caso de las infiltraciones y estabilidad química de los relaves inactivos y abandonados.

El incremento esperado de la producción, sumado a la escasez de superficie para los depósitos y el cuestionamiento por parte de la comunidad, sugieren revisar los procedimientos actuales de depositación, evaluar la metodología de diseño de nuevos depósitos y metodologías extractivas que prescindan de depósitos de relaves externos a la mina, y buscar alternativas para mitigar el impacto que pueden generar aquellos depósitos que actualmente se encuentran en operación.

Plan Nacional de Relaves

El Ministerio de Minería dio a conocer en septiembre de 2018 el Plan Nacional de Relaves que busca abordar de manera integral los depósitos de relaves activos, inactivos y abandonados. En específico, la política considera para los 104 relaves activos el monitoreo permanente, con acceso en tiempo real, para las comunidades, y acceso detallado y técnico para el SNGM y su fiscalización remota. A su vez, para los depósitos de relaves inactivos y abandonados, se consideran medidas enfocadas a determinar mejor su situación actual (monitoreo remoto y monitoreo participativo comunitario), legal (estudios de títulos) y de riesgo (actualización de las metodologías para la priorización basado en riesgos), así como medidas que busquen su cierre, reprocesamiento o nuevos usos. Algunos de los resultados a la fecha de esta iniciativa son la Priorización de relaves, el desarrollo de Guía de Compensación de Pasivos Ambientales en el marco del SEA y la preparación de la modificación del DS 248, para que los residuos mineros masivos como los relaves sean considerados yacimientos antropogénicos.

Catastro de los depósitos de relaves en Chile

Sernageomin actualiza periódicamente un catastro de los depósitos de relaves existentes en el país. De acuerdo con dicha información, al año 2019 existen 742 depósitos a lo largo del país, de los cuales 104 están activos, 463 no activos, 173 abandonados y 2 en construcción.

La siguiente tabla muestra el estado de los depósitos catastrados y su distribución en las distintas regiones del país.

Tabla 2_ Estado de los depósitos de relaves en Chile según región

Región	Abandonado	Activo	En construcción	Inactivo	Total general
I	6	1	-	-	7
II	16	13	-	22	51
III	23	30	2	106	161
IV	106	32	-	247	385
RM	6	6	-	14	26
V	11	14	-	53	78
VI	1	3	-	15	19
VII	-	4	-	2	6
XI	4	1	-	4	9
Total general	173	104	2	463	742

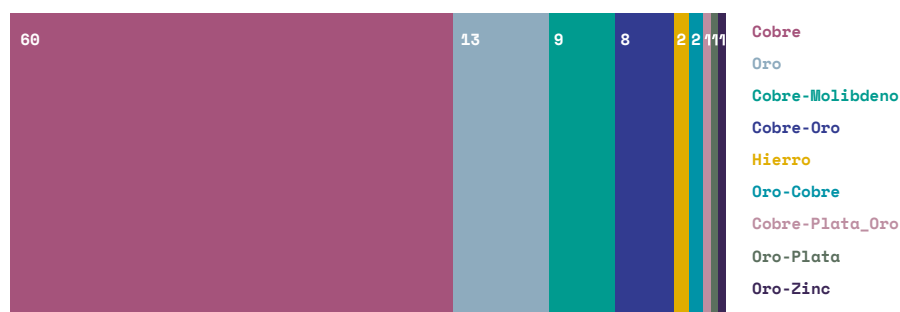
Fuente: Sernageomin (2019)

El catastro establece la existencia de 173 depósitos clasificados como abandonados, condición bajo la cual se clasifican a todos aquellos depósitos que no tienen dueño conocido ni resolución de origen, o bien si se tiene información oficial o fidedigna que indique que no se efectuó ninguna medida de cierre.

Esta situación obliga al Estado a hacerse cargo de evaluar el nivel de riesgo estructural (estabilidad), de modo de mejorarlo, así como definir las infiltraciones de aguas, su medio de captura y tratamiento. Por otro lado, las regiones III y IV son las que concentran un mayor número de depósitos activos, cada una con 30 depósitos.

Del total de depósitos de relaves activos, la mayor parte corresponde a industrias con producción de Cobre, Cobre-Oro y Cobre-Molibdeno, con un total de 78 depósitos autorizados de almacenar 14 mil millones de m³.

Gráfico 2_ Número de depósitos de relaves según metal de beneficio



Fuente: Sernageomin (2018)

Las principales operaciones mineras generadoras de relaves son aquellas que componen el grupo de la gran minería. Codelco es el principal productor con 28% de los relaves producidos en total en el país. Le siguen la empresa Antofagasta Minerals (AMSA) con 16% y BHP Billiton con 13% (JRI, 2015).

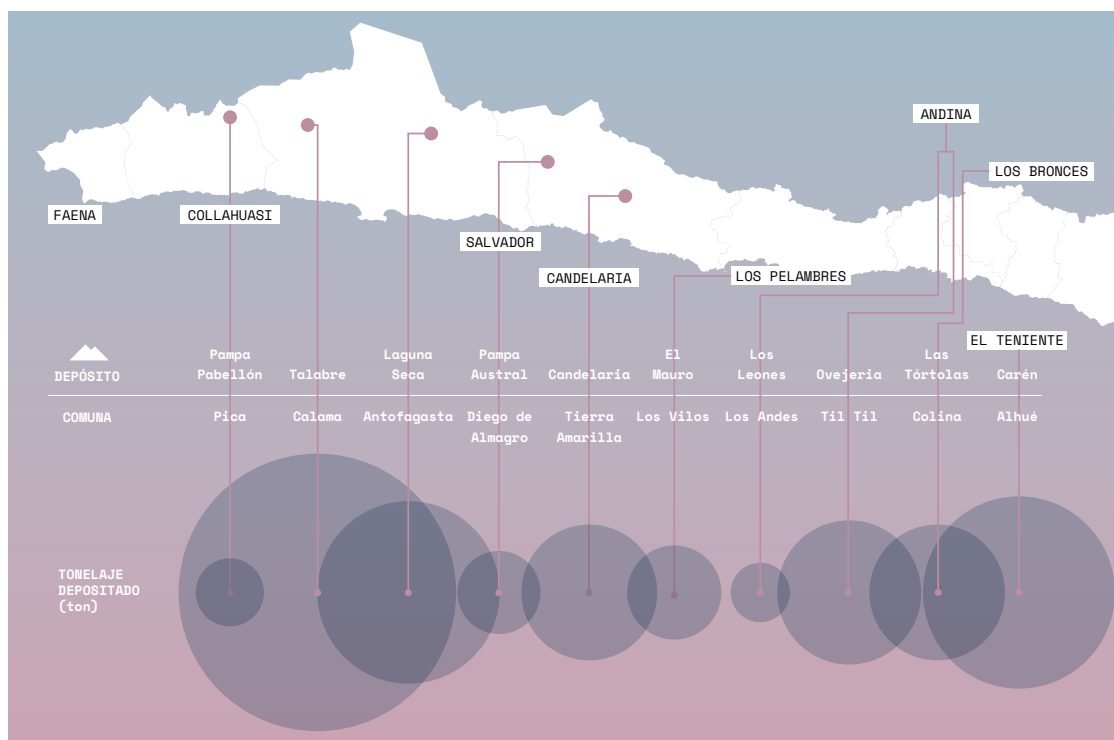
La producción actual de relaves mineros se concentra principalmente en la zona norte con 62% del total. En la zona centro se produce un 37% de los relaves mineros, mientras que en la zona sur la producción de relaves es prácticamente nula (1%).

Las principales operaciones mineras generadoras de relaves del norte de Chile, corresponden a Escondida, Chuquicamata, Collahuasi, Caserones, Centinela, Candelaria, Ministro Hales y Salvador. En cuanto al centro de Chile, las principales faenas productoras de relaves son Los Pelambres, El Teniente, Andina, Los Bronces y El Soldado.

Los depósitos de relaves de mayor tamaño según tonelaje autorizado y operativos de mayor a menor en Chile corresponden a Laguna Seca de Escondida, Carén de El Teniente, Talabre de Chuquicamata, Ovejera de Andina, El Mauro de Minera Los Pelambres, Sierra Gorda de Sierra Gorda, Pampa Pabellón de Collahuasi y Las Tórtolas de Los Bronces.

Todos los depósitos de gran tamaño que están operando tienen diseños adecuados para garantizar la estabilidad en caso de eventos sísmicos y/o hidrológicos, siempre que su operación sea acorde con las buenas prácticas sobre el tema.

Figura 3_ Top 10 de los relaves chilenos en operación en base a toneladas depositadas (2019)



Fuente: Elaboración propia con datos de Sernageomin (2019)

Dentro del mismo contexto del catastro de los depósitos de relaves, Sernageomin mantiene en la actualidad el Programa de Caracterización Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile. La información fuente se obtiene de muestras desde la superficie de las cubetas, muros y sedimentos aguas abajo de los depósitos. A la fecha de la última actualización de enero de 2019, se han analizado 2.132 muestras, que corresponden a 580 depósitos de relaves, de un total de 644 depósitos visitados. Esta información es de gran utilidad tanto para determinar los posibles elementos potencialmente peligrosos para el medio ambiente, como para buscar elementos remanentes de la producción minera y que actualmente tienen valor comercial no explotado.

Efectos del cambio climático en los relaves

El Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM) publicó un informe el 2013 que detalla los efectos para la industria minera del cambio climático. Según ese documento, Chile posee dos áreas donde las operaciones mineras quedarán expuestas a riesgo. Por un lado, Antofagasta y Atacama, que ya sufren un estrés hídrico extremadamente alto, enfrentarán condiciones al menos dos veces más severas en el futuro. Por otro lado, la zona central de Chile será propensa a volverse más húmeda en el futuro y tendrá períodos de mucha

agua, como altos caudales debido a episodios de fuertes lluvias, deshielos estacionales e inundaciones. Esta zona en particular es donde las obras experimentan mayores riesgos asociados a eventos extremos que puedan requerir cambios en la capacidad de almacenamiento de relaves y afectarán la estabilidad de terraplenes y tranques de relaves que dependen de factores como la geometría de la pendiente, fuerzas en la base del muro, propiedades de los materiales y ubicación de la cota freática.

Durante el período de cierre y con posterioridad a él, las empresas tienen la obligación de mantener los relaves y los depósitos de desechos, por lo que estas estructuras deben estar diseñadas para soportar eventos que probablemente ocurran solo una vez cada varios miles de años y pueden ser inadecuados en el escenario futuro del cambio climático.

El informe examina las opciones disponibles de las compañías mineras para adaptarse a los efectos del cambio. Las acciones que menciona para eliminar o evitar riesgos son:

- / Reforzar los activos para resistir las condiciones climáticas futuras (por ejemplo, temperaturas más altas, episodios de fuertes lluvias).
- / Modificar las normas de diseño de ingeniería, los criterios de diseño y las especificaciones del contrato para dar cuenta de un clima cambiante (por ejemplo, una mayor capacidad en el agua y depósitos de almacenamiento de residuos).
- / Reubicar o elevar activos y operaciones fuera de áreas de alto riesgo (por ejemplo, llanuras de inundación).
- / Aumentar la frecuencia de mantenimiento y monitoreo de activos sensibles a los efectos del clima.

Iniciativa del Global Tailing Review²

Esta iniciativa impulsada después del incidente de Brumadinho, busca establecer un estándar internacional para el manejo seguro de las instalaciones de almacenamiento de relaves. el Consejo internacional de Minerales y metales (ICMM), el programa de medio ambiente de las naciones unidas (UNEP) y la institución de los Principios de inversión responsable, se han unido para el desarrollo y adopción de un estándar basado en las mejores prácticas para el manejo de las instalaciones de almacenamiento de relaves, a través de un proceso de consultas internacional y el trabajo de expertos de diferentes áreas. Este estándar debiese estar en operación a principios del 2020. Los detalles de la norma se definirán a través del proceso de revisión, pero como mínimo incluirán:

- / Un sistema de clasificación de instalaciones de relaves global y transparente basado en consecuencias.
- / Requisitos para la planificación y preparación de emergencias.
- / Un sistema de garantía creíble e independiente de las instalaciones de relaves.

² <https://globaltailingsreview.org/>



↑ Codelco
Vista aérea
tranque
Los Leones

Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el Núcleo Relaves, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió cuatro desafíos. Para cada uno de ellos se identifican posibles soluciones y líneas de I+D+i.

Desafío

01

Enfrentar la creciente escasez de agua y superficie

La minería ha disminuido paulatinamente el consumo de agua debido a tecnologías que han permitido la depositación de relaves espesados, en pasta y filtrados. Sin embargo, esto no ha sido aplicado transversalmente en la industria, pues se requieren condiciones adicionales para que este tipo de aplicaciones adquiera mayor escala. En el futuro, la disminución de los recursos oxidados, junto con el aumento de los recursos sulfurados, generarán un aumento del procesamiento por concentración y por ende contribuirán a un aumento significativo del consumo de agua.

Actualmente, el consumo neto actual de agua fresca en la minería del cobre se encuentra en torno a los 0,5 y 0,7 metros cúbicos de agua fresca por tonelada de mineral procesado, siendo la retención de agua en los relaves y su posterior evaporación o infiltración una de las mayores razones de este consumo.

Adicionalmente, dados los conflictos que genera la escasez de superficie, especialmente en la zona central, se requiere del desarrollo de nuevos métodos y tecnologías que, en un futuro, permitan a la industria minera reducir drásticamente la superficie de suelo usado por los depósitos de relaves o idealmente prescindir de los depósitos y la generación de relaves.

Enfrentar la creciente escasez de agua y superficie

Solución

01 Uso eficiente del suelo

Líneas I+D+i

Maximizar el uso de las superficies de cuencas ya inundadas para el depósito de los relaves mediante incrementos de densidad de pulpa a depositar y/o uso de modificadores reológicos.

Perfeccionamiento de métodos de depósito de relaves filtrados o espesados sobre los depósitos convencionales existentes.

Desarrollar el concepto de minería sin depósitos de relaves: desarrollo de nuevos métodos que prescindan de los depósitos de relaves (relaves de retorno a la mina o minería sin relaves).

Generar distintas metodologías de producción, transporte y depósito que privilegien el retorno de los relaves a la mina.

Solución**02** Uso eficiente del recurso hídrico**Líneas I+D+i / Estudios**

Desarrollo y perfeccionamiento de métodos de separación sólido-líquido costo-eficientes y a gran escala para: filtrado y procesos de espesamiento.

Uso del agua de mar o agua de menor calidad en el proceso de flotación y su impacto en el transporte tanto de agua como de relave, y en la operación de los depósitos.

Recuperación de agua de los procesos previo al depósito del relave.

Desarrollo y perfeccionamiento de nuevos métodos o procesos secos para la recuperación de mineral de valor comercial.

Perfeccionamiento y desarrollo de métodos de manejo del recursos hídrico del depósito basado en su disponibilidad y uso a nivel cuenca.

Estudios para evaluar los efectos del uso de agua de mar en la operación (procesos y transporte) del depósito y su estabilidad en el corto, mediano y largo plazo.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 02

Asegurar la estabilidad química y física de los depósitos de relaves

La estabilidad física de los depósitos se convierte en un aspecto central. Una revisión reciente de las fallas catastróficas ocurridas a nivel internacional en los grandes depósitos de relaves indica que los tipos de fallas corresponden a *overtopping* (erosión), inestabilidad de los muros e impacto de un gran sismo. Normalmente estas fallas ocurren por una combinación de causas, entre las que destacan el mal diseño, una construcción deficiente, operaciones con bajo control y bases de cálculo de eventos naturales erróneas.

Por último, la estabilidad geoquímica de los depósitos normalmente está asociada a la posible movilización de contaminantes y la generación de ácido debido a la reacción química del relave con el agua y el oxígeno de la atmósfera. Al respecto, se debe distinguir entre los depósitos abandonados, los que se encuentran en operación y aquellos futuros, para generar estrategias control y neutralización adecuadas a cada una de las situaciones mencionadas.

Las infiltraciones y su impacto en el medioambiente y las personas, representan un desafío permanente para la operación de los depósitos y la sustentabilidad futura del negocio minero. En este sentido, se vuelve imprescindible desarrollar y perfeccionar tecnologías que permitan inertizar los relaves antes de que sean depositados, caracterizar los sitios de depósito y sellarlos para impedir el contacto con aguas subterráneas. Complementariamente, se requiere reforzar la legislación existente para que futuros depósitos sean diseñados y operados bajo el concepto de “cero descarga efectiva”, tanto durante la operación como en el abandono.

Asegurar la estabilidad química y física de los depósitos de relaves

Solución

01 Monitorear y asegurar la estabilidad química en el diseño, operación, cierre y post cierre

Líneas I+D+i

Perfeccionamiento de tecnologías para el control de las infiltraciones desde la base del depósito previo a la disposición de los relaves.

Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de costo-eficientes y escalables para la inertización de los relaves previo a su depositación (pirita, arsénico, otros).

Perfeccionamiento de tecnologías de bajo costo y eficientes para la localización y seguimiento de las infiltraciones.

Líneas I+D+i

Perfeccionamiento de tecnologías costo-eficientes para el control de las infiltraciones y aguas de contacto durante la operación y posterior al cierre (métodos activos, pasivos y combinados).

Perfeccionamiento de tecnologías para evitar la generación de infiltraciones post-cierre, incluyendo el manejo de las aguas superficiales y su interacción con el depósito, e impermeabilización (recubrimiento o sellado) de los depósitos.

Perfeccionamiento de la confianza de los modelos para la predicción de la calidad físico-química de las infiltraciones de los depósitos de relaves.

Desarrollo de tecnologías de verificación del diseño de la estabilidad química con información levantada desde la operación del depósito.

02 Monitorear y asegurar la estabilidad física en el diseño, operación, cierre y post cierre

Desarrollo de nuevas metodologías para incorporar en los criterios de diseño los conceptos de riesgo y vulnerabilidad física (estabilidad) aplicadas para todo tipo de depósitos de relaves.

Evaluar, consensuar y estandarizar métodos que permitan predecir de forma confiable el efecto que tendría el colapso del depósito de relaves.

Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo y de alta confiabilidad para la caracterización del lugar de emplazamiento del depósito de relaves.

Líneas I+D+i

Desarrollo de tecnologías para facilitar el desarrollo seguro de obras al interior de la cubeta.

Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para aumentar la recuperación de agua desde el depósito (así como aumentar la capacidad de almacenaje de relaves del depósito).

Evaluar el impacto del cambio climático sobre la estabilidad física de los depósitos de relaves existentes, incluyendo las obras accesorias.

Perfeccionamiento de tecnologías para evitar problemas de estabilidad física y control de material particulado en el muro por erosión eólica, en especial durante el abandono.

Perfeccionamiento de tecnologías para la detección y control de microorganismos que pudieran reducir la efectividad del sistema de drenaje.

Estudio de modelos físico-químicas que relacionen la estabilidad química y la estabilidad física de los depósitos de relaves.

03 Control de material particulado

Perfeccionamiento de tecnologías existentes y desarrollo de nuevas tecnologías para el control de material particulado buscando cero emisión.

Fuente: Elaboración propia

El Programa Tranque, desarrollado al amparo de la Hoja de Ruta Tecnológica del Programa Alta Ley y que aún se encuentra en ejecución, consiste en un sistema estandarizado de monitoreo y alerta temprana para depósitos de relaves el que, a través de una plataforma de gestión de información, proporcionará a los actores involucrados (autoridades, compañías mineras y comunidades) información de calidad, confiable y oportuna sobre el desempeño de los depósitos en ámbitos de estabilidad física y química. Su propósito final es fortalecer la gestión operacional preventiva, mejorar la comunicación y la respuesta entre las partes ante situaciones de eventuales emergencias.

A través de este programa se busca contribuir a la operación segura de los depósitos de relaves del país, mejorando la coordinación y las relaciones de confianza entre los diferentes actores involucrados, mediante un sistema de monitoreo de avanzada que perdure en el tiempo.

Para el desarrollo de esta iniciativa, liderada por la Fundación Chile, se ha conformado una alianza de colaboración público-privado en la cual participan activamente más de 22 organizaciones y empresas. Entre los participantes del sector público destacan el Ministerio de Minería, el Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), la Superintendencia del Medio Ambiente, la Dirección General de Aguas y la Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública. Desde el sector privado participan Antofagasta Minerals, BHP, Codelco, ENAMI y la Sociedad Nacional de Minería (Sonami), así como Centros Tecnológicos (INRIA Chile, AMTC y Dictuc) y empresas consultoras (Arcadis, BGC Ingenieros, Valor Compartido).

El diseño del sistema, la selección de instrumentación y la configuración para la implementación en terreno, que se realiza en el tranque Mauro de Antofagasta Minerals, ya se encuentra terminada y se está en proceso de recepción de la instrumentación para su implementación.

Desafío 03

Promover la conversión desde un pasivo a un activo

El concepto de Pasivo Ambiental (PAM) puede entenderse como “aquellas faenas mineras, abandonadas o paralizadas, incluyendo sus residuos, que constituyen un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente” (Sernageomin, 2008), una definición que abarca a los depósitos abandonados o paralizados.

La conversión de los depósitos de relaves en activos busca utilizar el relave o parte de éste como una fuente de valor. Aún cuando la recuperación de elementos con valor comercial constituye una contribución al respecto, no soluciona el problema por completo. Se requiere buscar usos alternativos que involucren una proporción importante del relave y no solo aquellos elementos como el cobre, oro, molibdeno, hierro u otros que podrían encontrarse presentes y ser sujetos a un reproceso. Una adecuada gestión de los pasivos ambientales beneficiaría directamente a las comunidades y contribuiría a la sostenibilidad futura de la industria minera.

Por otra parte, se estima que en todos los relaves de Chile existen cerca de 11 mil millones de toneladas (Sernageomin, 2019) de cobre fino equivalente y si una eventual remoción y retratamiento logra rescatar un 80% de dicho monto, aprovecharía el equivalente a más de 2 años de la actual producción total de cobre de nuestro país.

Se hace necesario entonces el análisis de cómo explotar en forma rentable ese enorme potencial geológico-minero, el de los denominados yacimientos artificiales, siempre que dicha operación sea segura y amistosa con el medio ambiente.

Sin embargo, la explotación de un depósito de relaves con valor comercial tiene como principal requerimiento el definir cómo re-depositar el relave retratado en forma segura y de bajo costo.

Promover la conversión desde un pasivo a un activo

Solución

01 Búsqueda de usos industriales del relave

Líneas I+D+i / estudios

Definir los criterios técnicos y regulatorios de cómo y cuándo se pueden reutilizar residuos mineros masivos y específicamente los relaves para fines de construcción u otros.

Desarrollo de usos industriales para el relave.

Impermeabilización y relleno de excavaciones mineras con el fin de extraer reservas remanentes y llevar los relaves a su origen.

Uso de relaves en la generación de geopolímeros.

Solución

02 Recuperación de elementos valiosos

Líneas I+D+i

Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo para la caracterización del relave para la recuperación de elementos valiosos.

Perfeccionamiento y desarrollo de técnicas de muestreo de relaves seguras y costo-eficientes.

Procesamiento analítico de tierras raras y otros elementos de interés.

Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de elementos de interés (reprocesamiento y recuperación de agua y superficie).

03 Utilización de la superficie de depósitos para otros fines

Desarrollar usos alternativos de depósitos como por ejemplo fines industriales, recreativos y energía solar, entre otros.

Fuente: Elaboración propia

Actualmente existen dos iniciativas en curso para la recuperación de elementos de valor desde los relaves mineros, una de ellas está liderada por el consorcio JRI y Ecometales y la otra por CodelcoTech.

El proyecto de JRI y Ecometales tiene como objetivo superar las distintas brechas en la caracterización de los depósitos, identificar y caracterizar representativamente los relaves, realización de pruebas experimentales para la recuperación de elementos de valor y la caracterización de productos y residuos, además de la validación del prototipo para la recuperación de elementos de valor desde relaves.

La primera etapa, correspondiente al desarrollo científico tecnológico para la caracterización representativa de relaves, ya se encuentra concluida y se ha confeccionado un manual de uso público (guía explicativa) respecto de la metodología de caracterización de un relave desarrollada por el consorcio. La metodología fue aplicada en tres tranques, a través de la cual se logró correlacionar de manera eficiente los óxidos mayores presentes en el relave con elementos de valor. La segunda etapa de pruebas experimentales para la recuperación de elementos de valor y caracterización de productos y residuos se encuentra en ejecución.

Respecto al proyecto liderado por CodelcoTech, "Identificación, cuantificación y extracción (bio) tecnológica de minerales/elementos de valor contenidos en depósitos de relaves ahora denominado "RS Relaves Sustentables", contempla la identificación, cuantificación y priorización de elementos de alto valor presentes en depósitos de relaves activos e inactivos de Codelco y otras mineras, de forma de proponer y desarrollar tecnologías que permitan generar un modelo de negocio para la transformación de estos pasivos ambientales mineros en activos, como parte de una estrategia de explotación y disposición final segura y estable física y químicamente.

El desafío principal de este proyecto es poder transformar los pasivos ambientales, como los relaves mineros, en activos, generando valor para el país a través de nuevas tecnologías y productos, obtenidos en forma sustentable y segura, además de sentar las bases para que futuros proyectos y nuevos inversionistas, puedan integrar el concepto de economía circular a la industria minera, transformando a Chile en líder en minería responsable con el ecosistema y respetuoso con la población chilena.

Actualmente se encuentra terminado el estudio del estado del arte de elementos de valor contenidos en relaves de Chile, el estudio de la demanda, producción y mercado mundial de minerales y elementos estratégicos identificados, y el levantamiento de tecnologías y proveedores para procesar y extraer elementos de valor. Por otra parte, se encuentra en ejecución la segunda fase, correspondiente a la comparación de tecnologías para realizar sondajes en depósitos de relaves y la selección de relaves para el muestreo, modelamiento, estudio de tecnologías de extracción de elementos de valor y estudio de estrategias de estabilización.

Desafío 04

Propiciar la inclusión y aceptación comunitaria

Como ya se ha mencionado, una importante proporción de los depósitos de relaves actualmente en funcionamiento, presenta conflictos con las comunidades aledañas, lo que se traducen en reclamos a la autoridad y acciones legales interpuestas por la población.

La resolución de este desafío requiere como condición base que las comunidades puedan contar con información clara y entendible respecto de los depósitos de relaves aledaños, aspecto que puede ser abordado desde el desarrollo de tecnologías especiales para ello.

Complementariamente, se debe propiciar la generación de espacios de participación para involucrar a las comunidades y comunicar de manera efectiva los avances en el manejo y tratamiento de relaves.

Propiciar la inclusión y aceptación comunitaria

Solución

01 Monitoreo y comunicación oportuna del desempeño de los depósitos de relaves a todos los actores

Líneas I+D+i

Definición de estándares seguros para la implementación de redes locales/operacionales.

Desarrollo de interfaz comunicacional operador-comunidad-proceso.

Perfeccionamiento y desarrollo de modelos fenomenológicos

Desarrollo de sensores para medición de variables críticas en línea.

02 Desarrollo de productos de valor compartido

Aprovechamiento de energía y nuevos usos del suelo.

Aguas para diferentes usos en función de su calidad.

Generar capacidades en las comunidades para desarrollar modelos de negocios para la fase post cierre del depósito de relaves.

Solución

03 Educación de todos los actores para nivelar los conocimientos acerca de los depósitos de relaves, la cultura minera y la gestión del riesgo

Líneas I+D+i / Educación y difusión

Educación a nivel nacional acerca de los depósitos de relaves y la cultura minera.

Educación a nivel local acerca de los depósitos de relaves, la cultura minera, aspectos técnicos y de seguridad.

04 Mejorar e involucrar a todos los actores en la gestión de riesgos y emergencias

Involucramiento de las comunidades y actores locales en la elaboración de los planes de emergencias.

Estandarizar los criterios de los planes de emergencia de los depósitos de relaves.

Preparar a los actores locales para la implementación de los planes de emergencia.

Fuente: Elaboración propia

05 fundición y refinería

El capítulo **núcleo fundición y refinería** fue desarrollado en base al trabajo realizado por Juan Carrasco, Pablo Ciesla, Leonel Contreras, Felipe Correa, Luis González, Andro Lindsay, Jorge Martínez, Álex Moyano, Roberto Parada, Roberto Parra, Mario Soto, Leonardo Voisin y Paula Zambrano.



Antecedentes

El núcleo Fundición y Refinería contempla los procesos de tratamiento pirometalúrgico para transformar los concentrados en cobre metálico.

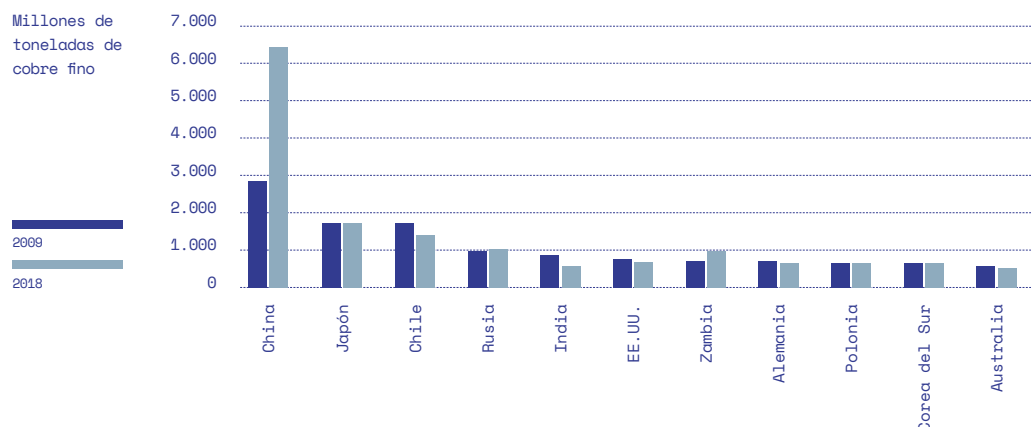
La Fundición comprende el tratamiento del concentrado de cobre mediante los procesos de fusión, conversión y refinó. El propósito es separar el mineral de otras especies presentes, siendo el hierro y el azufre las más abundantes. Esto se logra mediante sucesivas etapas que tienen como productos comerciales el cobre blíster y los ánodos de cobre, los que tienen un mayor contenido de impurezas que el cobre catódico. En el caso del cobre blíster, el mercado es limitado y está focalizado en la producción de cobre secundario, donde se refina en el reciclaje de diferentes productos. Esta opción, sin embargo, no es parte de la cadena de valor de la industria del cobre en Chile. Los ánodos se purifican en una etapa posterior denominada Refinación Electrolítica, que consiste en un proceso electroquímico para producir cátodos de cobre de alta pureza a partir de los ánodos provistos por el proceso de fundición.

A nivel internacional, existe una importante capacidad de tratamiento de concentrados en las fundiciones y refinerías, lo que ha permitido establecer contratos de largo plazo entre productores de concentrados y maquiladoras, además éstas aprovechan el tratamiento spot de concentrados excedentarios de la industria del cobre. Los cargos por tratamiento se denominan TC (*treatment charges*) y RC (*refining charges*) para la fundición de concentrados y electrorrefinación de cobre, respectivamente.

En el negocio de Fundición y Refinería los ingresos provienen principalmente del tratamiento y refinación, ventas de ácido sulfúrico y de bonos o premios por la recuperación de elementos valiosos. Los costos más relevantes son aquellos asociados a energía, mano de obra, mantenimiento e insumos.

Desde hace años, China es un actor principal en la producción de cobre de fundiciones y refinerías. En el año 2018, la producción de cobre refinado en China alcanzó 8,95 millones de toneladas de cobre, seguida por la de Chile con 2,46 millones y Japón con aproximadamente 1,59 millones. Esta posición dominante de China le ha permitido dominar la fijación de los cargos de tratamiento. El siguiente gráfico ilustra claramente la evolución de la producción de cobre refinado en los últimos 10 años, teniendo como referencia que la producción anual de cobre refinado en el año 2008 fue 18,2 millones de toneladas y en el 2018 de 23,7 millones de toneladas.

Gráfico 1_ Producción mundial de cobre refinado por país: 2009 vs 2018

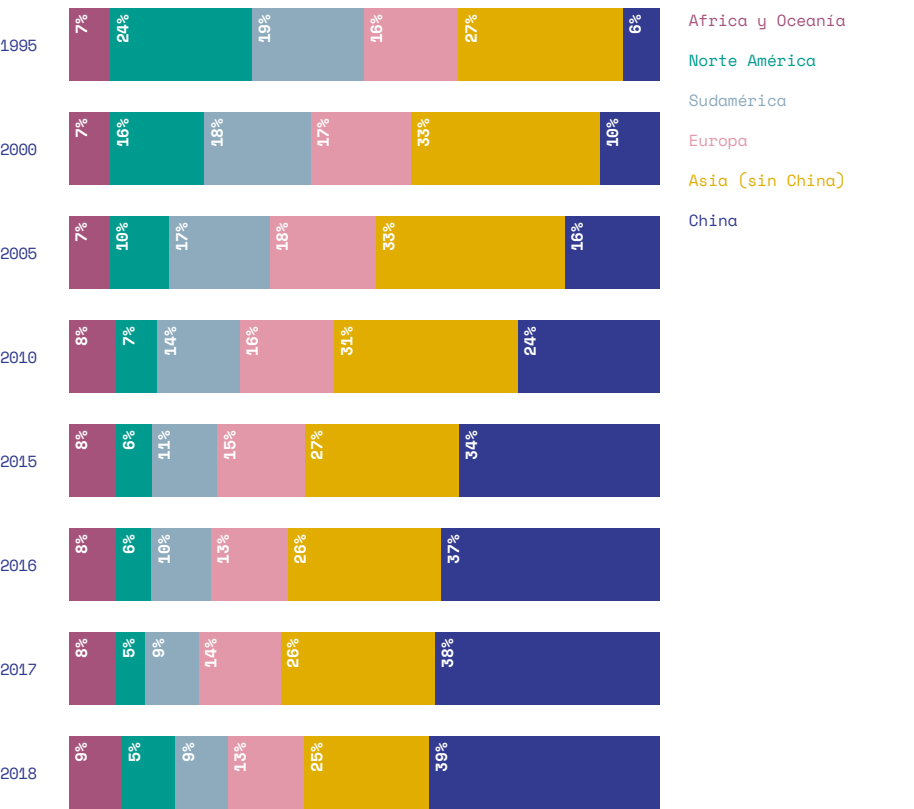


Fuente: Cochilco (2018)

Se prevé que China alcance pronto una participación cercana al 40% del procesamiento mundial de concentrados, lo que fortalecería aún más su posición dominante en la fijación de precios a nivel internacional, aumentando el riesgo en la industria de fundiciones chilenas. Cabe destacar que China produjo el 35,7% del cobre mundial de fundición en el 2018, seguida por Japón con un 9,8% y Chile con un 7%.

Respecto a la participación geográfica en la producción de cobre, cabe mencionar el fuerte crecimiento de Asia (con China) desde un 33% del total en el año 1995 a un 64% en el 2018. El siguiente gráfico ilustra esta evolución entre los años 1995 y 2018.

Gráfico 2_ Participación geográfica de producción de cobre de fundiciones



Fuente: Cochilco (2018)

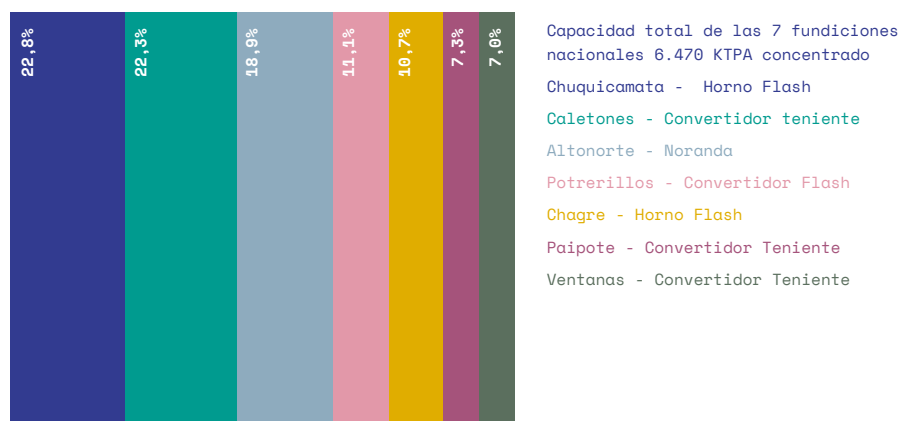
Por otra parte, a la mayor producción chilena de concentrados de cobre proyectada, se agregan las dificultades que podría enfrentar el comercio de concentrado de cobre debido a las impurezas que éste puede contener, que lo puede llevar incluso a ser calificado como una sustancia peligrosa debido principalmente a la presencia de arsénico.

Situación actual de las fundiciones y refinerías en Chile

En Chile existen actualmente siete fundiciones de cobre, cinco estatales (Caletones, Potrerillos, Hernán Videla Lira, Chuquicamata y Ventanas) y dos privadas (Chagres y Altonorte). Éstas emplean para la fusión de concentrados las tecnologías Flash (fusión instantánea), Convertidor Teniente (CT) y Convertidor Noranda (CN), estas dos últimas de fusión en baño.

En el proceso de conversión todas emplean convertidores Pierce Smith, situación que se ha mantenido desde el inicio de las operaciones. La capacidad de fusión con tecnología de Horno Flash de fusión de concentrados corresponde a la capacidad que existe en el Horno Flash Repotenciado de Chuquicamata y el de la Fundición Chagres. La restante capacidad de las fundiciones nacionales, operan con tecnología CT o Noranda. Esto se detalla en el siguiente gráfico.

Gráfico 3_ Capacidades y tecnologías de las fundiciones chilenas



Fuente: Mercado de concentrados: Situación mundial y mirada nacional, Expomin (2018)

El desempeño de las fundiciones puede ser evaluado en función de los costos directos de operación, los ingresos, el nivel de captura de gases metalúrgicos y la fijación de elementos contaminantes. Algunas de las fundiciones chilenas presentan una situación desfavorable debido a la obsolescencia de sus instalaciones, lo que impacta en sus altos costos, su menor disponibilidad respecto de estándares internacionales y bajas recuperaciones.

Las condiciones de mercado hacen también que los costos de mano de obra y de energía afecten el resultado operacional. En efecto, los costos de energía y mano de obra de las fundiciones están indexados a los de la minería y no a los de la industria manufacturera, que son más bajos. Al analizar el margen bruto del negocio, las cifras señalan que cuatro de las siete fundiciones, se encuentran en el último decil de la distribución global de competitividad del negocio con margen negativo.

La exportación del año 2018 es del orden de 3,3 millones de toneladas de cobre en concentrados, y de 2,38 millones de toneladas de cobre en forma de cátodos electro-obtenidos y refinados y 221 mil toneladas de cobre blíster. Cabe destacar que podría afectarse la comercialización de algunos excedentes de concentrados debido a los altos contenidos de arsénico, por ello, es fundamental anticipar los riesgos relacionados con los mercados de concentrados y fortalecer a nivel país la posición en el mercado de cátodos.

Tabla 1_ Margen bruto de fundición de concentrados de cobre

c/lb Cuf	Costo	Ingreso	Margen
Chile	38,5	29,3	-2,88
China	11,6	34,8	4,03
Mundo	20,4	31,1	3,76

Fuente: Cochilco (2018)

El Margen Bruto es un parámetro económico que refleja el nivel de competitividad de un negocio y se define como el Ingreso total menos el Costo neto de caja (excluye el factor de localización ya que no proviene de factores de eficiencia sino de su ubicación particular).

Al bajo nivel de competitividad actual de las fundiciones existentes en Chile, se suma el impacto de la nueva definición de límites máximos de emisión de azufre (dióxido de azufre y arsénico), normativa que surge a raíz de la recomendación de la OCDE de desarrollar normas para reducir el dióxido de azufre y los contaminantes tóxicos.

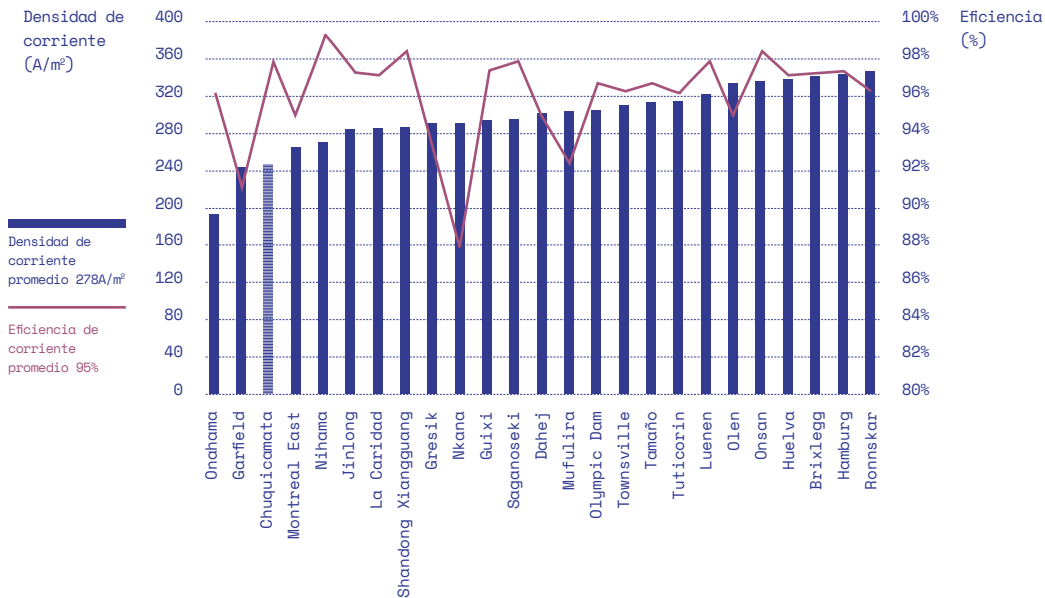
La norma establece para las fundiciones existentes, un límite máximo de emisiones de SO2 y As (en toneladas por año) correspondiente a un 95% de captura y fijación, y se establece un plazo máximo de 5 años para su cumplimiento, plazo que se cumplió en diciembre de 2018. En el caso de nuevas fundiciones, se establece un límite de emisiones más exigente, de un 98% de captura para el SO2 y de 99,976% para las emisiones de As.

Refinerías electrolíticas

Por otra parte, las refinerías chilenas las componen Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas, que aportan con un 6,5% de la capacidad global instalada y un 7,9% de la producción mundial de cátodos electro-refinados de cobre.

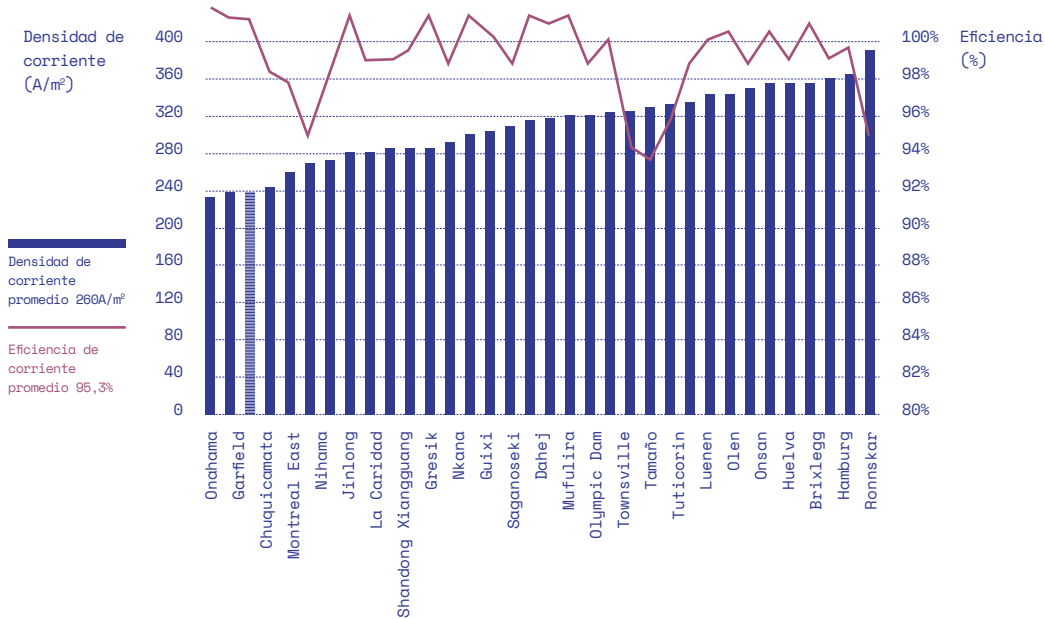
Las actuales tecnologías de electrodeposición en uso son las de Cátodo Permanente y la de Láminas Iniciales. La tecnología de cátodos permanentes utiliza en promedio una mayor densidad de corriente que las láminas iniciales (278 y 260 A/m2 respectivamente). Un parámetro importante de operación corresponde a la eficiencia de corriente y, como se aprecia en los gráficos siguientes, no se observa una correlación entre la densidad de corriente utilizada y la eficiencia de corriente. Por otra parte, no existen diferencias tan significativas entre los valores promedio de la eficiencia de corriente para cada una de las tecnologías.

Gráfico 4_ Tecnología de electro-depositación (cátodos permanentes)



Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

Gráfico 5_ Tecnología de electro-depositación (láminas iniciales)



Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

Se observa que la productividad de la tecnología de cátodos permanentes es mayor respecto de las de láminas iniciales (ver gráficos anteriores). No obstante, existe un importante número de refinerías de láminas iniciales modernas con muy buena productividad debido a la mecanización y automatización de las operaciones (productividad media de 1,4 HH/ t cátodos).

Las refinerías chilenas se encuentran en una posición de baja competitividad. Entre los años 2013 a 2018 han ocupado el último decil de margen bruto de la industria, con un valor negativo en dicho margen.

Tabla 2_ Margen bruto refinerías

Refinerías	Costo directo	Ingreso total	Margen de caja
	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)
China	3,32	18,50	15,17
Mundo	4,85	13,37	8,52
Chile	9,95	9,36	-0,59

Fuente: Cochilco (2018)

En esta situación, Chile, como primer productor mundial de cobre refinado, debe defender su posición en el mercado global a través de la venta de cobre catódico ya que representa ventajas respecto de la venta de concentrado debido a:

- / Potenciales restricciones a las exportaciones de concentrados por transporte marítimo.
- / Posibles alzas del cargo de tratamiento y refinación dado el poder de negociación de las fundiciones asiáticas.
- / Obtención de premios por la alta calidad de los cátodos en lugar de descuentos y costos adicionales por flete de los concentrados.
- / Ingresos adicionales por la recuperación y venta de metales valiosos presentes

Cabe precisar que las fundiciones chinas tienen en sus estructuras de negocio la comercialización de una diversidad de productos gracias a la recuperación de diferentes especies de valor presentes en los concentrados. Esta recuperación y procesos asociados representan hasta un 20% de sus utilidades¹.

¹ NERIN, Seminario de fundiciones IIMCh, 2018

Para avanzar en la dirección antes descrita, se requiere cambiar las actuales operaciones del nivel de obsolescencia tecnológica en que se encuentran, actualizando o reemplazando dichas instalaciones para lograr operaciones de clase mundial, con bajos costos de operación y altos niveles de captura que cumplan con las normas ambientales actuales y futuras.

En particular, se debería aspirar a que todas las fundiciones posean refinería electrolítica, una situación normal y deseable a nivel global, lo que permitiría aprovechar mejor las sinergias operacionales (tratamiento de *scrap* de ánodos y subproductos) y ahorros de fletes.

En el norte del país, en particular en la Segunda Región, existe la necesidad de abordar los concentrados complejos con restricciones de comercialización, sobre todo si se considera el gran volumen que provendrá del proyecto Chuquicamata Subterráneo. Este escenario abre la oportunidad de transformar las fundiciones en centros especializados de tratamiento de este tipo de concentrados.

Por último, cabe mencionar que Chile con una producción de ánodos de 1,488 millones de toneladas anuales, podría utilizar el 100% de la capacidad de generación de sus refinerías, que asciende a 1,224 millones de toneladas de cátodos.

visión del núcleo

Alcanzar un liderazgo tecnológico mundial, que aplicado al diseño y operación industrial, facilite la obtención de la aceptación de la comunidad para operar con altos estándares de desempeño, que aseguren un margen económico al menos en el segundo cuartil



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el Núcleo Fundición y Refinería, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió tres desafíos. Todas las soluciones identificadas, con sus respectivas líneas de I+D+i, aplican a más de un desafío. Existen casos en los que se agregan líneas de I+D+i adicionales en consideración del desafío planteado. Por ejemplo: la solución “Alto nivel de captura y tratamiento de concentrados complejos” es pertinente para los desafíos N°1, N°2 y N°3.

Esta solución posee tres líneas de I+D+i para el desafío N°1, a las cuales se añade una línea de I+D+i cuando la solución es planteada en el marco del desafío N°2 y dos líneas de I+D+i cuando la solución es planteada en el marco del desafío N°3.

A continuación, se detallan las soluciones y líneas de I+D+i

Desafío
01

Aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería

identificadas para cada uno de los desafíos planteados.

Las fundiciones chilenas presentan importantes brechas de productividad explicadas por una baja capacidad de fusión respecto del volumen de concentrados producidos, baja recuperación de cobre e insignificante recuperación de subproductos y de energía. Esto, junto al alto costo unitario del proceso, configura un escenario bajo el cual uno de los principales desafíos radica en mejorar la eficiencia de las fundiciones. La siguiente tabla compara los parámetros de las fundiciones chilenas con las de otros países con el fin de identificar las brechas de productividad.

Tabla 3_ Brechas de productividad de fundiciones chilenas

Parametro	Unidad	Fundiciones Chinas	Fundiciones Japonesas	Fundiciones Alemanas	Fundiciones Chilenas
Capacidad de fusión	KTS/año	1.000 - 1.500	1.200	1.200	320 - 1.000
Captura de azufre	%	98	99	98,5	95
Costos unitarios	cUS\$/lb	13	18	19	22-40
Recuperación de cobre	%	98 - 98.5	98 - 99.5	98	95 - 97.3
Recuperación de energía	Si/No	Si	Si	Si	No
Recuperación de otros metales	Si/No	Si	Si	Si	No

Fuente: Elaboración propia

Aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería

Solución

Líneas I+D+i

- | | |
|--|--|
| <p>01 Mínimas pérdidas de cobre y de otros metales con valor</p> | <p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos <i>bath smelting</i>.</p> <p>Limpieza de escorias.</p> <p>Automatización mecanización, robotización de refinería.</p> <p>Recuperación de metales valiosos (Mo, Re, U, Ge).</p> <p>Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>bath smelting</i>.</p> <p>Tecnología capa fundida.</p> |
| <p>02 Equipos de alta capacidad</p> | <p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> |
| <p>03 Mínimos procesos y operaciones unitarias</p> | <p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>bath smelting</i>.</p> <p>Nuevo proceso electro-refinación continua.</p> <p>Horno directo a blister.</p> |
| <p>04 Alto nivel de captura y tratamiento de concentrados complejos</p> | <p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos <i>bath smelting</i>.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>bath smelting</i>.</p> <p>Tecnología de lecho empacado.</p> |

Solución

Líneas I+D+i

05

Intensa
mecanización,
automatización,
robotización

Conversión continua con metal
blanco sólido.

Instrumentación y sistema de
control expertos en hornos *bath
smelting*.

Automatización, mecanización,
robotización refinerías.

06

Procesos continuos

Conversión continua con metal
blanco sólido.

Automatización mecanización,
robotización de refinería.

Uso de toberas de alta presión
en hornos *bath smelting*.

Horno directo a blister.

Nuevo proceso electro-refinación
continua.

07

Mínimos desechos y
obtención de otros
subproductos

Limpieza de escorias.

Recuperación de metales valiosos
(Mo, Re, U, Ge).

Recuperación a partir de polvos
de fundición y barros anódicos.

Control de impurezas.

Control de Sb y Bi en refinería.

08

Buenas condiciones
laborales y Capital
humano avanzado

Automatización, mecanización,
robotización refinerías.

Control de impurezas.

Control de Sb y Bi en refinería.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 02

Disminuir el impacto medioambiental

Existen importantes brechas en la captura de azufre y arsénico, lo que plantea un desafío importante para las fundiciones chilenas en materia medioambiental. La necesidad de aumentar la captura para igualar los valores alcanzados en otros países se ha traducido en una nueva normativa (Decreto N°28, 2013), la cual establece un nivel de captura del 98% (SO₂ y As) para las futuras instalaciones.

Disminuir el impacto ambiental

Solución

- 01** Mínimas pérdidas de cobre y de otros metales con valor

Líneas I+D+i

Conversión continua con metal blanco sólido.

Instrumentación y sistema de control experto en hornos *bath smelting*.

Recuperación de metales valiosos (Mo, Re, U, Ge).

Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.

Limpieza de escorias.

Automatización, mecanización, robotización de refinerías.

Tecnología capa fundida.

Uso de toberas de alta presión en hornos *bath smelting*.

- 02** Equipos con alta capacidad de procesamiento y largas campañas

Conversión continua con metal blanco sólido.

- 03** Alto nivel de captura y tratamientos de concentrados complejos

Instrumentación y sistema de control expertos en hornos *bath smelting*.

Automatización, mecanización, robotización de refinerías.

Tecnología de lecho empacado.

Uso de toberas de alta presión en hornos *bath smelting*.

Tratamiento de concentrados altos en As en BBF.

Solución

Líneas I+D+i

04 Mínimos desechos y obtención de otros subproductos

Recuperación de metales valiosos (Mo, Re, U, Ge).
Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.
Limpieza de escorias.
Control de impurezas.
Control de Sb y Bi en refinerías.

05 Buenas condiciones laborales y Capital humano avanzado

Automatización, mecanización, robotización refinerías.
Control de impurezas.
Control de Sb y Bi en refinerías.

Fuente: Elaboración propia

Desafío

03

Mejorar las condiciones laborales

La incorporación de nuevas tecnologías en los procesos de fundición y refinería impacta directamente en los desafíos planteados anteriormente, además de contribuir a mejorar las condiciones laborales de los trabajadores en las operaciones. La manipulación del material fundido constituye un riesgo para los trabajadores involucrados en el proceso, por lo cual eliminar la actual brecha en accidentabilidad, explicada principalmente por la existencia de múltiples procesos discontinuos en las operaciones, constituye un importante desafío a abordar.

Mejorar las condiciones laborales

Solución	Líneas I+D+i
01 Mínimos procesos y operaciones unitarias	Recuperación de metales valiosos (Mo, Re, U, Ge). Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos. Limpieza de escorias. Control de impurezas. Control de Sb y Bi en refinerías.
02 Intensa mecanización, automatización, robotización	Conversión continua con metal blanco sólido. Instrumentación y sistema de control expertos en hornos <i>bath smelting</i> . Automatización, mecanización, robotización de refinerías.
03 Alto nivel de captura y tratamientos de concentrados complejos	Instrumentación y sistema de control expertos en hornos <i>bath smelting</i> . Automatización, mecanización, robotización de refinerías. Tecnología de lecho empacado. Uso de toberas de alta presión en hornos <i>bath smelting</i> . Tratamiento de concentrados alto As en BBF.

Solución

04 Buenas condiciones laborales y capital humano avanzado

Líneas I+D+i

Automatización, mecanización, robotización de refinerías.
Control de impurezas.
Control de Sb y Bi en refinerías.

05 Mínimas pérdidas en cobre y otros metales con valor

Conversión continua con metal blanco sólido.
Instrumentación y sistema de control expertos en hornos *bath smelting*.
Recuperación de metales valiosos (Mo, Re, U, Ge).
Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.
Limpieza de escorias.
Automatización, mecanización, robotización de refinerías.
Tecnología capa fundida.
Uso de toberas de alta presión en hornos *bath smelting*.

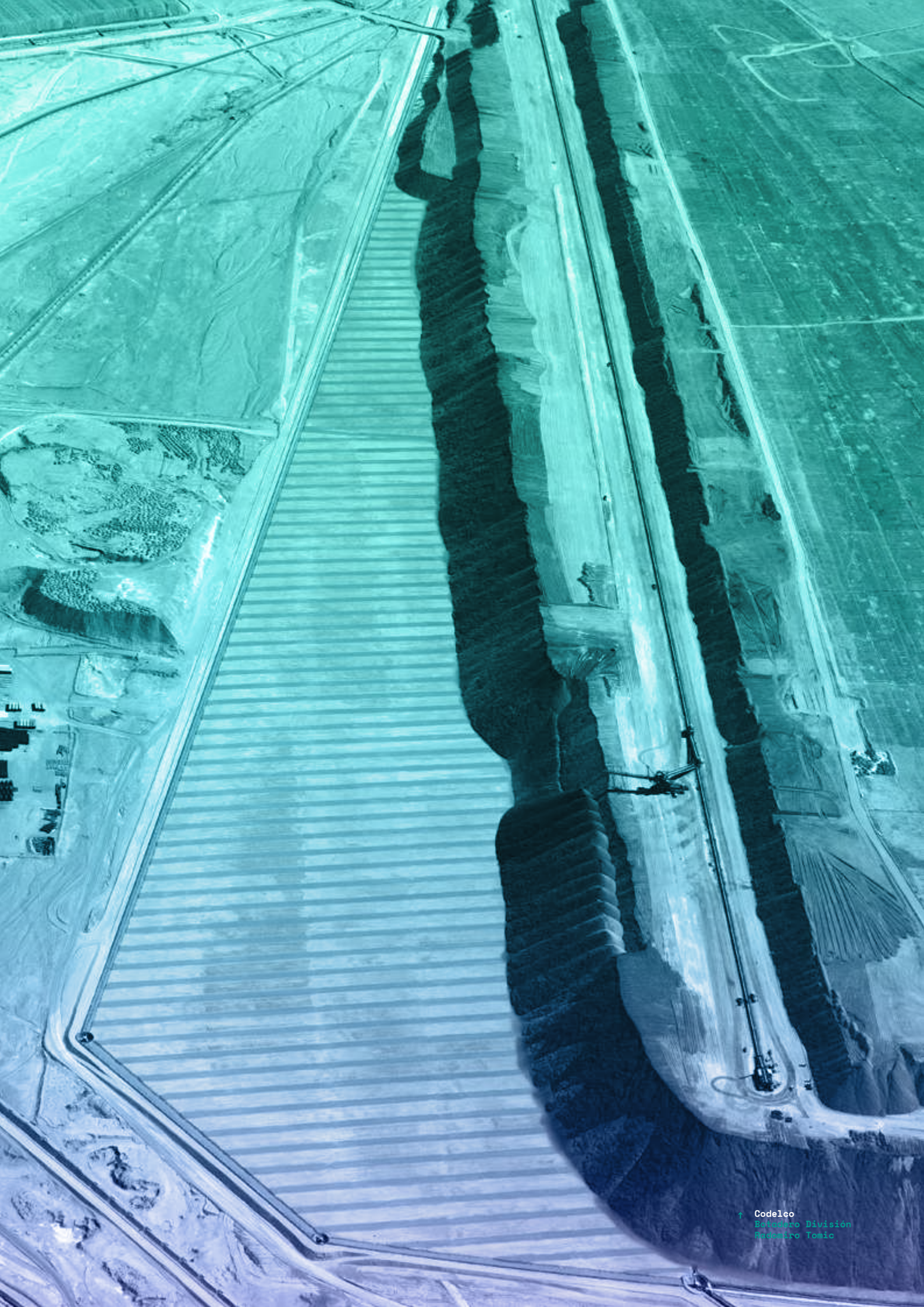
06 Equipos con alta capacidad de procesamiento y largas campañas

Conversión continua con metal blanco sólido.

Fuente: Elaboración propia

06 núcleo hidrometalurgia

El capítulo **núcleo hidrometalurgia** fue desarrollado en base al trabajo realizado por Sergio Castro, Humberto Estay, Fernando Flores, Miguel Meza y Juan Carlos Salas.



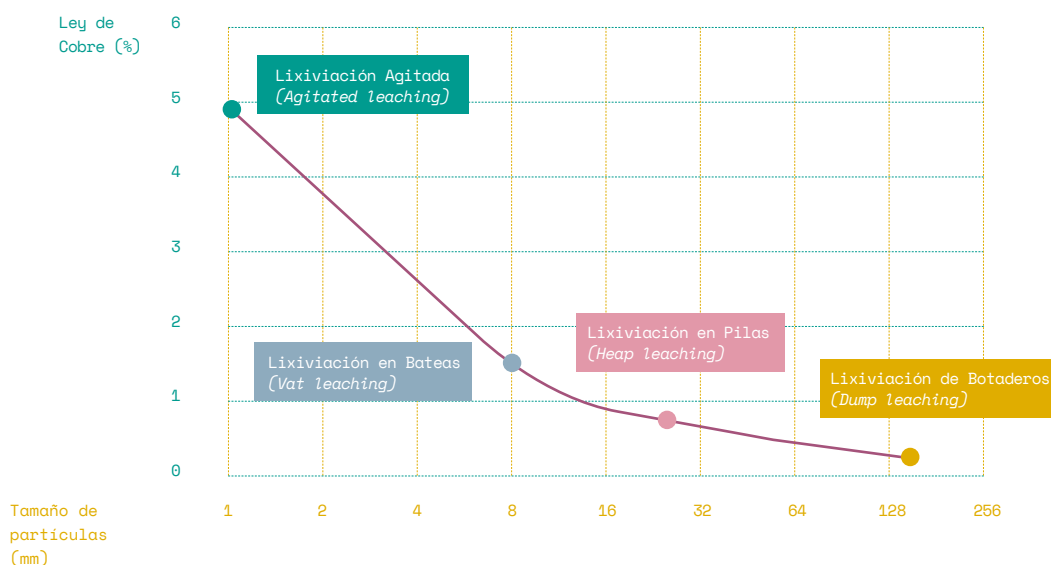
Antecedentes

La hidrometalurgia del cobre es la recuperación del metal contenido en minerales, tanto oxidados como sulfurados, utilizando procesos en fase acuosa. Los métodos de extracción del cobre han evolucionado tanto en la forma de su tratamiento como en su disposición para la extracción por vía acuosa, comenzando por la lixiviación en bateas, lixiviación agitada y lixiviación en pilas. Últimamente, el desarrollo conduce hacia la lixiviación in situ. Los procesos de purificación y reducción del metal, extracción por solventes y electro-obtención han mantenido también una ruta de mejoramiento sostenido, especialmente en términos de disponibilidad tecnológica para aumentar el nivel de recuperación.

Otro aspecto es la implementación relativamente reciente de procesos de lixiviación con soluciones altas en cloruros, en algunos casos asociados con el uso de agua de mar en minería. El uso de agua de mar ha viabilizado la lixiviación de sulfuros secundarios y continúan los esfuerzos para resolver las limitaciones de la lixiviación de sulfuros primarios.

El gráfico 1 muestra esquemáticamente las tecnologías aplicadas en función de la ley del cobre total y el tamaño promedio de las partículas de mineral:

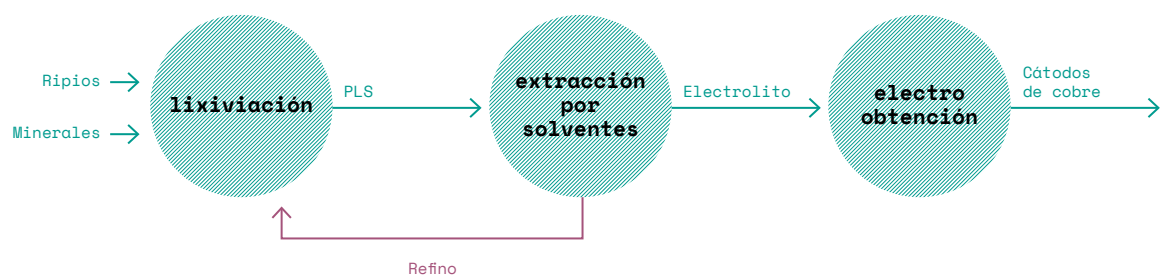
Gráfico 1_ Ley de cobre de alimentación en función del tamaño de partículas



Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico anterior se desprende que la selección del tipo de proceso de lixiviación a utilizar está en función de la ley de alimentación y tamaño de partículas. Es necesario notar que la lixiviación en pilas y lixiviación de botaderos apuntan a tratar materiales de baja ley.

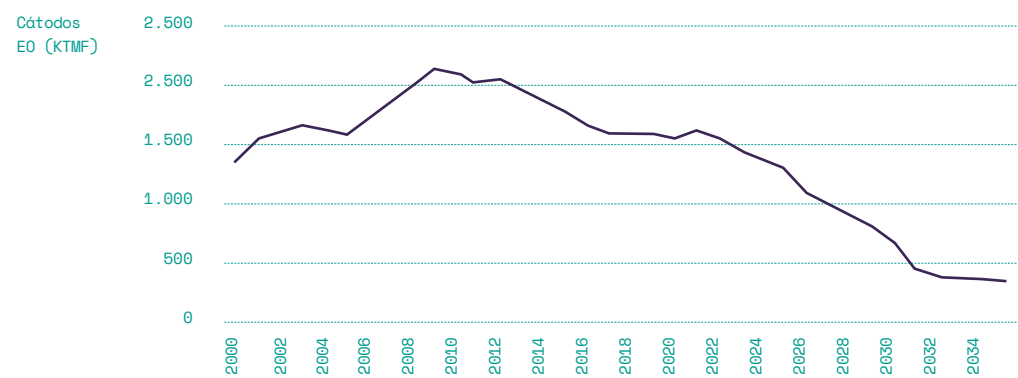
Figura 1_ Diagrama simplificado proceso hudrometalúrgico



Fuente: Elaboración propia

Los óxidos se forman cerca de la superficie debido a su origen en el proceso de oxidación de un yacimiento. Por ende, son los primeros en ser explotados. En Chile, estos recursos han comenzado a agotarse, por lo que las proyecciones de largo plazo apuntan a que, en términos del contenido de valor, el desarrollo de la industria minera nacional se basará en explotar reservas mineras sulfuradas de baja ley. En efecto, en el gráfico 2 puede apreciarse la declinación en la producción chilena de cobre electro-obtenido a partir del año 2009.

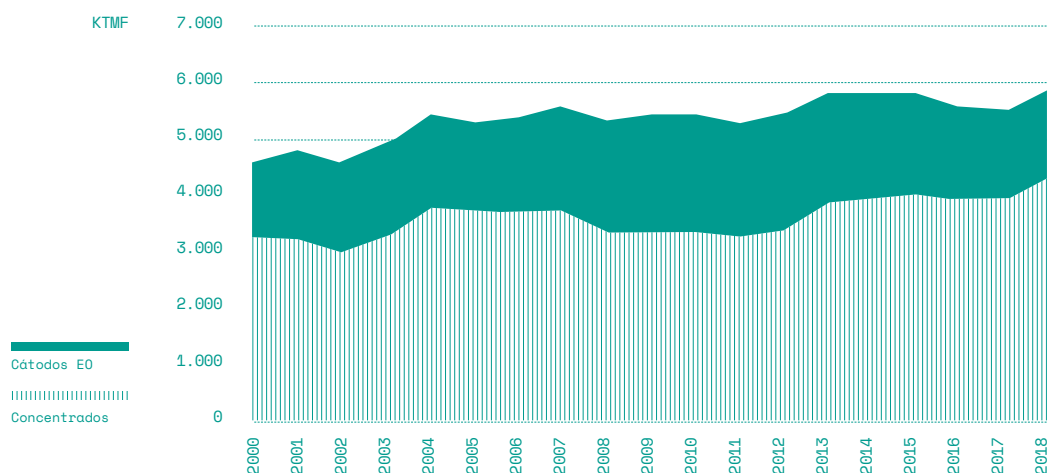
Gráfico 2_ Producción de cobre en Chile por la vía hidrometalúrgica de extracción por solventes y electro-obtención



Fuente: Elaboración propia

Las carteras de proyectos y los planes de desarrollo futuro de las empresas mineras están basados fuertemente en el aprovechamiento de minas que ya se encuentran en operación (proyectos *brownfield*). En muchos de ellos la profundización de sus yacimientos conlleva la necesidad de procesar recursos sulfurados, algunos con bajas leyes. Esto se traduce en una contribución marginal de la explotación de sulfuros. Lo anterior, sumado al deterioro en la calidad del mineral, tanto de las leyes como de sus características de lixiviabilidad, hace prever que sólo un 12% de la producción esperada de cobre corresponderá a cátodos electro-obtenidos para el año 2025, generándose una importante capacidad ociosa en las plantas de electro-obtención.

Gráfico 3_ Producción de cobre en Chile



Fuente: Cochilco (2018)

En comparación a los procesos de molienda y concentración, normalmente aplicados para minerales sulfurados, la hidrometalurgia aún enfrenta algunos desafíos tecnológicos por resolver como la recuperación de cobre y de otras especies de valor -como metales preciosos y molibdeno-, y la cinética de sus procesos, que puede alcanzar meses de procesamiento.

Considerando los aspectos diferenciadores de la hidrometalurgia, como los indicadores económicos que han hecho posible la explotación de yacimientos con leyes cada vez más bajas, es necesario que esta línea productiva continúe su desarrollo, a fin de abordar los desafíos antes mencionados. En este sentido, se hace evidente que es crucial para la hidrometalurgia contar con tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en lo concerniente al tiempo de recuperación de cobre.

Junto con lo anterior, hay que tener presente que la energía es el insumo más relevante en términos de costos en el proceso hidrometalúrgico. Ésta representa, según el precio de compra, entre el 25% y el 30% del total, siendo entre 80% y 90% de este costo imputado al proceso de electro-obtención. Por otra parte, el consumo de agua en la hidrometalurgia es relativamente bajo (0,11 m³ por tonelada de mineral), en comparación a la línea de molienda y flotación, que alcanza a 0,45 m³ por tonelada de mineral.

Cabe mencionar que mejoras significativas de productividad podrían hacer rentable la explotación de algunos recursos marginales que hoy no se consideran dentro de los inventarios de recursos. En otras palabras, el desarrollo de quiebres tecnológicos podría permitir la conversión de estos pasivos en activos.

Adicionalmente, la hidrometalurgia es una vía factible para el tratamiento de concentrados de cobre, especialmente complejos. Hoy en día, existen instalaciones industriales que verifican tal posibilidad, pero normalmente asociadas a características particulares de un yacimiento, como es la existencia de capacidad ociosa de SX/EW y posibilidades de neutralización del ácido producido. Con todo, hoy se reconoce que la hidrometalurgia de concentrados es una alternativa tecnológica de menor madurez que la pirometalurgia, pero que continúa avanzando en la consolidación de sus procesos. No obstante, la expectativa es que en el mediano plazo se intensifiquen los aspectos sinérgicos entre ambas líneas de procesamiento, por ejemplo, en las áreas de tratamiento de residuos arsenicales o en el tratamiento de efluentes y aguas de mina.

visión del núcleo

*Ser el
referente mundial en
operaciones de plantas
hidrometalurgicas
a través de altos
estándares de
eficiencia operacional,
productividad, y
sustentabilidad social
y medioambiental*



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para este núcleo, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió los siguientes desafíos, para los cuales se identificaron posibles soluciones y líneas de I+D+i.

Desafío

01

Cuidado del medio ambiente y
responsabilidad social

Un aspecto de suma importancia corresponde a la creciente necesidad de contar con “licencia social” para operar, es decir, tener la aceptación por parte de las comunidades sobre las operaciones, algo que sólo se obtiene mediante el cumplimiento pleno de la normativa ambiental. Debido a esto, el adecuado manejo de los residuos de la hidrometalurgia es una práctica fundamental para la industria.

Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

Solución

01 Manejo de residuos
industriales sólidos,
líquidos y gaseosos

Líneas I+D+i

Manejo sustentable de residuos.
Utilización de bioprocesos.

Fuente: Elaboración propia

Desafío

02

Aumento de la productividad

Mejorar la eficiencia de los procesos, en términos de la cinética de extracción de cobre y el consumo de ácido y energía, es y seguirá siendo un aspecto muy relevante para enfrentar la disminución de las leyes y la presencia de especies consumidoras de ácido.

Aumento de la productividad

Solución

Líneas I+D+i

01 Disminución del consumo de energía y agua

Reducción del consumo de energía en electro obtención y agua en el proceso global.

02 Desarrollo de nuevas tecnologías

Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

Control de la temperatura de los procesos hidrometalúrgicos.

Fuente: Elaboración propia

Desafío
03

Incremento de los recursos
y reservas minerales

La existencia de especies alteradas con baja presencia de cobre soluble, la aparición de arcillas que afectan la percolación de los lechos de lixiviación y de minerales de cobre refractarios (sulfuros primarios del tipo calcopirita), son aspectos relevantes que se deben enfrentar en las operaciones productivas.

En este contexto, la base de recursos y reservas minerales seguirá determinando fuertemente la productividad y la proyección del negocio, por lo que resulta de suma importancia disponer de métodos de tratamiento más eficientes, versátiles y capaces de responder a la variabilidad del mineral.

Incremento de los recursos y reservas minerales

Solución	Líneas I+D+i
01 Uso de futura capacidad ociosa	Lixiviación de minerales de baja ley y ripios. Lixiviación de concentrados. Lixiviación de metal blanco y polvos de fundición. Lixiviación de minerales alterados, arcillosos, generadores de finos. Lixiviación In situ.
02 Recuperación de cobre y metales preciosos	Recuperación de metales preciosos.
03 Desarrollo de nuevas tecnologías	Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

Fuente: Elaboración propia

La priorización de los desafíos y las soluciones de este núcleo reveló que las áreas de lixiviación de minerales de baja ley y de lixiviación de concentrados de cobre serán el foco del desarrollo.

20 núcleo minería verde

El capítulo **núcleo minería verde** fue desarrollado en base al trabajo realizado por Marcela Angulo, José Araneda, María José Araneda, Francisco Awad, Jorge Bravo, Graciela Budinich, Julien Colas, Rossana Gaete, Carlos Gajardo, Andreina García, Fernando Hentzschel, Gustavo Lagos, Koen Langie, Rodrigo Mancilla, Romela Marín, Isabel Marshall, René Martínez, Verónica Martínez, Macarena Montané, Ignacio Moreno, Hector Painevilo, Grecia Perez de Arce, Sebastián Pérez, Victor Pérez, Sebastián Pilasi, Iván Piñeyro, Germán Quezada, Juan Rivadeneira, Ana María Ruz, Iván Valenzuela y Alejandra Wood.



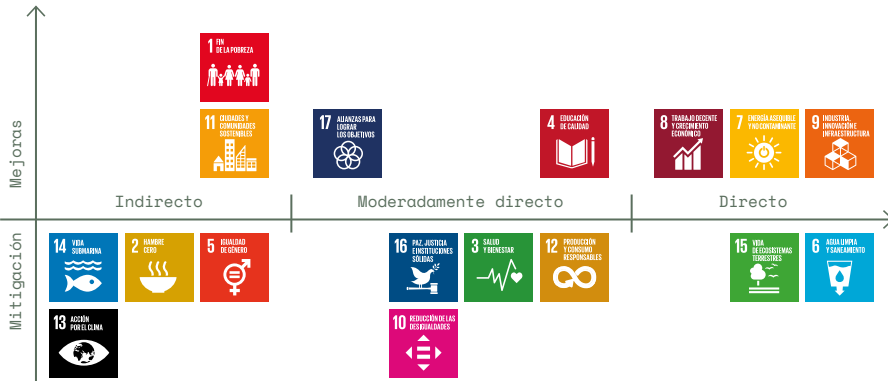
Antecedentes

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendieran un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente y el diseño de nuestras ciudades¹.

La industria minera tiene un potencial real para contribuir a la mayoría de los ODS, a través de la participación de empresas públicas y privadas con una integración creciente de las comunidades en las cuales se desarrollan las operaciones. Actualmente, todas las empresas incorporan en sus reportes de sustentabilidad los ODS y han avanzado mucho en el proceso de identificación y priorización de éstos. En la minería, las operaciones productivas tienen un potencial para contribuir en varios ODS, debido a los impactos multisectoriales que las empresas y las operaciones pueden tener en las comunidades, los ecosistemas y las economías.

Figura 1_ Minería y su relación con los ODS, PNUD 2016

Minería y su relación con los ODS



Fuente: Mapping Mining to the SDGs: An Atlas NOV 2016 PNUD

1 Reporte Medio Ambiente ODS (2018).

En materia de sostenibilidad ambiental las actividades de la minería suelen tener consecuencias para la tierra, el agua, el clima, la flora y la fauna, así como para quienes dependen de estos recursos. Las actividades mineras exigen una gran cantidad de energía y generan una gran cantidad de emisiones, por lo que existe una oportunidad para aumentar la eficiencia y ampliar el acceso a la energía, tal como exponen el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento) y el ODS 15 (Vida de ecosistemas terrestres). La construcción y la operación minera exigen el acceso a la tierra y a los recursos hídricos, lo que requiere mitigar o evitar los impactos que contemplan el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante) y el ODS 13 (Acción por el clima).

Los beneficios directos que conlleva la implementación de los ODS, así como los estándares de sustentabilidad que los consideran, se reflejan en los sistemas de almacenamiento de energía, recuperación de recursos (reciclaje), eficiencia energética, rehabilitación de minas, infraestructura compartida y en la electromovilidad, entre otros.

Hoy la tendencia global de los mercados de metales es el establecimiento de un marco conceptual de suministro responsable de minerales y metales, que busca que las compañías mineras que operan a lo largo de la cadena de valor del metal proporcionen evidencia de que los minerales que entreguen al mercado se hayan producido en zonas geográficas libres de conflicto, utilizando las mejores prácticas y estándares asociados a la responsabilidad empresarial².

En el contexto internacional, el cambio a energías de baja emisión para el cumplimiento de los objetivos de cambio climático para limitar el calentamiento global a 1,5 grados antes del 2030³, generará una mayor demanda de metales conductores como el cobre, además de mayores recortes en las tasas de emisiones por países. Las energías limpias como la eólica y la solar requieren de un suministro asegurado de materias primas para su producción.

A nivel nacional contamos con ventajas estratégicas, como el acceso a los recursos de agua y energía, y la disponibilidad de recursos geológicos como cobre, hierro, plata y litio, para abastecer la demanda de metales requeridos para el desarrollo de tecnologías de energías limpias⁴.

Existe consenso en la industria minera en avanzar hacia una “minería verde” que promueva la eficiencia energética e hídrica de las operaciones mineras, la reducción de la huella ambiental causada durante los ciclos de vida del producto y minimice los impactos sociales. Al mismo tiempo, una minería verde deberá desarrollar métodos de control y medición que tengan en cuenta las características especiales de las operaciones, automatizar procesos, mejorar el trabajo, garantizar la seguridad de los trabajadores y establecer prácticas de economía circular en la cultura de las organizaciones.

² London Metal Exchange (LME), Octubre 2018. Responsible Sourcing: LME position paper.

³ IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C, The Intergovernmental Panel on Climate Change, UNEP, WMO 2018 <https://www.ipcc.ch/>

⁴ International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. 2017. The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future.

Resulta indispensable en la cadena de suministro o abastecimiento responsable de metales contar con metodologías para la trazabilidad de las variables relevantes e indicadores de desempeño de los ámbitos de la sustentabilidad, de manera que las compañías mineras certifiquen su producción responsable.

En este contexto, el núcleo de Minería Verde ha establecido inicialmente 5 temas relevantes a abordar y que constituyen los desafíos actuales y de mediano plazo de la minería chilena, a saber:

- / Hacer un uso eficiente de la energía y fomentar el uso de energías limpias en la minería
- / Hacer uso eficiente de los recursos hídricos en las operaciones mineras
- / Aplicación de economía circular a lo largo de la cadena de valor en las operaciones
- / Mejorar las condiciones laborales de seguridad y salud ocupacional de los trabajadores
- / Minimizar los impactos ambientales en las comunidades

La minería verde aborda solo una parte del desarrollo sustentable minero, aquella sobre la cual se pueden enfocar los esfuerzos en el corto y mediano plazo para contar con resultados mediatos que permitan generar un cambio gradual y permanente de mejoras en los ámbitos mencionados.

La figura 2 ilustra los conceptos descritos, incorporando la necesidad de establecer estándares metodológicos para el seguimiento, monitoreo y cumplimiento de planes a través de la trazabilidad de los procesos y actividades mineras.

Figura 2_ Diagrama del concepto de Minería Verde



Fuente: Adaptado de Mesa de Minería Verde, Ministerio de minería (2019)

Uso eficiente de la energía y fomento del uso de energías limpias en la minería

La energía en la minería es un importante suministro que representa entre el 18 y el 25% de los costos de producción, dependiendo de la faena productiva. La minería emplea combustibles fósiles y energía eléctrica en sus operaciones y por ello surge la necesidad de hacer un uso eficiente de estos recursos que permitan por una parte disminuir los costos directos y, por otra, reducir la huella de carbono. La gran minería se encuentra haciendo esfuerzos por disminuir la intensidad del uso de la energía en las operaciones y, al mismo tiempo, por incorporar energía desde fuentes renovables.

Uso eficiente de los recursos hídricos en las operaciones mineras

El agua en la industria minera del cobre es un insumo estratégico y crítico en las operaciones para el procesamiento de los minerales sulfurados y oxidados de los yacimientos. La minería hace uso de recursos hídricos continentales y de agua de mar, donde ésta última tiene un crecimiento sostenible dada la escasez del recurso de agua continental y las restricciones de su uso cada vez más exigentes.

Economía circular en las operaciones

La minería del cobre genera en toda la cadena de valor, desde la extracción hasta la fabricación de los productos, cuantiosos residuos y desechos en cada una de las etapas de producción. Existen residuos mineros masivos líquidos, sólidos y gaseosos, tales como el material estéril o lastre, relaves, escorias, gases metalúrgicos y soluciones de refino, entre otros. Además, una parte de éstos residuos y desechos tienen potencial de valorización y algunos podrían emplearse en las mismas operaciones o en otras industrias. Dentro de éstos se encuentran los neumáticos mineros y de carretera, aceites y grasas, y más de 100 desechos menores.

Mejorar las condiciones laborales de seguridad y salud ocupacional de los trabajadores

Si bien la minería ha disminuido sustancialmente en las últimas décadas la accidentabilidad y la fatalidad en las operaciones, aún hay espacios y brechas que se deben mejorar para lograr la meta de cero accidentabilidad. Por otra parte, también se han mejorado los ambientes de trabajo, propendiendo a minimizar los efectos en el trabajador minero, con menor impacto en su salud y condición física. Peso a ello, aún existen enfermedades profesionales que deben ser erradicadas con el advenimiento de la tecnología y de un cambio cultural de la organización.

Minimizar los impactos ambientales en las comunidades

En conjunto con las autoridades, la industria minera y las comunidades han avanzado progresivamente hacia la disminución o eliminación de las vulnerabilidades ambientales en lugares cercanos a poblados y ciudades. En este contexto, también se ha avanzado en el desarrollo sostenible de las operaciones mineras y de las comunidades aledañas, tendiendo a crear condiciones favorables para ambas entidades bajo un ambiente colaborativo. No obstante, se requiere un especial cuidado en un trabajo conjunto para erradicar ciertas vulnerabilidades que afectan la convivencia y podrían generar impactos ambientales no deseados.

Minería Verde en la industria del cobre en Chile

Chile es principal productor de cobre del mundo y en su territorio se encuentran algunas de las mayores reservas de ese metal⁵. Este liderazgo incluye la aplicación de altos estándares en diversos ámbitos de la actividad minera, para mantener la licencia socio-ambiental de operación, lo que ha puesto a la industria en un lugar de privilegio a nivel nacional e internacional.

Hoy es un imperativo el crecimiento sostenible y virtuoso de la minería, que distribuya equitativamente sus beneficios, que prevenga, mitigue y compense sus impactos ambientales, operando con pleno respeto y responsabilidad en los derechos de las comunidades locales.

Nuestro país tiene las condiciones necesarias para la implementación de una minería verde que disminuya el impacto en el medio ambiente, fomente las energías limpias para una mayor eficiencia energética en el proceso productivo minero (cadena de valor), optimice el uso de los recursos hídricos, recupere y recicle elementos de interés e incorpore tecnologías habilitadoras para reducir significativamente la huella ambiental de la industria minera del cobre.

En el marco de la minería verde, los principales indicadores de desempeño ambiental de la industria minera en Chile se presentan en la siguiente figura. Estas son algunas de las variables que requieren seguimiento y se espera una mejora en términos de eficiencia, emisiones, uso de agua y recirculación entre otros.

5 Anuario Minería Sernageomin 2016

Figura 3_ Principales indicadores de sustentabilidad minería chilena



El **consumo eléctrico** de la minería del cobre corresponde 94.153 TJ se ha mantenido en torno al 33% del total nacional



Explotación de minas, registra la mayor **generación de residuos peligrosos** con 294 mil toneladas, alcanzando el 46% del total de estos residuos generados en el país



El **total emisiones GEI** directas de la minería del cobre es de 5.491 Kt CO₂ EQ, representa un 4,9% del total nacional



El **consumo de agua** de la industria minera corresponde a un 3% del total nacional (2018), alcanzando 16,1 m³/s (20% mar y 80% continental)



A nivel nacional la **tasa de recirculación** en las plantas concentradoras es de un 76%

Fuente: Elaboración propia a partir de CNE, Cochilco, DGA, MMA, RECT-SMA.



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el Núcleo Minería Verde, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió cuatro desafíos. Para cada uno de ellos se identificaron posibles soluciones y líneas de I+D+i.

Desafío 01

Sustentabilidad energética, hídrica y huella de carbono

Siendo el cobre un gran facilitador para el desarrollo de energía en el futuro, se requiere que la producción de cobre sea responsable y sustentable en términos de los consumos de materias primas, tales como recursos fósiles, hídricos y minerales, así como de las emisiones gaseosas, incluyendo gases de efecto invernadero (GEI), y emisiones líquidas y sólidas.

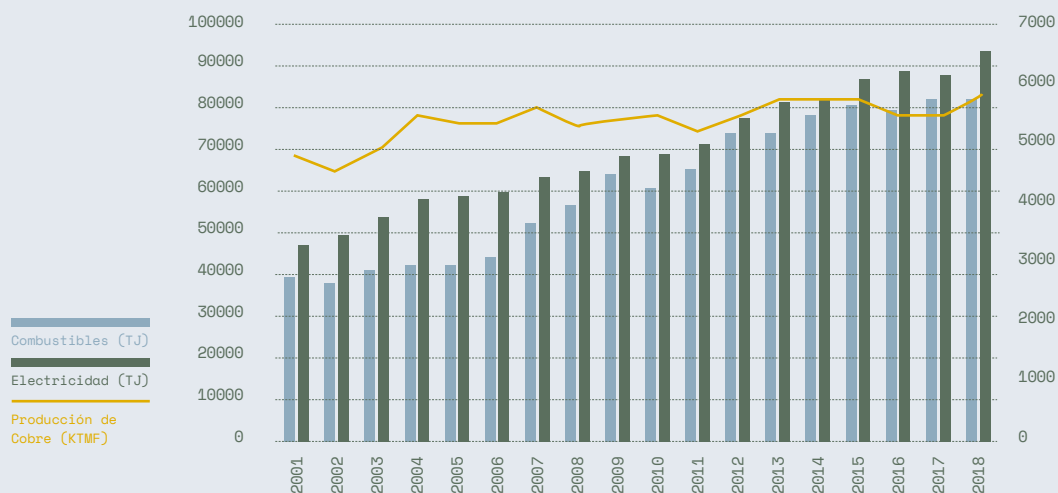
En términos energéticos, se prevé una tendencia para los próximos 10 años de un aumento en el consumo de agua desalada y de mar, así como una mayor demanda energética de las plantas concentradoras que aumentarán desde el 50% del consumo energético que representan hoy a un 70%. Ambas situaciones significarán aumentos relevantes en el consumo de energía. En este plano, el vínculo más cercano de la minería está en la adopción de energías renovables y la eficiencia energética. Como sector consumidor de energía, el mayor aporte y oportunidad de innovación se encuentra en fomentar fuentes de suministro sustentables, la implementación de energías renovables en los procesos productivos y hacer un uso óptimo de esta energía para minimizar sus impactos.

Consumos de energía en la minería

El consumo de energía en la minería de cobre alcanzó los 176,7 PJ en el año 2018, un 4% más que el 2017. Este consumo corresponde a 82,59 PJ de energía proveniente de los combustibles y a 94,15 PJ de consumo de electricidad. El consumo de combustibles en el 2018 aumentó un 0,9% respecto del año anterior y el de electricidad un 6,9% respecto de 2017.

A continuación, el gráfico muestra los consumos de electricidad y combustibles en la industria minera del cobre en el periodo 2001 a 2018.

Gráfico 1_ Consumo energético y producción de cobre fino



Fuente: Cochilco (2019)

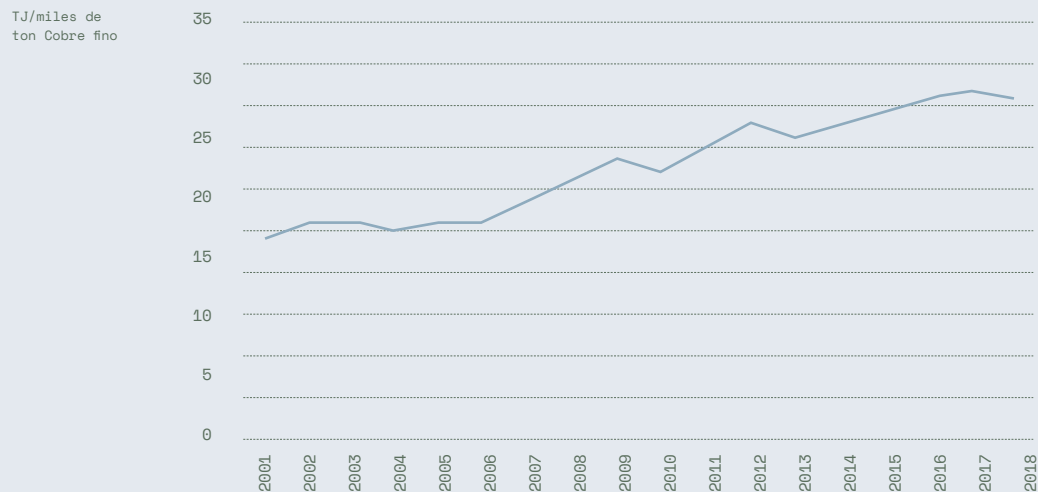
Como ilustra el gráfico, existe un aumento sostenido del consumo de combustibles y de energía eléctrica. Se observa que la tasa media anual de crecimiento de combustibles ha sido de un 6,22% en el periodo de 18 años. Sin embargo, la de energía eléctrica ha sido de 5,51% anual en el mismo periodo. Por otra parte, la producción de cobre fino equivalente en el periodo señalado solo ha aumentado 1,28% anualmente.

Esta situación de aumento en el uso de combustibles se explica en gran parte por las mayores distancias medias de acarreo de materiales estériles, las mayores distancias a los chancadores primarios y las mayores profundidades de los rajes que en conjunto han requerido mayor energía para el transporte de minerales y materiales. En este contexto, la mina de rajo emplea el 80% del total de combustible empleado en las faenas mineras, seguido por fundiciones con un 8%.

Por otro lado, la disminución de las leyes de los minerales y la mayor dureza de los minerales provenientes de los yacimientos primarios demandan un mayor uso de energía eléctrica en los equipos de chancado y molienda, lo que genera un mayor consumo sostenido. En este caso, las operaciones de concentración en promedio consumen cerca del 57% de la energía eléctrica en las operaciones.

Cabe mencionar que la intensidad global de uso de energía en todas sus formas, medida como la cantidad de energía para producir una unidad de cobre fino equivalente, se ha ido incrementando notablemente desde el 2001 al 2018 con una tasa media del 3,7% anual, lo que se ilustra en el gráfico siguiente.

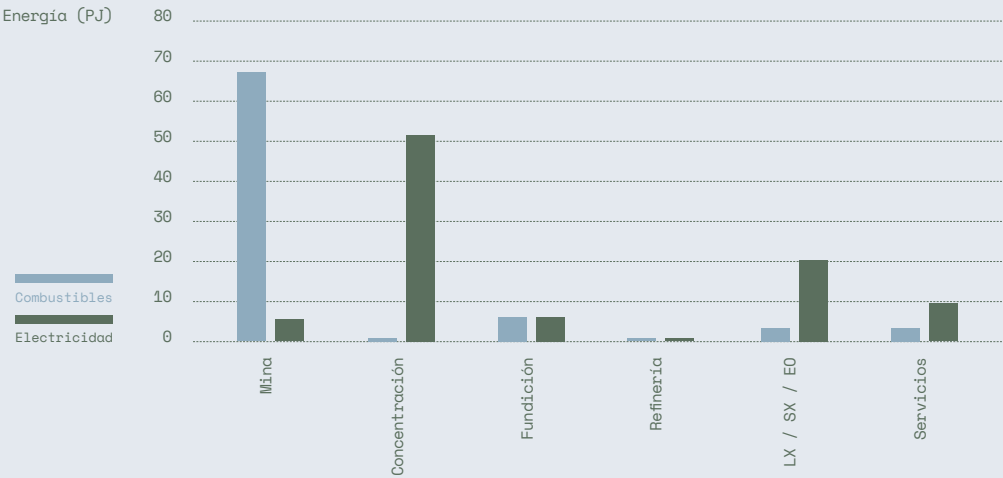
Gráfico 2_ Intensidad del uso de energía



Fuente: Elaboración propia con datos de Cochilco.

Tal como se observa en el gráfico 3, las operaciones de mina son las que utilizan la mayor proporción de combustibles para el transporte de material estéril y minerales, seguidas por la fundición de concentrados y la línea hidrometalúrgica. En cambio, la energía eléctrica es empleada mayoritariamente en los procesos de concentración y en las operaciones de electro-obtención.

Gráfico 3_ Utilización de energía en procesos



Fuente: Elaboración propia con datos de Cochilco

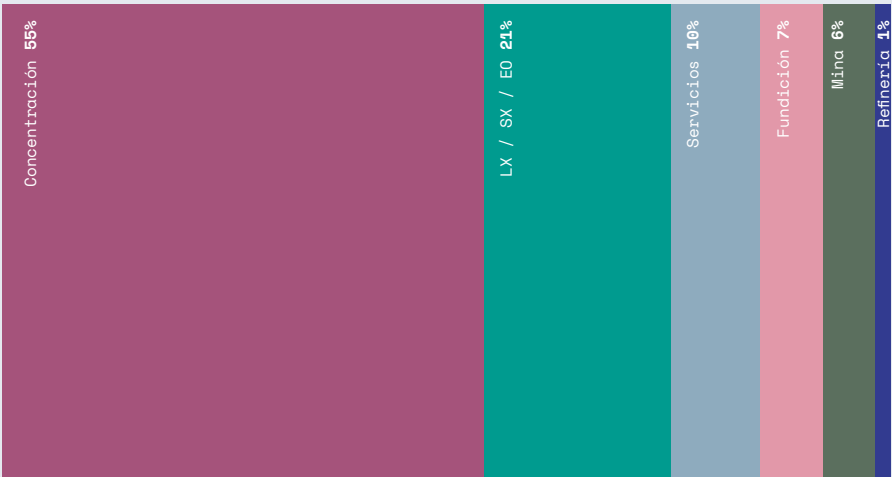
Los gráficos 4 y 5 muestran que en el 2018, de los 82,6 PJ de energía de combustibles empleada en la industria, el 80% del combustible fue empleado en la mina y el 8% en operaciones de fundición de concentrado. En lo referente a la energía eléctrica, el 55% se destina a la concentración de minerales y un 21% a las operaciones hidrometalúrgicas.

Gráfico 4_ Consumo de combustible en procesos mineros



Fuente: Cochilco (2018)

Gráfico 5_ Consumo de electricidad en procesos mineros

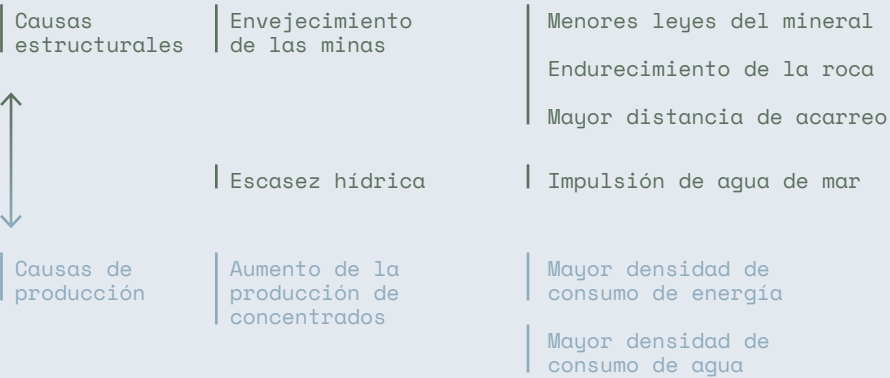


Fuente: Cochilco (2018)

A continuación, la figura 4 señala las causas del crecimiento de los consumos energéticos respecto a la producción de cobre fino en el país.

Figura 4_ Diagrama de procesos de consumo energético y relación de mayores demandas

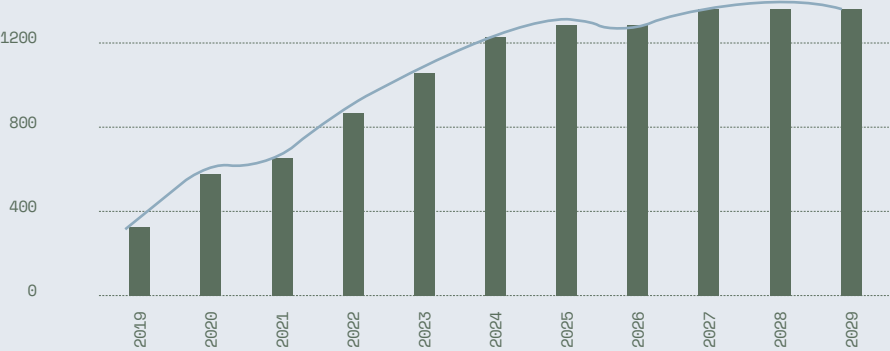
Crecimiento en el consumo energético mayor al de la producción



Fuente: Cochilco (2019)

Por otra parte, la proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica requerida para satisfacer el consumo esperado de la minería del cobre entre 2019 y 2029, se muestra en el gráfico 6. La demanda se cuadruplicará en el periodo señalado, por razones que explicaremos a continuación.

Gráfico 6_ Proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica (MW) requerida por la minería del cobre, 2018-2028



Fuente: Cochilco (2019)

El aumento de los consumos del sector está determinado por:

- / Un aumento de la proporción de concentrados hasta representar un 67% del total el año 2029, en conjunto con la disminución de la producción de cátodos.
- / Un aumento en la demanda de energía para los procesos de desalinización y bombeo de agua de mar que va de un 4% a un 10% el 2029, y pasa así a ser el segundo proceso de mayor demanda de energía eléctrica.

Cabe mencionar que en el ámbito de sustentabilidad energética, existen dos proyectos en curso, a saber:

- / Sistema de combustión dual Hidrógeno – Diesel en camiones mineros
- / Electromovilidad minera mediante celdas de combustible

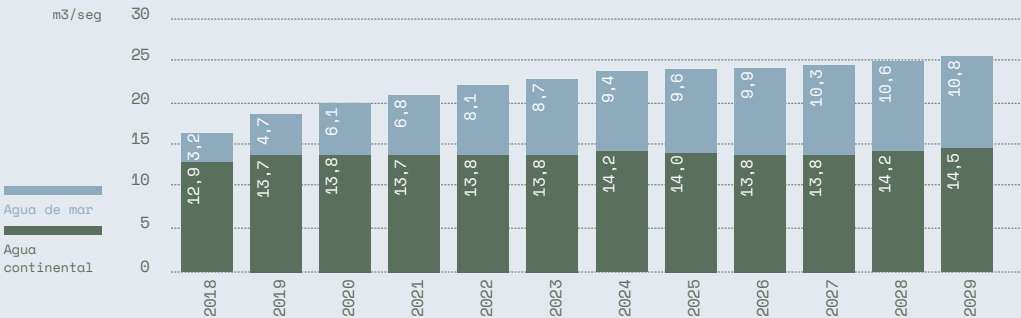
Uso del agua en minería

El agua en la industria minera del cobre es considerada como un insumo estratégico, dadas las crecientes restricciones que tiene su uso en un ambiente de menor disponibilidad y, por lo tanto, mayor costo de obtención.

De acuerdo a datos de Cochilco (2018), el consumo de agua total aumentará casi en un 50% entre 2018 y 2029, llegando a 25,35 m³/seg. Sin embargo, se proyecta que el consumo de agua de mar será cada vez mayor, alcanzando los 10,82 m³/seg en el 2029, lo que representa un 230% de crecimiento respecto de los 3,28 m³/seg consumidos el 2018.

A continuación, el gráfico 7 muestra la evolución del consumo proyectado de agua fresca y de mar en la minería de cobre para el período 2018-2029.

Gráfico 7_ Evolución del consumo de agua según fuentes



Fuente: Cochilco (2018)

Respecto del consumo regional, la región que más varía su consumo de agua de mar y continental es Antofagasta que reduce su consumo de agua continental en un 55%. La Región de O'Higgins también lo reduce, pero en un 13,4%⁶.

Respecto al agua de mar, se estima un considerable aumento que se explica principalmente por iniciativas en la región de Antofagasta. En ese período de tiempo ocurre la puesta en marcha o ampliación de diversas plantas desaladoras, como las de BHP Escondida y Spence, Distrito Norte de Codelco, la planta de Centinela para suplir agua al proyecto Distrito Centinela de Antofagasta Minerals, y la extracción de agua de mar para la posible expansión de Sierra Gorda de KGHM. Se espera un aumento del 248% en el uso de agua de mar en esta región, con promedio de crecimiento de un 11,7% anual⁷.

El consumo de agua de mar llegará en Antofagasta a 7,8 m³/seg para el 2029, es decir, un 248,5% más que en el año 2018. En segundo lugar, está la región de Atacama, que llegaría a consumir 1,7 m³/seg el 2029, 230% más que el 2018⁸.

En términos de procesos, la concentración seguirá acaparando el mayor consumo de agua y, para el 2029, experimentará un alza de casi un 75%, mientras que el proceso de hidrometalurgia disminuiría su consumo. Hay que considerar que a futuro se proyecta una menor cantidad de proyectos del área hidrometalúrgica del cobre por el agotamiento de minerales lixiviables.

Cabe destacar que los proyectos que explicarían casi la mitad del alza del consumo de agua de mar al 2029 son probables, potenciales o posibles, es decir, tienen un grado de incertidumbre en su materialización. Algo similar ocurre con el consumo de agua de mar según la etapa de desarrollo de los proyectos, ya que solo el 45% del consumo al 2029 se explicaría por proyectos en operación. Respecto del uso de agua según el estado de los permisos ambientales, para el 2029 el 63% del consumo sería de proyectos que están al día con la tramitación ambiental⁹.

El uso de agua de mar, ya sea desalinizada o empleada directamente en los procesos mineros y metalúrgicos, permite desplazar el uso de agua continental que proviene de diferentes fuentes y contribuye así a mejorar las condiciones de sustentabilidad de la industria con relación a su entorno y las comunidades aledañas. Es importante promover el uso del agua de mar sin tratar, directamente, como lo realiza Minera Centinela, o tratándola parcialmente en lugar de fomentar el uso del agua desalinizada, sobre todo para las nuevas operaciones. Para operaciones ya en funcionamiento se deben realizar muchos ajustes que podrían no ser factibles¹⁰.

En cuanto al desarrollo a futuro, se prevén al menos 12 nuevos proyectos con uso de agua de mar considerando ampliaciones y reemplazos de sistemas existentes. En su mayoría, éstos se ubican en la zona de Antofagasta y Atacama y se asocian a 24 proyectos mineros, los que se señalan en la figura 5.

6 Cochilco: Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2017-2028

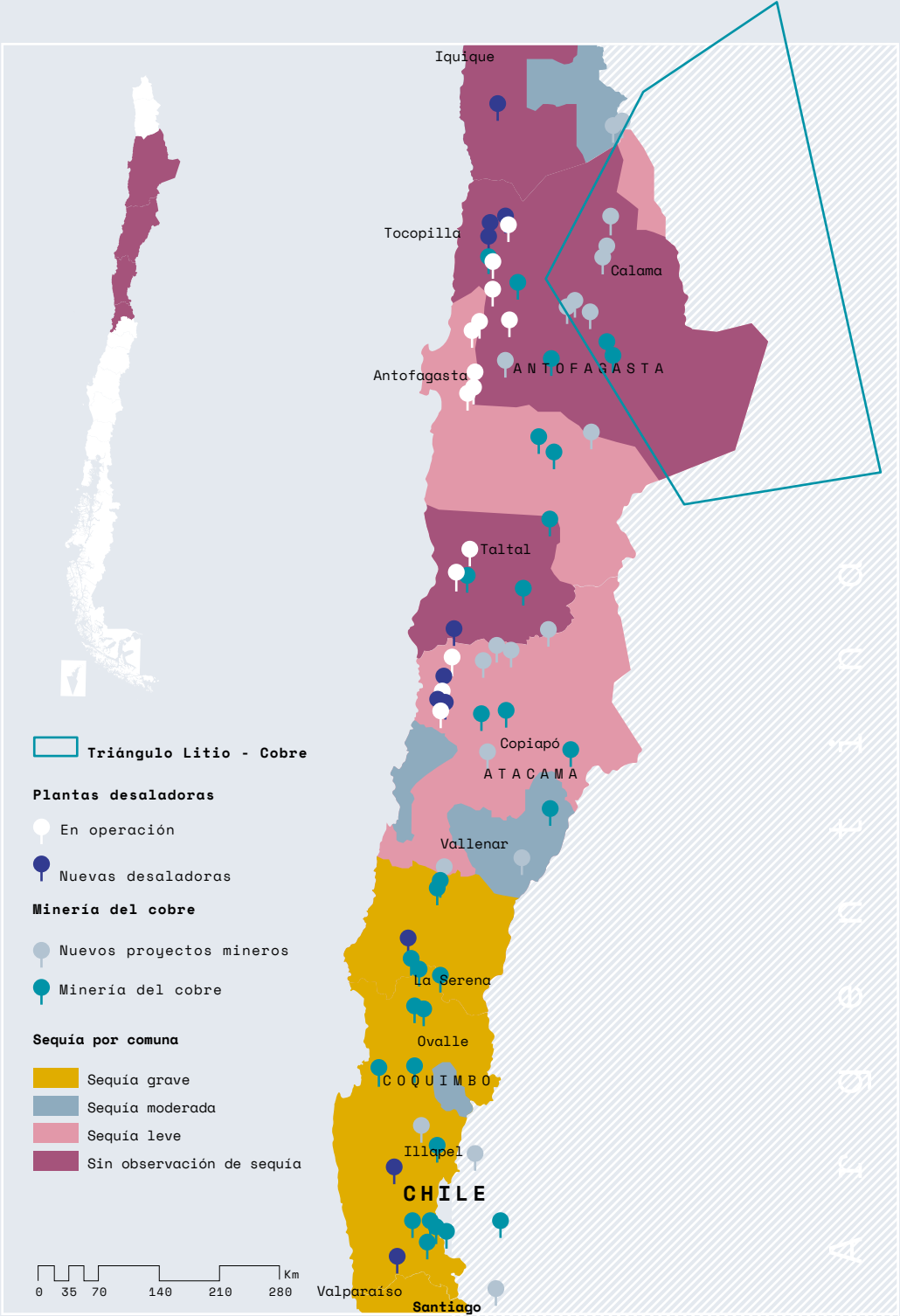
7 Ibid.

8 Ibid.

9 Ibid.

10 Agua de Mar Atacama: oportunidades y avances para el uso sostenible de agua de mar en minería Luis Cisternas, Edelmira Gálvez, Yanett Leyton y José Valderrama

Figura 5_ Proyección de plantas desaladoras y proyectos mineros nuevos y en operación al 2029



Fuente: Alta Ley (2019), a partir de Minería Abierta, Sernageomin y ODEPA

Al analizar las actuales operaciones y futuros proyectos con agua de mar, se debe considerar la estrecha relación que existe entre el uso de agua de mar y el consumo energético, pues de una manera u otra se traspasa el obstáculo de escasez hídrica a un problema energético. El costo del agua se transforma ineludiblemente en costo energético. Esto pone de relieve la importancia de una mayor integración entre el agua y la energía sostenible, en el que la reutilización del agua, combinada con la gestión integrada por cuencas, podría proporcionar una solución para la escasez observada en las cuencas altamente vulnerables ubicadas en ambientes áridos¹¹.

Al mismo tiempo, es importante considerar las singularidades de cada operación y su entorno en la definición de su abastecimiento hídrico; el uso de agua de mar no es siempre factible técnica, económica o socialmente. La localización de las operaciones es vital en el análisis, pues no todas pueden abastecerse de agua de mar. Las soluciones para este desafío se presentan en la siguiente tabla.

Sustentabilidad energética, hídrica y huella de carbono	
Solución	Líneas I+D+i
01 Eficiencia en la producción de cobre y subproductos con mínimo de huella de carbono y agua	Perfeccionamiento de tecnologías para el control de las emisiones de GEI. Optimización de las rutas de transporte de materiales, e insumos para los productos a lo largo de la cadena de valor. Perfeccionamiento de tecnologías costo-eficientes y sustentables para la generación de energía y para el control y recuperación/recirculación de las aguas de durante la operación.

¹¹ Agua de Mar Atacama: oportunidades y avances para el uso sostenible de agua de mar en minería Luis Cisternas, Edelmira Gálvez, Yanett Leyton y José Valderrama

Solución

02 Eficiencia energética y sustitución de combustibles fósiles

Líneas I+D+i

- Eficiencia energética y sustitución de combustibles, enfocadas en transporte de mineral (camiones y correas).
- Perfeccionamiento de la confianza de los modelos para la predicción de los consumos en diferentes escenarios de operación de molinos y plantas concentradoras.
- Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la incorporación de nuevas fuentes de energía (hidrógeno, solar, eólica, entre otras) en las operaciones de plantas de concentrados.
- Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la generación de energía, aumento de la capacidad de almacenamiento y reducción de equipos ociosos en ciclos de producción.
- Desarrollo de tecnología para autogenerar energía a partir de las correas transportadoras de mineral u otras potenciales fuentes.
- Integración de sistemas de producción y distribución de aguas.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 02

Trazabilidad e indicadores de sustentabilidad

La trazabilidad tiene por objetivo rastrear las actividades, los responsables de realizarlas, los equipos empleados, las materias primas (insumos), las emisiones, residuos y la información generada o empleada, a través de todos los procesos de la elaboración de un producto o la prestación de un servicio, para poder fortalecer la recolección de datos de las operaciones, compararlas entre sí y además detectar oportunidades de mejora y conocer el impacto de cada proceso en el medio ambiente.

Los estándares trazables ofrecen un amplio rango de beneficios tempranos a lo largo de la cadena de suministros, que se pueden materializar a nivel de la empresa, de la cadena de suministro y del sector. El uso de estándares puede resultar en mejoras en las operaciones, compras, ventas y mercadeo, involucramiento de las partes interesadas, ahorros y beneficios económicos, así como también un cambio sectorial. De esta forma, los beneficios tempranos del uso de normas y metodologías compartidas y validadas pueden fortalecer significativamente el valor del negocio y los impactos de sostenibilidad. Éstos últimos también respaldan el caso de negocio a lo largo de la cadena de suministros.

Asimismo, la implementación de estas herramientas robustece la reportabilidad y la transparencia en la generación de la información, lo que se torna relevante cuando se debe dar cuenta del desempeño ambiental, social y también productivo de las compañías.

Esta implementación de esquemas trazables de sostenibilidad se aborda en un 53% por la minería de gran escala, solo un 16% en minería artesanal y mediana o pequeña y un 31% a todas las escalas. Si bien la mediana y pequeña minería representan un bajo aporte de mineral a la producción mundial, los aportes en términos del impacto en las medidas de sustentabilidad serían relevantes en estos segmentos.

Para una mayor armonización de los esquemas de la pequeña, mediana y gran minería, es necesario que se redefinan los conceptos existentes, como el nivel de mecanización, la inversión y la producción, así como las metodologías y trazabilidad a implementar. Esquemas como los que comenzaron a utilizar en las compañías de minerales de estaño, tantalio, tungsteno, y oro (3TG), en las que se definen requisitos mínimos a implementar, independientemente del tamaño y capacidad de la empresa, son buenos ejemplos de trazabilidad y certificación. De esta manera un esquema puede ser desplegado más ampliamente, pero con menores efectos sobre el rendimiento de las grandes empresas.

El principal desafío es que las estrategias de sustentabilidad, así como sus indicadores, se puedan alinear a las prácticas de gestión con las normas ambientales o de seguridad existentes, tales como la ISO 14001 o OHSAS 18001, para desarrollar así una lista de pasos de gestión específicos de la minería del cobre. En este sentido se debiese tender hacia un sistema de gestión unificado, sustentable y trazable, que permita la comparación entre empresas del cobre que incorpore los reportes voluntarios (como GRI, ICMM, MAC, SGDs), así como los informes de aplicación obligatoria de las medidas de mitigación y procesos de evaluación ambiental de nuestro país, como el Código del Cianuro, el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), reportes de cumplimiento ambiental de resoluciones de calificación ambiental RCA-SMA, los requerimientos específicos de los minerales de las zonas de conflicto, como RED-FLAG y OECD, entre otros, y los requisitos de trazabilidad en los productos finales de venta (ECO LEVEL y certificación LEDD)¹². Adicionalmente, la trazabilidad es la base de cuantificación y generación de metas y KPI de sustentabilidad para poder avanzar en una estrategia de minería verde.

Al realizar un análisis crítico de los indicadores, el esquema de producción y similitud de la industria, así como el alcance de la acreditación en la cadena de valor, encontramos que a diferencia de otros metales no existe un estándar específico para la minería del cobre.

A nivel de cambios regulatorios nacionales se registran avances en el tema de trazabilidad, a través del anteproyecto de Ley de Cambio Climático 2019¹³. Este cuerpo normativo considera tanto la creación del Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero, para la elaboración y actualización del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero y otros contaminantes climáticos de vida corta, (MP10 y MP2,5) con objeto de velar por la coherencia de las emisiones reportadas, y asegurar la calidad de su estimación; así como el Sistema de Certificación de Gases de Efecto Invernadero, que otorgará certificados, rótulos o etiquetas que informarán acerca de la cuantificación, gestión y reporte de las emisiones de gases de efecto invernadero, así como la reducción o absorción de dichos gases, para que cumplan con los criterios, metodologías y requisitos que establecidos. Ambos instrumentos apuntan a fortalecer la actual carencia de un método trazable e independiente que permita el monitoreo, reporte, verificación y certificación de las Emisiones GEI¹⁴ y sus componentes hídricos asociados.

Las soluciones para este desafío se presentan en la siguiente tabla.

¹² Sustainability Schemes for Mineral Resources: A Comparative Overview. BGR. Karoline Kickler, Dr. Gudrun Franke, 2017

¹³ Anteproyecto de Ley Marco de Cambio Climático 2019.

¹⁴ A modo de ejemplo, en la actualidad los proveedores de energía eléctrica emiten sus propios certificados a los clientes que abastecen, basados en diferentes metodologías, respecto de las fuentes de energía utilizadas para la generación.

Trazabilidad e indicadores de Sustentabilidad

Solución	Líneas I+D+i / Estudios y normas
01 Uniformar metodologías de medición y variables críticas	Definir los criterios técnicos de medición y reportabilidad y de regulación de cómo, cuándo y qué medir en temática de sustentabilidad a nivel país en línea con el contexto internacional.
02 Fijación de indicadores y metas	Definir los criterios técnicos y regulatorios de cuáles serán los indicadores y metas de sustentabilidad a nivel país.
03 Seguimiento, reporte, verificación y certificación	Definir los criterios técnicos y regulatorios de cómo auditar y certificar la sustentabilidad del sector minero a nivel país.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 03

Reducción de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas

La industria minera debe reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), óxido nitroso (NO_2) y ozono (O_3). El 97% de los GEI en la atmósfera son de origen antropogénico y su concentración ha aumentado progresivamente. Durante los últimos 15 años, la minería en Chile ha aumentado sus emisiones de GEI a una tasa anual de aproximadamente 5,3%, debido al mayor consumo de electricidad y de combustibles, por lo que en medio de la llamada descarbonización de la economía, la preocupación por proteger el medio ambiente y la salud se traducirán en obligaciones que requerirán cambios relevantes en el proceso productivo minero. Esto exige tomar medidas que impulsen las energías renovables, la eficiencia energética, el uso de tecnologías de bajas emisiones, la recuperación de éstas, su potencial uso en la generación de energías, así como la implementación de tecnologías bajas en carbono.

Las operaciones mineras generan Residuos Industriales Líquidos o RILES que son tratados por las mismas compañías y están regulados por decretos ley, lo que permite minimizar los efectos e impactos en el medio ambiente. En este contexto, y debido a la escasez de los recursos hídricos, se ha generado una disminución de éstos en las operaciones mediante la recirculación en los procesos, lo que mejora y optimiza el uso del agua.

Existen tecnologías con diferentes aplicaciones para el tratamiento de efluentes, que permiten el abatimiento, la remoción de metales y confinamiento de los mismos, y también tecnologías para la captación y remoción de sulfatos y otros elementos como los cloruros. Sin embargo, en este ámbito existe el desafío de contar con tecnologías más competitivas en términos de costos.

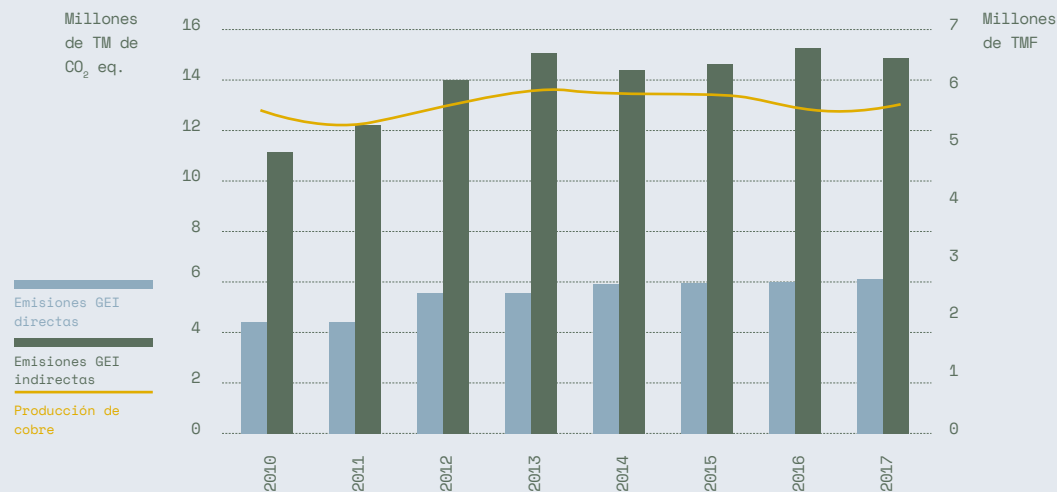
Emisiones de GEI

En el 2016, las emisiones de gases de efecto invernadero totales del país fueron de 111,7 millones de toneladas de CO_2 equivalente, incrementándose en un 114,7 % desde 1990 y en un 7,1 % desde 2013. El principal GEI emitido fue el CO_2 (78,7 %), seguido del CH_4 (12,5 %), N_2O (6,0 %), y los gases fluorados (2,8 %). Específicamente, en el sector de la minería del cobre, durante el año 2016 se registraron emisiones directas de GEI por un total de 5,9 millones de toneladas de CO_2 equivalente, lo que representa un 4,9% del total de emisiones del país¹⁵.

El siguiente gráfico muestra las emisiones de GEI directas (Alcance 1) e indirectas (Alcance 2) y producción de minería del cobre 2010-2017.

¹⁵ Tercer Informe Bienal de actualización de Chile sobre cambio climático 2018.

Gráfico 8_ Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile



Fuente: Cochilco (2018)

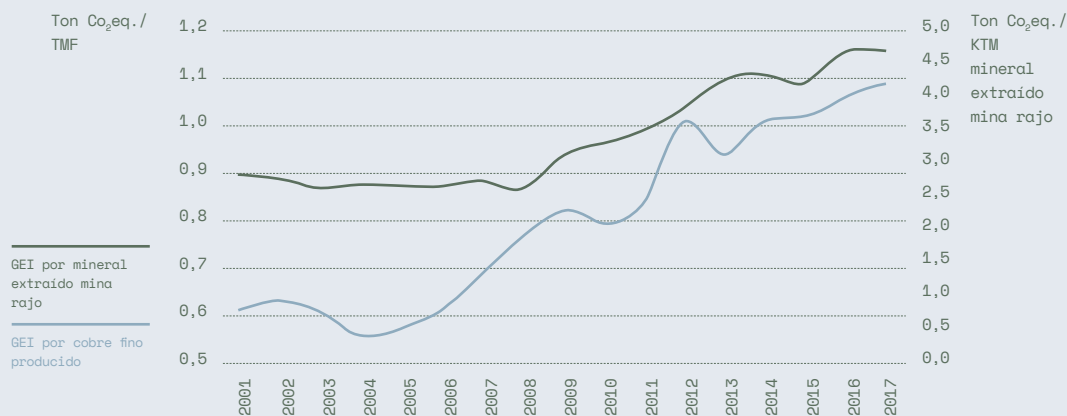
El 2017, las emisiones totales fueron un 1,4% menores a las registradas durante 2016, variación que implica una disminución de 286 mil toneladas de CO2 equivalente. Esto se atribuye principalmente a una caída del 2,7% en las emisiones indirectas, lo que a su vez se explica por una mayor capacidad instalada de ERNC en el Sistema Interconectado Central (SIC).

Dentro de los GEI directos, el diésel es el combustible responsable del 89,8% de las emisiones, lo que se asocia a su mayor uso. En efecto, el uso de diésel representa el 88,7% del total de combustibles usados en la minería del cobre nacional.

El proceso que produce mayores emisiones de GEI directos es la extracción y transporte desde la mina rajo, que durante el año 2017 registró 4,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, el 77,6% del total y un 20,5% más que en el 2012. Sin embargo, si bien el mineral extraído desde la mina rajo ha presentado fluctuaciones positivas y negativas desde el 2012, el consumo de combustibles ha tendido invariablemente al alza en cada año, debido a que mayores consumos de energía se deben a mayores distancias de acarreo desde el punto de extracción hasta la planta de proceso. En relación a los coeficientes unitarios de emisiones directas de GEI¹⁶, que permiten evaluar la intensidad de emisiones independientemente del mineral o producción, se observa que ha ido en constante crecimiento en los últimos 17 años producto del mayor consumo de combustibles, tanto por una mayor producción de cobre, como por cambios estructurales que han afectado a la minería chilena, siendo el principal, el envejecimiento de las minas.

A pesar de la menor producción nominal de cobre fino en Chile, el año 2016 se registraron 1,06 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de cobre fino producido, 4,9% más que lo cuantificado en 2015. Esto se debe a los mayores requerimientos de diésel en el proceso de mina rajo, debido a las mayores distancias de acarreo y a la menor ley de mineral promedio registradas para el periodo en evaluación (Cochilco 2017).

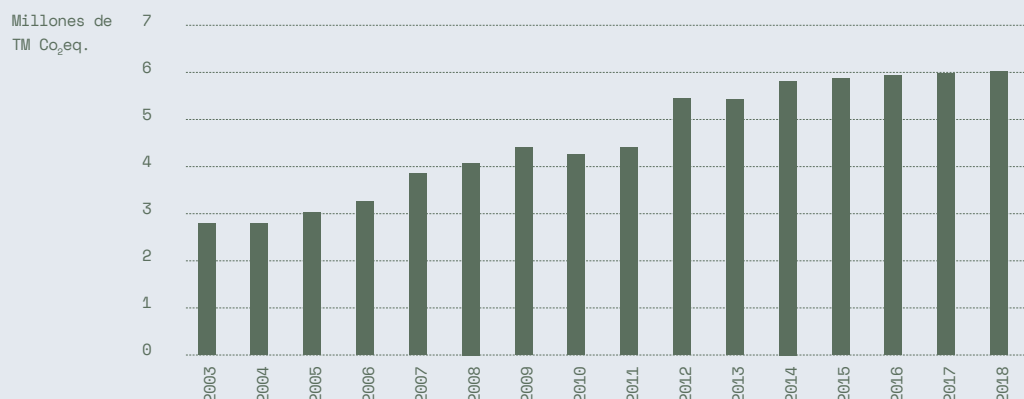
Gráfico 9_ Emisiones de GEI directos por tonelada de cobre fino, 2001 - 2017



Fuente: Cochilco (2018)

¹⁶ Cantidad de emisiones directas de GEI por cada tonelada de cobre fino.

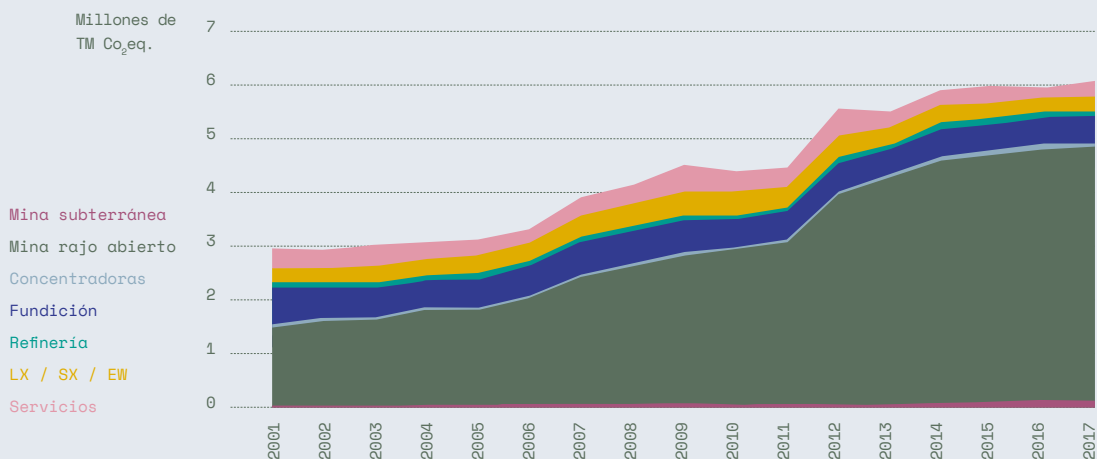
Gráfico 10_ Emisiones directas de GEI en la industria minera



Fuente: Cochilco (2018)

En el siguiente gráfico se presenta el consumo agregado de energía en base a combustibles por proceso minero entre los años 2001 y 2017.

Gráfico 11_ Emisiones de GEI directos de la minería del cobre por proceso, 2001 - 2017



Fuente: Cochilco (2018)

En el proceso de extracción de mina rajo, que representó el 77,6% de las emisiones GEI directas (Alcance 1), el combustible más utilizado en este proceso es el diésel, principal insumo de los camiones de transporte de mineral, responsable de un 88.2% de las emisiones del sector. Esta tendencia debiese mantenerse o incluso ir en aumento de no incorporarse medidas como la sustitución del diésel como insumo primario o mejoras tecnológicas.

Acerca de los residuos

El año 2016, en Chile se generaron cerca de 21,2 millones de toneladas de residuos. El 97% corresponde a residuos no peligrosos y el 3% a residuos peligrosos. Los primeros abarcan residuos de origen industrial (59,8%), sólidos municipales (35,3%) y lodos provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (1,9%).

Acerca de los residuos no peligrosos generados, el 76% fue eliminado y el 24% es valorizado. Los residuos son eliminados principalmente en rellenos sanitarios y vertederos. Si bien los rellenos sanitarios son instalaciones que cumplen las exigencias sanitarias y ambientales establecidas, esto no es suficiente desde el punto de vista ambiental, pues se debe evitar la disposición final de residuos en vertederos y basurales. También se hace necesario disminuir la cantidad de rellenos sanitarios, y para ello es clave el reciclaje.

Por otra parte, la generación de residuos peligrosos a nivel país es de 642 mil toneladas. Como generador principal destaca el sector de explotación de minas y canteras, que registra un total de 293,6 mil toneladas, lo que representa el 45,7% del total generado en el país¹⁷. Esto da cuenta de la relevancia de la inclusión de tecnologías en esta área para minimizar los volúmenes y reducir riesgos. Dado que la disposición de residuos peligrosos en el país posee un costo considerable por tonelada asociado a la disposición de estos residuos en rellenos de características especiales, la incorporación de tecnologías para su manejo posee una escala de recuperación de costos acotada en el tiempo, lo que da una oportunidad de negocios innovadores con retornos en tiempos determinados y costos alternativos conocidos.

Actualmente, al amparo de la Hoja de Ruta de Alta Ley se encuentran en ejecución dos iniciativas para el reemplazo de combustibles en camiones mineros de extracción y equipos móviles. Uno liderado por ALSET Ingeniería SpA, correspondiente a combustión dual hidrógeno-diesel en camiones y el otro en desarrollo por la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), que contempla la adaptación de la operación de equipos móviles mineros de diésel a hidrógeno mediante celdas de combustibles.

El proyecto de ALSET considera la adaptación de los camiones mineros de extracción para que puedan utilizar como combustible petróleo, diesel e hidrógeno, privilegiando el uso del segundo a través de un cambio en los motores actuales. Para tal efecto, la iniciativa contempla un prototipo, que está en desarrollo, mediante el cual se puedan efectuar pruebas cuyos resultados sean escalables a nivel industrial. En este desarrollo participan la Universidad de Santiago, la Pontificia Universidad Católica, NTT, CAP, BHP, Anglo American Sur y Engie.

Esta iniciativa contempla la simulación de parámetros para prueba de banco, el dimensionamiento y disposición del sistema de almacenamiento de hidrógeno y el desarrollo de un modelo de negocio para la provisión de combustible.

Por otra parte, el proyecto de electromovilidad mediante celdas de combustible desarrollado por la UTFSM, está enfocado en el desarrollo de soluciones que logren viabilizar de manera técnica y operativa la adaptación de vehículos de transporte utilizados en minería, desde su actual condición de operación mediante el uso de combustible diésel, hacia una operación mediante celdas de combustibles.

¹⁷ Sinader y Sidrep, 2018 MMA

El consorcio liderado por la UTFSM, considera la participación del CNH2 de España, Ballard Power Systems de Canadá, ACHEE, Linde, Aurus, Acera, Sonami, Metalpar, Bozzo Energy, Siemens, Collahuasi y Codelco, como interesados.

Las soluciones para este desafío se presentan en la siguiente tabla.

Reducción de emisiones gaseosas, líquidas y sólidas

Solución	Líneas I+D+i
01 Reducción de emisiones gaseosas a la atmósfera, particularmente la disminución de azufre, arsénico y CO2 (FURE)	Desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías para el manejo de emisiones gaseosas en minería subterránea. Estrategias de captura de CO2 de áreas silvestres protegidas y mejora de los métodos de restauración de bosques existentes y reforestación. Optimización de transporte de materiales. Optimización de los procesos de captación y tratamiento de los gases generados. Mejoras tecnológicas que permitan hacer un uso más eficiente de las plantas de limpieza de gases.
02 Reducción/tratamiento de emisiones residuos industriales líquidos (RILES) y residuos peligrosos (RESPEL)	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para remover diferentes tipos de contaminantes en aguas de los procesos productivos mineros, así como su reutilización desde las aguas provenientes de residuos. Desarrollo de procesos biotecnológicos para el tratamiento de desechos mineros y efluentes. Generación de mecanismos de reutilización de los desechos industriales líquidos dentro de la faena minera. Mejoras tecnológicas para el lavado de gases (lechadas) y soluciones ácidas.

Desarrollo de nuevas tecnologías para el abatimiento de metales pesados, remover sólidos o efectuar ajustes de pH o para tratar ciertas sales disueltas que son altamente solubles, como el sulfato, el cloruro y el sodio.

Mejoras tecnológicas para controlar y monitorear procesos con técnicas de filtración, flotación por aire inducido y tratamiento con prensas.

Producción de nanopartículas sintéticas que sean capaces de absorber y capturar metales en un ambiente contaminado.

02 Reducción / Tratamiento de residuos sólidos industriales (RISES)

Desarrollo y transferencia de tecnologías para la reutilización, reciclaje, valorización energética, tratamiento y disposición final, con el objetivo de proteger al medio ambiente.

Desarrollo de tecnologías de mejor disposición y eliminación de residuos sólidos.

Desarrollo de tecnologías de inertización para el tratamiento de los residuos que permitan disminuir la peligrosidad y volumen de estos.

Optimización o generación de software para registro de la trazabilidad de los residuos, desde que se generan hasta su disposición final.

Generación de técnicas de caracterización de orígenes de los residuos, su nivel de peligrosidad, el tratamiento que se debe aplicar y las medidas de prevención contra emergencias.

Mejoramiento de los procesos de estabilización-solidificación de residuos sólidos con agentes químicos.

Desafío

04

Seguridad e higiene ambiental

La minería es una de las actividades industriales más riesgosas, considerando que se trabaja con elementos explosivos, inflamables y tóxicos, además de equipos de gran tamaño tanto móviles como estacionarios.

El ritmo de producción en la actividad minera expone a los trabajadores constantemente a agentes contaminante de tipo físico - químico, como lo son los ruidos, material particulado, neblinas ácidas, calores excesivos, gases, entre otros.

Según informa el Sernageomin, en 2015 y 2016 se registraron 16 y 18 fallecidos respectivamente, mientras que en 2017 la cifra llegó a 12, lo que representa una disminución del 23% de este tipo de accidente. El 2017 corresponde al año de menor accidentabilidad con consecuencias fatales en la historia minera del país. Asimismo, el porcentaje de accidentabilidad de carácter grave muestra una disminución del 9.6% con respecto al 2016. Sin embargo, se debe continuar trabajando en este tema para alcanzar la meta de cero fatalidad.

Las soluciones para este desafío se presentan en la siguiente tabla.

Seguridad e higiene ambiental

Solución	Líneas I+D+i
01 Reducción de exposición a riesgos críticos	Sustitución de los productos de alta toxicidad. Sofisticación en equipos de protección personal. Mecanismos de humectación en zonas de riesgo. Optimizar procesos productivos o cambiar los métodos de operación para disminuir/eliminar el riesgo.
02 Disminución de enfermedades profesionales	Desarrollo de implementación de infraestructura y elementos adecuados para el trabajo tanto en oficina como en terreno. Desarrollo de medios mecánicos adecuados para el levantamiento de cargas pesadas.

Solución

Líneas I+D+i

03 Reducción de exposición a gases de espacios confinados

Desarrollo de mecanismos de ventilación general y local.

Optimizar medidas de dilución y evacuación de agentes contaminantes.

04 Mejoramiento de las condiciones para el trabajo en altura geográfica

Mejoramiento de infraestructura para reducción de riesgos de caída.

Dotación de equipos de protección personal especiales.

Fuente: Elaboración propia

Desafío

05

Economía Circular (Minería Circular)

La Minería circular con foco en la recuperación de elementos de valor ofrece una serie de ventajas, la mayoría relacionadas con el valor añadido en términos económicos y productivos, su rentabilidad y el aporte medioambiental que genera la recuperación de residuos. En este sentido se debe avanzar tanto en la conversión y reprocesamiento de los depósitos de relaves, botaderos, escorias, lastres y soluciones de descarte, para obtener beneficios económicos a partir de la recuperación y reciclaje de materiales en la minería, como el reciclaje de neumáticos de camiones mineros. Aún cuando la recuperación de elementos de valor comercial constituye una contribución al respecto, no soluciona el problema por completo. Se requiere buscar usos alternativos para los materiales de menor valor comercial que involucren una mayor proporción del residuo.

También debe darse prioridad a la recuperación de elementos de valor que puedan ser empleados en los propios procesos mineros, ya sea como un insumo o como fuente de energía.

La adecuada gestión de los residuos ambientales beneficiaría directamente a las comunidades y contribuiría a la sostenibilidad futura de la industria minera.

Las soluciones para este desafío se presentan en la siguiente tabla.

Economía Circular (Minería Circular)	
Solución	Líneas I+D+i
01 Recuperación de elementos de valor	Perfeccionamiento y desarrollo de métodos y modelamientos geológicos y de manejo de nuevos residuos sólidos de valor comercial. Incorporación de tecnologías en los procesos de concentración y refinación. Modelos de operación con criterios técnicos y regulatorios para el desarrollo de minería urbana.

02 Responsabilidad extendida del productor	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de baterías. Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de neumáticos mineros. Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de aceites. Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de aparatos eléctricos. Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de elementos de valor de relaves. Desarrollo de alternativas superiores y costo eficientes a las actuales operaciones de almacenamiento de relaves húmedos. Desarrollo de materialidades y productos a partir de relaves.
--	---

Fuente: Elaboración propia

08 núcleo usos del cobre

El capítulo núcleo usos del cobre fue desarrollado en base al trabajo realizado por Marcela Angulo, José Araneda, María José Araneda, Francisco Awad, Jorge Bravo, Graciela Budinich, Julien Colas, María Eugenia Fernández, Rossana Gaete, Carlos Gajardo, Andreina García, Fernando Hentzschel, Gustavo Lagos, Koen Langie, Rodrigo Mancilla, Romela Marín, Isabel Marshall, René Martínez, Verónica Martínez, Macarena Montané, Ignacio Moreno, Hector Painevilo, Grecia Perez de Arce, Sebastián Pérez, Víctor Pérez, Sebastián Pilasi, Iván Piñeyro, Germán Quezada, Juan Rivadeneira, Ana María Ruz, Iván Valenzuela y Alejandra Wood.



Antecedentes

El cobre fue uno de los primeros metales extraídos y utilizados por el hombre, usándose por primera vez en monedas y ornamentos alrededor del año 8.000 a.c. Alrededor del año 5.500 a.c. se utilizó en herramientas que ayudaron a la civilización a emerger de la Edad de Piedra, y posteriormente, aproximadamente 3.000 años a.c., se descubrió que el cobre aleado con estaño produce bronce, lo que señaló el comienzo de una nueva Edad para la humanidad.

El cobre se estira, se moldea y se forma fácilmente, es resistente a la corrosión y conduce el calor y la electricidad de manera eficiente. Como resultado, el cobre fue importante para los primeros humanos y continúa siendo hoy el material preferido para una variedad de aplicaciones domésticas, industriales y de alta tecnología.

En la actualidad el cobre es un componente clave en muchas tecnologías habilitantes vinculadas a la reducción de emisiones, la electromovilidad, la evolución de las ciudades inteligentes, el desarrollo e integración a la red de la energía solar y la aparición de nuevos sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado que utilizan refrigerantes naturales y redes inteligentes, por nombrar sólo algunas. Por otra parte, el impacto positivo de sus capacidades bactericidas ha gatillado su utilización con fines vinculados a la salud e higiene, la extensión de la vida útil de los alimentos, la sanitización de superficies, y su uso en prendas de vestir.

El cobre es hoy protagonista para mejorar la eficiencia energética, la calidad del aire, la calidad del agua, la reducción de los costos del ciclo de vida y la calidad de vida de miles de millones de personas en todo el mundo.

Consumo de cobre

Las cualidades del cobre que lo han convertido en el material elegido para una variedad de aplicaciones domésticas, industriales y de alta tecnología han dado como resultado un aumento constante del consumo mundial de este metal. Los estudios del USGS sobre el consumo de cobre muestran algunas tendencias interesantes durante el período de 1990 a 2012. El consumo de cobre en las economías emergentes, como China e India, aumentó considerablemente, mientras que la tasa de consumo en los Estados Unidos disminuyó ligeramente. Hasta 2002, Estados Unidos era el principal consumidor de cobre y utilizaba anualmente alrededor del 16% del cobre refinado mundial total (alrededor de 2,4 millones de toneladas). En 2002, Estados Unidos fue superado por China como el principal consumidor mundial de cobre refinado. La floreciente economía china contribuyó a la cuadruplicación de su consumo anual de cobre refinado durante esos 12 años.

Según información recopilada por Cochilco¹, los países con mayor participación en el consumo de cobre refinado en 2018 fueron China, Estado Unidos, Alemania, Japón, Corea del Sur, Italia, India, Turquía, México, Taiwán, España, Tailandia y Rusia. El gráfico siguiente permite comparar el consumo de cobre refinado en el año 2009 y 2018, donde se aprecia el gran crecimiento de China casi duplicando su consumo.

¹ Corporación Chilena del Cobre www.cochilco.cl

Gráfico 1_ Principales países consumidores de cobre refinado 2009-2018



Fuente: World Metal Statistics (2019)

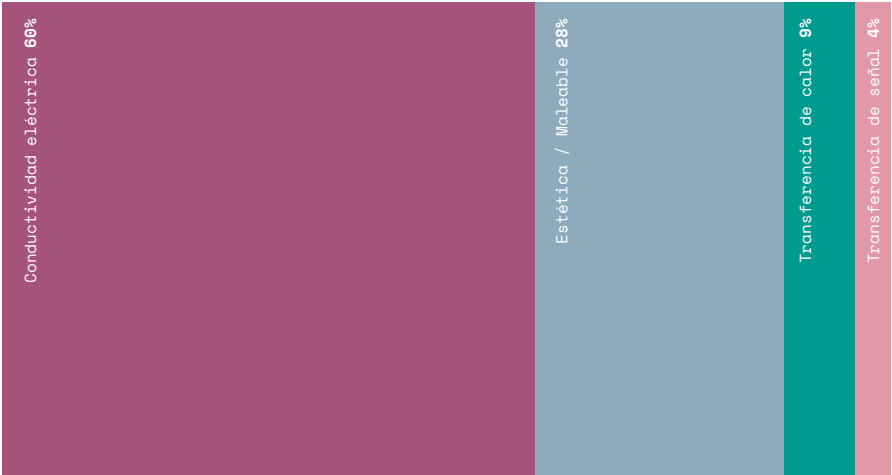
El consumo de cobre a nivel mundial según el mercado en el cual se utiliza contempla fundamentalmente construcción, consumo general, red eléctrica, transporte y maquinaria industrial. Su uso está además condicionado por sus propiedades físicas, químicas y mecánicas donde destacan su buena conductividad eléctrica y térmica, la facilidad de unirlo, su resistencia a la corrosión, su maleabilidad y ductilidad, la facilidad de aliarlo con otros metales, su cualidad de reciclable, sus propiedades decorativas y antimicrobianas, su calidad de metal no magnético, entre otras.

Gráfico 2_ Usos del cobre a nivel global en 2018

Uso por sector del mercado



Uso por propiedad



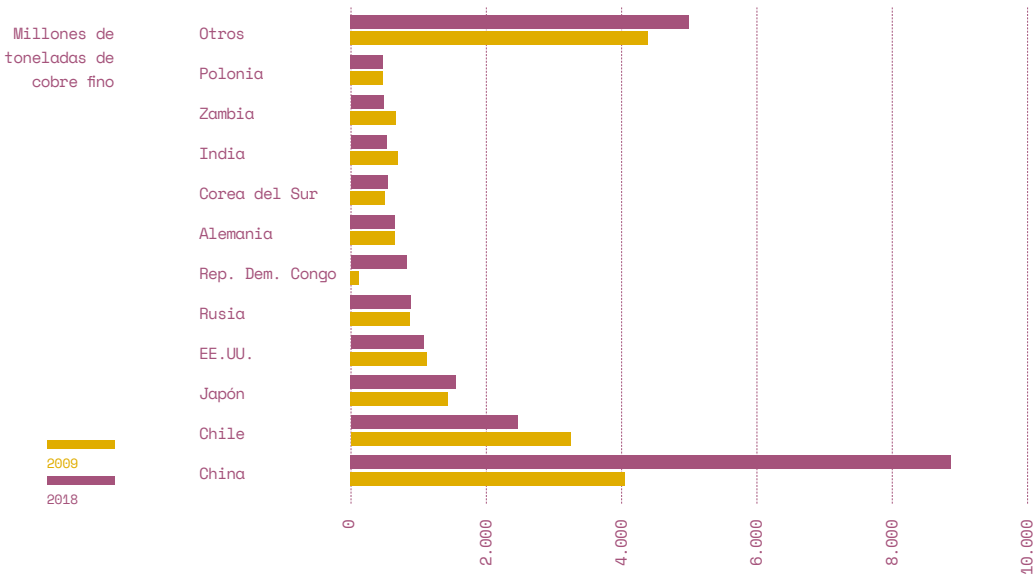
Fuente: Cochilco (2018)

Producción y evaluación global de los depósitos de cobre

El USGS² evaluó el cobre no descubierto en dos tipos de depósitos que representan alrededor del 80% del suministro mundial de cobre. Los depósitos de pórfidos de cobre representan alrededor del 60% del cobre del mundo y los depósitos de cobre estratificado alojados en sedimentos, en los que el metal se concentra en capas en rocas sedimentarias, representan alrededor del 20% de los recursos de cobre identificados en el mundo. El recurso total medio no descubierto para los depósitos de pórfido es de 3.100 millones de toneladas, y el recurso medio total no descubierto para los depósitos alojados en sedimentos es de 400 millones de toneladas, para un total global de 3.500 millones de toneladas de cobre. La producción de cobre refinado a nivel global aumentó alrededor de un 1,44% en 2018 respecto de 2017, totalizando 23,73 millones de toneladas. En Chile, la producción aumentó un 1,3% respecto de 2017.

El gráfico muestra los principales productores de cobre refinado donde destaca el incremento de China del año 2009 al 2018.

Gráfico 3_ Producción de cobre refinado 2009-2018



Fuente: Cochilco (2018)

2 United States Geological Survey <https://www.usgs.gov>

Usos del cobre en la actualidad

El cobre se utiliza en las más diversas áreas e industrias: desde la construcción de edificios, hasta la generación y transmisión de energía, la fabricación de productos electrónicos y la producción de maquinaria industrial y vehículos de transporte. El cableado y las tuberías de cobre son parte integral de los aparatos, los sistemas de calefacción y refrigeración, y los enlaces de telecomunicaciones que se utilizan a diario en los hogares y las empresas. El cobre es un componente esencial de los motores, el cableado, los radiadores, los conectores, los frenos y los cojinetes utilizados en automóviles y camiones. Un automóvil promedio contiene 1,5 kilómetros de cable de cobre, y la cantidad total de cobre varía desde 20 kilos en autos pequeños hasta 45 kilos en vehículos de lujo e híbridos. Según un estudio encargado por la ICA (*International Copper Association*) a IDTechEX en 2017³, un vehículo eléctrico puede utilizar entre 40 y 369 kilogramos de cobre dependiendo del tipo de tecnología y de vehículo.

Una de las aplicaciones más recientes del cobre incluye su uso en superficies que se tocan con frecuencia, en las que sus propiedades antimicrobianas reducen la transferencia de gérmenes y enfermedades. Los fabricantes de semiconductores también han comenzado a usar cobre para circuitos en chips de silicio, lo que permite que los microprocesadores operen más rápido y consuman menos energía. Recientemente se descubrió que los rotores de cobre aumentan la eficiencia de los motores eléctricos, que son los principales consumidores de energía.

Por otra parte, el cobre y sus aleaciones poseen una amplia gama de propiedades que los hacen invaluable para muchas aplicaciones. La buena conductividad de la electricidad y el calor se combina con la resistencia, la ductilidad y la excelente resistencia a la corrosión, por mencionar solo algunas de las propiedades que ofrecen el cobre y sus aleaciones.

La siguiente tabla enumera algunas de las razones por las que el cobre y las aleaciones de cobre son vitales para los principales tipos de aplicaciones que se benefician de las combinaciones de los atributos descritos.

³ Copper Intensity in the Electrification of Transport and the Integration of Energy Storage. IDTechEX, 2017

Tabla 1_ Tipo de aplicación/industria según propiedad

Propiedad	Industria / Tipo de aplicación
Estética	Arquitectura, escultura, joyería, relojes, cubiertos
Bactericida	Herrajes de puertas, tratamientos de cultivos, prendas de vestir, superficies
Resistencia a la bioincrustación	Industria en general, hidráulica y marina, metalmecánica, aeroespacial, generación de energía, construcción naval, plataformas petrolíferas y de gas en alta mar
Resistencia a la corrosión	Tubos y accesorios de fontanería, techos, ingeniería general y marina, construcción naval; ingeniería química, procesos industriales que incluyen decapado, grabado y destilación; plomería doméstica, arquitectura, desalinización, textiles, fabricación de papel
Facilidad de fabricación	Todo lo anterior más impresión
Conductividad eléctrica	Generación de energía eléctrica, transmisión y distribución, comunicaciones, soldadura por resistencia, electrónica
Respetuoso del medio ambiente	Esencial para la salud de humanos, animales y cultivos
Fungicida	Agricultura, conservación de alimentos y madera
Baja temperatura	Criogenia, manejo de gases líquidos, superconductores
Mecánico fuerza /Ductilidad	Industria en general, marina, defensa, aeroespacial

Propiedad	Industria / Tipo de aplicación
No magnético	Instrumentación, equipos de estudio geológico, dragaminas, perforación costa afuera
Sin chispas	Minería y otras herramientas de seguridad, distribución de oxígeno
Elasticidad	Muelles y contactos eléctricos, pasadores de seguridad, fuelles de instrumentos, empaques electrónicos
Conductividad térmica	Intercambiadores de calor y equipos de aire acondicionado/refrigeración, radiadores automotrices, motores de combustión interna, minería



Desafíos, soluciones y líneas de I+D+i

Si bien no es el foco de las compañías mineras avanzar en la cadena de valor del cobre en términos de productos y nuevos usos, las posibilidades de integrar algunos de los productos en la cadena de producción, abre una alternativa interesante al copper foil, el que podría ser producido a partir de las instalaciones existentes en varias operaciones mineras.

No obstante, se presentan los desafíos globales que serían de interés abordar a través de organismos y entidades dedicadas exclusivamente al crecimiento del mercado del cobre. Gran parte de éstos desafíos están siendo abordados por la International Copper Association (ICA) responsable del desarrollo y la implementación de programas en todo el mundo para defender y aumentar la demanda de cobre a través de nuevas aplicaciones. A la fecha existen más de 500 programas en ejecución en 60 países y 26 centros de promoción del cobre.

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el Núcleo Usos del Cobre, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos priorizó 3 desafíos identificando posibles soluciones y líneas de I+D+i.

Desafío

01

Producto de cobre con mayor valor agregado

Chile es el mayor productor de cobre a nivel mundial, y el metal rojo constituye en la actualidad nuestra principal materia de exportación, sin embargo, se comercializa principalmente como materia prima, desperdiciando aún la oportunidad de diversificar y sofisticar nuestras exportaciones por medio de la inyección de un valor agregado a este producto.

Copper foil (Desarrollo de capacidades de manufactura local)

El mercado global de *copper foil* (hoja muy delgada compuesta por metales maleables, comúnmente de aluminio, estaño y cobre utilizada como conductor eléctrico, térmico y en diferentes aleaciones) tiene grandes actores dominantes, pero es altamente competitivo, representando en 2016 un 2.5% de la producción global de cobre, llegando a un total aproximado de 486 mil toneladas con una tasa de crecimiento anual de un 8% proyectada entre 2018 y 2025 (*Transparency Market Research 2017*).

Las dos aplicaciones más relevantes que se vislumbran en la actualidad para *foils* de cobre son las placas de circuitos impresos (PCB o *Printed Circuit Board*) y baterías de litio (Li-ion), donde si bien las PCB concentran hoy un mayor uso, se espera que su aplicación en baterías desarrolle una tasa de crecimiento mayor impulsado por la mayor penetración de tecnologías más eficientes y ambientalmente amigables, y en particular por la electromovilidad.

Los mayores desafíos de I+D+i para *copper foil* están principalmente en la introducción de mejoras en su producción y calidad, lo cual representa para Chile una oportunidad de generación de capacidades de manufactura local incluyendo nanotecnología.

Producto de cobre con mayor valor agregado

Solución

01 Productos de cobre con mayor valor agregado

Líneas I+D+i

Manufactura de *copper foil*.

Fuente: Elaboración propia

Desafío 02

I+D Industrias tradicionales

Una gran parte del suministro mundial de cobre fluye hacia la electrónica y el cableado eléctrico. La electricidad es un componente inseparable de la vida cotidiana en el mundo moderno, desde computadoras y teléfonos inteligentes hasta aire acondicionado y baterías, y el cobre sigue siendo el metal preferido para la conducción de corrientes eléctricas. Debido a esto, casi todas las tecnologías que poseemos tienen al menos algo de cobre.

El cobre es además uno de los principales metales en la carrera por encontrar fuentes sostenibles de energía. Como un administrador eficiente del calor y la electricidad, las propiedades únicas del cobre se utilizan con frecuencia en paneles solares y turbinas eólicas. Muchos edificios sostenibles certificados por LEED utilizan una cantidad significativa de cobre. Además, dado que el cobre es 100% reciclable, es considerado como el último metal “verde”.

Energía (Energías renovables no convencionales / Electromovilidad / Calefacción, ventilación y aire acondicionado)

Dado que el cobre es un conductor altamente eficiente, se utiliza en sistemas de energía renovable para generar energía solar, hidroeléctrica, térmica y eólica en todo el mundo, ayudando a reducir las emisiones de CO₂ y la cantidad de energía necesaria para producir electricidad. Las fuentes de energía renovables proporcionan casi una cuarta parte de la energía mundial y esto va en aumento⁴. El cobre juega un papel importante para que un aparato sea lo más eficiente posible con un impacto mínimo en el medio ambiente. Se espera un incremento importante además por su mayor uso en vehículos eléctricos y en sistemas de refrigeración.

Algunas de las tendencias mundiales que impactarán positivamente el uso de cobre en energía son:

- / Mayor consumo de energía, con énfasis en una generación eficiente y más limpia.
- / Aumento en la demanda y exigencia de mayor rapidez en las tecnologías de la información.
- / Necesidades crecientes de transporte masivo, eficiente y ambientalmente limpio.
- / Mejoras en la calidad de vida respecto de la construcción, bienestar y seguridad, lo que supone consideraciones de eficiencia energética y de uso de materiales sustentables.
- / Los mayores desafíos de I+D+i para el uso de cobre en energía están su potencial de reemplazo de otros elementos, los beneficios obtenidos a partir del uso de nanopartículas, y el mejor aprovechamiento de sus capacidades térmicas y conductivas, ya sea solo o en combinación con otros elementos tanto para electromovilidad así como para refrigeración y transmisión eléctrica.

⁴ Copper Alliance 2018. www.copperalliance.org

Producto de cobre con mayor valor agregado

Solución

01 Intensidad de uso en industrias tradicionales

Líneas I+D+i

- Aplicaciones en ERNC.
- Electromovilidad.
- Calefacción y ventilación.
- Aire acondicionado.

Fuente: Elaboración propia

Desafío

03

I+D Industrias no tradicionales

En 2008, la *Environmental Protection Agency* (EPA) de Estados Unidos reconoció al cobre como el único metal con propiedades antimicrobianas, al aprobar el registro de más de 270 aleaciones del metal capaces de impedir la vida de bacterias y otros microorganismos, como hongos y virus.

Antes de eso, una serie de estudios demostraron el efecto del cobre y sus aleaciones contra cinco cepas de bacterias probadas de acuerdo con los protocolos de la EPA: el cobre es el primer metal en el que se ha reconocido tal estado. El registro permite la comercialización con el argumento de que el cobre “elimina el 99,9% de las bacterias dentro de dos horas”. Su uso fue autorizado para la fabricación de productos para ambientes comerciales, residenciales y de salud. La agencia aclara que las aleaciones de cobre deben utilizarse como complemento y no para la sustitución de las prácticas estándar de limpieza y desinfección de las superficies. Añade que estos productos no representan ningún riesgo para la salud pública.

Este nuevo uso asociado a su capacidad bactericida demuestra que a pesar de la antigüedad de su descubrimiento y utilización, el cobre tiene sus propiedades aún poco exploradas y sus aplicaciones están lejos de ser agotadas.

Solución: Salud e higiene (aplicaciones y usos asociadas a sus propiedades bactericidas)

La demanda de cobre a nivel mundial podría ver un aumento importante durante los próximos años debido al interés comercial en el aprovechamiento de sus propiedades antimicrobianas aplicadas en diferentes industrias, tanto en el desarrollo de películas protectoras, telas y materiales entre otros. Solo por su uso en aplicaciones relacionadas con la salud, la demanda podría incrementarse hasta en un millón de toneladas para los próximos 20 años (Bloomberg 2018).

Algunos de los desafíos de I+D+i en este sentido tienen relación con los métodos de producción y procesamiento de cobre para la generación de nanopartículas y/o aleaciones, la manufactura de los mismos y nanotecnología aplicada, entre otros.

I+D Industrias no tradicionales

Solución

01 Intensidad de uso en industrias no tradicionales

Líneas I+D+i

Aplicaciones en salud e higiene.

Fuente: Elaboración propia



