



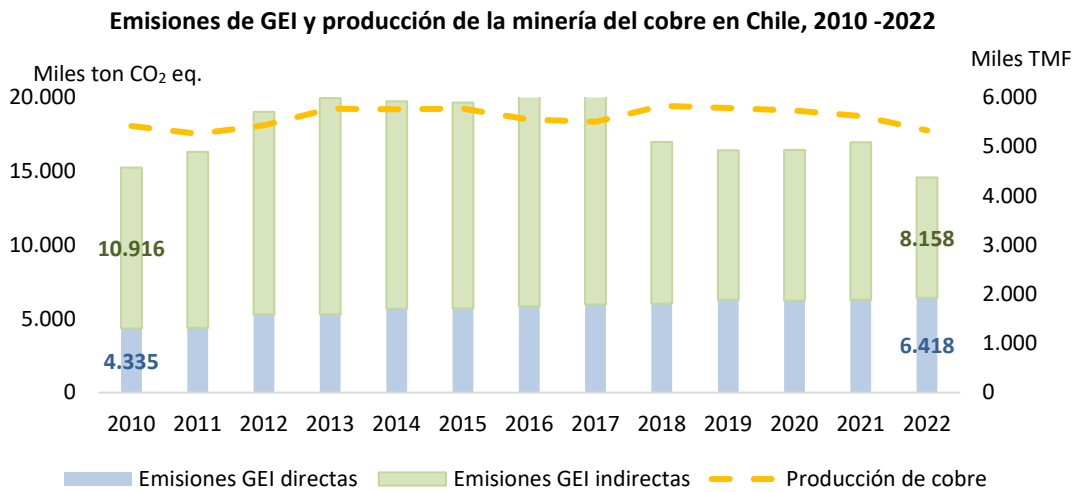
Emisiones GEI en la minería del cobre al 2022 y análisis del contexto actual

DEPP 18 /2023

Resumen Ejecutivo

Durante el año 2022 se registraron emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por un total de 14576 KtCO₂ eq. distribuidas en 6.418 mil por GEI directos (44% del total de emisiones de la minería del cobre) y 8.158 mil por GEI indirectos (56% del total).

Estas emisiones totales GEI del 2022 son las menores registradas desde el 2010, aún cuando en el período analizado, hubo un mayor consumo de energía (tanto de combustibles como de electricidad) debido a causas estructurales en la matriz productiva minera destacando el envejecimiento de las minas, lo que a su vez conlleva mayores distancia de acarreo, mayor dureza de la roca, menores leyes del mineral y mayor uso de agua de mar. Es así como en el contexto de una producción de cobre que retrocedió 2% (un 32% menor producción de cátodos SX-EW y un 18% mayor producción de concentrados), las emisiones GEI disminuyeron un 4% (25% menos de emisiones indirectas y un aumento del 48% en emisiones directas) en período analizado.



Fuente: Cochilco

Asimismo, al 2022, las emisiones totales fueron un 29% menor a las registradas durante 2017 y un 14% menor que en 2020. La evidente y marcada baja de emisiones respecto al 2017 se atribuye principalmente a la caída en un 44% en las emisiones indirectas, lo que a su vez se explica por la baja importante en el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 2022 de 0,3006 tCO₂ eq/MWh que es un 11% menor que el factor de emisión del SIC y un 61% menor que el factor de emisión del SING en el 2017, siendo este último sistema el que se suministraba la mayor parte de la minería del cobre hasta el 2017.

En cuanto a los procesos, el de mayores emisiones totales durante 2022 fue el de mina rajo con 5.528 mil toneladas de CO₂ eq., que representa el 38% del total de la minería del cobre (un 93% de las emisiones de este proceso son directas por el uso intensivo de diésel). El segundo proceso con mayor emisión total de GEI en el 2022 es el de concentración, con 4.402 mil ton de CO₂ eq., lo que representa un 30% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 97% proviene de emisiones indirectas por el uso intensivo de electricidad).

A nivel regional, Antofagasta es la región con mayor nivel de emisiones por minería del cobre, con 8.586 mil toneladas de CO₂ eq., que representan el 59% del total de emisiones de la minería del cobre durante el año 2022 (un 46% proviene de emisiones directas y un 54% de las indirectas).

Se podría decir que la minería del cobre tiene un doble rol dentro de la transición energética. Por un lado, al ser un importante cliente energético (33% del consumo eléctrico nacional el 2022) ha ayudado a impulsar el uso de energías renovables en el país al integrar estas en su suministro eléctrico (aprox. 65.339 TJ en 2022), representando el 67% de demanda eléctrica minera proviene de energías limpias, lo que se traduce en una reducción de emisiones GEI del sector de 5.466 KtCO₂ eq. en 2022. Asimismo, el cobre es una materia prima que es componente importante en el funcionamiento de tecnologías limpias como la fotovoltaica, eólica, electromovilidad por mencionar algunas. Por tanto el suministro de cobre se vuelve clave y estratégico para lograr una transición energética en Chile y el mundo.

Ya un gran número de mineras del cobre se han comprometido públicamente en reducir sus emisiones GEI en la próxima década aportando y estando alineados con los esfuerzos del país para lograr la carbono neutralidad al 2050, siendo así pioneros en establecer este tipo de metas. Mayormente estas metas se basan en las reducciones de emisiones indirectas o de alcance 2.

Si bien las necesidades energéticas del sector minero del cobre y sus emisiones GEI han ido aumentando y se espera aumenten en el tiempo por temas estructurales que enfrenta la minería, cabe señalar que en relación a las emisiones indirectas o de alcance 2, se espera vayan reduciéndose a niveles cercanos a cero en un futuro basado también que la electricidad requerida por el sector minero del cobre provenga de fuentes renovables en un futuro.

En términos de reducir emisiones directas o de alcance 1 hay diversas iniciativas en desarrollo que ambicionan reemplazar el uso de combustibles fósiles como el diésel en procesos mineros, ya sea por combustibles con menores o sin emisiones GEI, o bien electrificando procesos. Entre estas iniciativas están el uso de hidrógeno verde en transporte de carga y la electromovilidad por mencionar las principales. Una reducción importante de emisiones alcance 1 se visualizan si más al largo plazo puesto estas iniciativas están aún en etapa de desarrollo, antes de poder ser validadas, extrapolarla, poder incorporarla y escalarla a otros procesos.

Si bien la integración de energías renovables es muy positivo para un desarrollo sustentable del sector minero, este suministro creciente con fuentes limpias debe complementarse con un mejoramiento continuo de la eficiencia energética y la minería ha realizado esfuerzos y logrado avances en la materia.

Es así como se visualiza a la industria minera del cobre, como actor clave en fomentar la incorporación de energías renovables sin emisiones en la matriz energética; que ha mostrado acciones concretas de estar comprometido con la reducción de emisiones GEI; y que ha ido incorporando además la eficiencia energética. Estos componentes, tanto la reducción de emisiones como la eficiencia energética, son claves en lograr una transición energética. Asimismo, se concibe a la producción de cobre refinado como parte importante de la solución frente al desafío global del cambio climático.

Tabla de contenidos

Resumen Ejecutivo	2
1. Introducción	5
2. Metodología	6
2.1. Metodología de cálculo de GEI Directos.....	6
2.2. Metodología de cálculo de GEI Indirectas	8
3. Emisión de GEI Directos en la Minería del Cobre en Chile	9
3.1. Emisión Total de GEI Directos en la minería del cobre en Chile.....	9
3.2. Emisión de GEI Directos por Tipo de Combustible	10
3.3. Emisión de GEI Directos por Proceso en la minería del cobre en Chile.....	12
3.4. Emisión de GEI Directos por Región en la minería del cobre en Chile	15
3.5. Coeficientes Unitarios de emisión de GEI directos en la minería del cobre en Chile.....	16
4. Emisión de GEI Indirectos en la Minería del Cobre en Chile	18
4.1. Sistema Eléctrico Nacional.....	18
4.2. Emisión Total de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile	19
4.3. Emisión de GEI Indirectos por proceso en la minería del cobre en Chile.....	21
4.4. Emisión de GEI Indirectos por Región en la minería del cobre.....	23
4.5. Coeficiente Unitario de emisión de GEI indirectos en la minería del cobre en Chile.....	24
5. Emisión de GEI Totales en la minería del cobre en Chile	25
6. Emisiones GEI minería del cobre en el contexto emisiones país	28
7. Camino hacia la transición energética en Chile.....	30
7.1. Política energética, una política de Estado.....	30
7.2. Cambio Climático, hoy una pionera política de Estado	31
7.3. La transición energética.....	32
7.4. Desafíos país en la transición energética.....	32
7.5. Política nacional minera 2050.....	33
7.6. Minería Verde	34
8. Rol de la minería del cobre en la transición energética	35
8.1. Acciones para la mitigación del cambio climático	36
8.1.1. Metas de carbono neutralidad	36
8.1.2. Integración de Energías Renovables	38
8.1.3. Reducción de emisiones alcance 2	40
8.1.4. Progresiva implementación de la eficiencia energética	41
8.1.5. Otras iniciativas.....	42
8.2. Cobre como materia prima en la transición energética	44
9. Comentarios Finales	46

1. Introducción

El Acuerdo de París firmado por Chile el 20 de septiembre de 2016 y ratificado el 10 de febrero de 2017, es la confirmación fehaciente del compromiso chileno en materia de mitigación y adaptación al desafío del calentamiento global. A través de este, los países firmantes se comprometen entre otras cosas a aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del calentamiento global y promover la resiliencia a sus efectos y un desarrollo con bajas emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Precisamente, en pro del logro de este objetivo, es que se hace fundamental la medición precisa, permanente y estandarizada de los GEI que se emiten en cada país.

Así, en aras de lograr un menor nivel de emisiones de GEI, se hace necesario propender a una labor minera con menores niveles de contaminación, tarea para la cual una medición precisa, metodológicamente consistente y periódica, es fundamental. En esta línea, la Comisión Chilena del Cobre ha entregado desde el año 1991 información relevante para el desarrollo sustentable del sector minero chileno, mediante una línea de trabajo permanente conducente posteriormente a la cuantificación de las emisiones de GEI.

Para estos efectos, se consideró la información de empresas de la industria del cobre en Chile, reportada a través de la *Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE)* que cada año realiza Cochilco y que considera las áreas, etapas y procesos característicos para la producción de concentrados, cátodos, fundición y refinería. Considerando un total de 53 operaciones mineras, entre las que se encuentran gran y mediana minería, fundiciones y refinерías, en el año 2022 llegó al 99% de la producción de cobre nacional. Lo anterior corresponde a un porcentaje alto de cobertura con información proporcionada voluntariamente por las empresas mineras y que ha hecho posible transparentar y acercar a la ciudadanía la realidad de emisiones del sector y su real impacto e importancia en el país. Por ello es crucial que siga el compromiso del sector minero del cobre en responder esta encuesta, poniendo énfasis en la calidad de los datos entregados, para poder seguir con esta línea de trabajo manteniendo relativamente estable la muestra de análisis.

El trabajo a continuación se distribuye de la siguiente forma: En la sección 2 se presenta la metodología utilizada para realizar la cuantificación de los GEI de la minería, tanto para aquellos directos como indirectos. Luego en la sección 3 se presentan los principales resultados de la medición para las emisiones directas, analizando por tipo de combustible, proceso minero y región. En la sección 4 se presentan los resultados para las emisiones indirectas, también desagregando por proceso minero y región. Finalmente, en la sección 5 se entregan las emisiones totales de la minería del cobre y en la sección 6 están los comentarios finales del informe.

2. Metodología

La medición se realiza en base a los consumos energéticos reportados por las operaciones mineras del cobre en Chile, por medio de la Encuesta Minera Producción, Agua y Energía (EMPAE) que anualmente realiza Cochilco.

La energía es reportada en dos categorías, Combustibles y Energía Eléctrica, considerando en la primera principalmente todos aquellos insumos de origen fósil, como el Diésel, el Gas y el Enap 6. Estos son transformados a unidades energéticas en joules, las cuales son posteriormente convertidas en sus equivalentes en emisiones directas de gases de efecto invernadero. En relación a las emisiones indirectas, corresponden a aquellas generadas por las instalaciones que producen la energía eléctrica utilizada por los procesos de la minería del cobre, omitiendo completamente a aquellas emisiones indirectas que se generan como consecuencia de las actividades que ocurren en fuentes que no son controladas por la organización/empresa.

A continuación se presenta detalladamente la metodología utilizadas para la contabilización de las emisiones contenidas en el documento.

2.1. Metodología de cálculo de GEI Directos

El sistema incluye todos los procesos mineros, desde la extracción del mineral hasta la producción de los concentrados y cátodos de cobre, subdivididos en los siguientes procesos: mina rajo y subterránea, concentradora, proceso hidrometalúrgico (LX-SX-EW), fundición, refinería y servicios (que incluye desalación e impulsión de agua de mar).

Para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero directas también llamadas de alcance 1⁴, se utilizó el correspondiente factor de emisión para cada combustible, de acuerdo a la fracción de carbono oxidado. Para ello se utilizó la metodología prevista por el *International Panel on Climate Change* (IPCC) actualizadas al 2006. En este sentido, los combustibles considerados son Diésel, Kerosene, Petróleo Combustible, Nafta, Gasolina, Gas Licuado, Gas Natural, Carbón y Leña.

Las emisiones de CO₂ se calculan del siguiente modo:

$$EmisionesCO_2 = \sum_j EC_j * FE_j * FOC_j * \frac{44}{12}$$

Donde:

- $EmisionesCO_2$: Emisiones de Carbono (ton. CO₂).
- EC_j : Energía consumida en el combustible j (TJ⁵).
- FE_j : Factor de emisión del combustible j (ton C/TJ).

⁴ Alcance 1: Estas incluyen las emisiones directas procedentes de las actividades que la organización/empresa puede controlar

⁵ Tera Joules

- FOC_j : Fracción de carbono oxidado de combustible j .
- $44/12$: Relación entre los pesos moleculares del Dióxido de Carbono (CO_2) y el Carbono (C).

Los valores utilizados para el factor de emisión del combustible (FE_j) y la fracción de carbono oxidado (FOC_j) se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Factores de emisión y fracción de carbono oxidado

Tipo de Combustible	Factor de Emisión (tC/TJ, FE)	Fracción de carbono oxidado (FOC)
Diésel	20,2	0,99
Enap 6	21,1	0,99
Kerosene	19,6	0,99
Petróleo Combustible	21,1	0,99
Nafta	20,0	0,99
Gasolina	18,9	0,99
Butano	18,2	0,995
Propano	17,5	0,995
Gas Licuado	17,2	0,995
Gas Natural	15,3	0,995
Carbón	25,8	0,98
Leña	30,0	0,98

Fuente: Cochilco en base a las Directrices GEI de IPCC de 2006 (Cuadro 1.3; Capítulo 1; Volumen 2).

En paralelo, las emisiones de los gases CH_4 y N_2O asociadas al uso directo de cada tipo de combustible expresan en términos de CO_2 equivalente de acuerdo a la siguiente forma:

$$Emisiones_{ij} = \sum_j EC_j * FE_{ij} * PCG_i$$

Donde:

i : Gas CH_4 o N_2O .

$Emisiones_{ij}$: Emisiones del gas i para el combustible j expresadas como emisiones de CO_2 equivalente (ton. CO_2 equivalente).

- EC_j : Energía consumida en el combustible j (TJ).
- FE_{ij} : Factor de emisión del combustible del gas i para el combustible j (ton C/TJ).
- PCG_{ij} : Potencial de calentamiento global⁶ del gas i . Corresponde a 21 y 310 para CH_4 y N_2O respectivamente (IPCC 2006).

⁶ Se emplea para convertir este tipo de emisiones a sus equivalentes de CO_2 . Generalmente las emisiones de CH_4 y N_2O son menores que las emisiones de CO_2 , sin embargo, su potencial de calentamiento global por unidad de masa es mayor. En el caso del metano (CH_4), el potencial de calentamiento global por unidad de masa es 21 veces mayor que en el caso del CO_2 y en el caso del óxido nitroso (N_2O) es 310 veces mayor, por lo que para expresarlas como emisiones de CO_2 equivalentes se multiplican por esos factores respectivamente.

De acuerdo a la guía GEI 2006, IPCC, los factores de emisión son función del tipo de combustible y del uso que se le ha dado. En la Tabla 2 se indican los factores de emisión para cada gas según tipo de combustible y su uso.

Tabla 2 Factores de emisión de CH₄ y N₂O

Tipo de Combustible	Uso	Factor de Emisión CH ₄ (Kg/TJ)	Factor de Emisión N ₂ O (Kg/TJ)
Diésel	Vehículos Pesados	4	2
Gasolina	Vehículos Livianos	7,5	43
Enap 6	Secadores / Hornos	1	1,5
Petróleo	Secadores	1	0,6
Diésel	Caldera Industrial	0,2	0,4
Petróleo Combustible	Caldera Industrial	3	0,3
Kerosene	Servicios	2	0,6
Gas Licuado	Servicios	2	0,6
Gas Natural	Caldera	1,4	0,1
Gas Natural	Secadores	1,1	0,1
Carbón	Caldera	1	1,6
Leña	Caldera	30	4

Fuente: Cochilco en base a Guía GEI 2006, IPCC.

2.2. Metodología de cálculo de GEI Indirectas

Para realizar la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero indirectas o de alcance 2⁷, se requieren los datos de consumo de electricidad de la industria a nivel de procesos por faenas y los factores de emisión de GEI por unidad de electricidad consumida del Sistema Eléctrico Nacional (tCO₂eq/MWh). En la fórmula siguiente se muestra el cálculo de las mencionadas emisiones para cada sistema interconectado:

$$EI_i = FE_i * \sum_i \sum_j CE_{ij}$$

Donde:

- *EI*: Emisiones de carbono indirectas, en millones de toneladas de CO₂ equivalente.
- *i*: corresponde al sistema interconectado que en este caso puede ser SING o SIC.
- *j*: corresponde a uno de los procesos: Mina, Concentradora, LXSXEW, Fundición, Refinería o Servicios.
- *k*: corresponde al conjunto de faenas mineras que se encuentran conectadas a los sistemas SIC o SING.
- *FE_i*: corresponde al factor de emisión de GEI de la matriz energética del sistema interconectado *i* publicado por el Ministerio de Energía (véase Tabla 3).

⁷ Alcance 2: Estas emisiones hacen referencia a las emisiones indirectas que se generan en las centrales de producción de electricidad como consecuencia del consumo de electricidad que la organización/empresa necesita para su producto y/o servicio.

- CE_{ijk} : corresponde al consumo eléctrico del proceso k , de la faena j , perteneciente al sistema interconectado i .

3. Emisión de GEI Directos en la Minería del Cobre en Chile

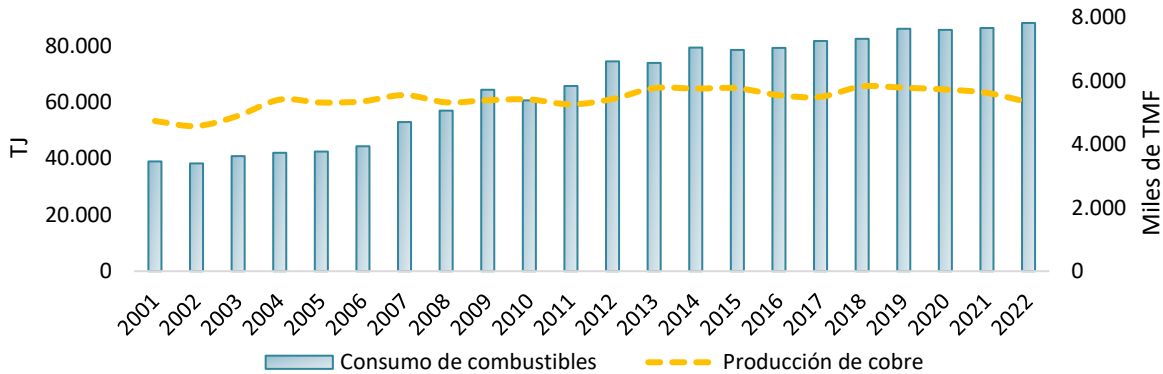
En las secciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se presentan los consumos de combustibles y emisiones asociadas, los tipos de combustibles usados, los procesos mineros asociados y su emisión por región. Junto con ello, se presenta la cuantificación de emisiones de GEI directos siguiendo los mismos criterios.

Luego en la sección 3.5 se presentan los resultados de la estimación de emisiones de GEI directos a nivel unitario, tanto para el nivel de emisiones por tonelada de cobre fino producido, como por unidad de producción en los principales procesos mineros.

3.1. Emisión Total de GEI Directos en la minería del cobre en Chile

El consumo de combustibles en la minería del cobre se ha incrementado en un 126,1% desde el 2001 al 2022, en tanto la producción de cobre en igual período se incremento en un 12,5%. Sin embargo, en los últimos siete años el consumo de combustible se ha mantenido más bien estable, en efecto, entre 2014 y 2022 el consumo de combustibles creció a una tasa anual de 2,0% anual mientras que entre 2001 y 2013 registró un crecimiento promedio anual de 5,7%. En la Figura 1 se presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles en el periodo 2001 – 2022.

Figura 1 Consumo de energía en base a combustibles y producción en la minería del cobre, 2001 – 2022



Fuente: Cochilco

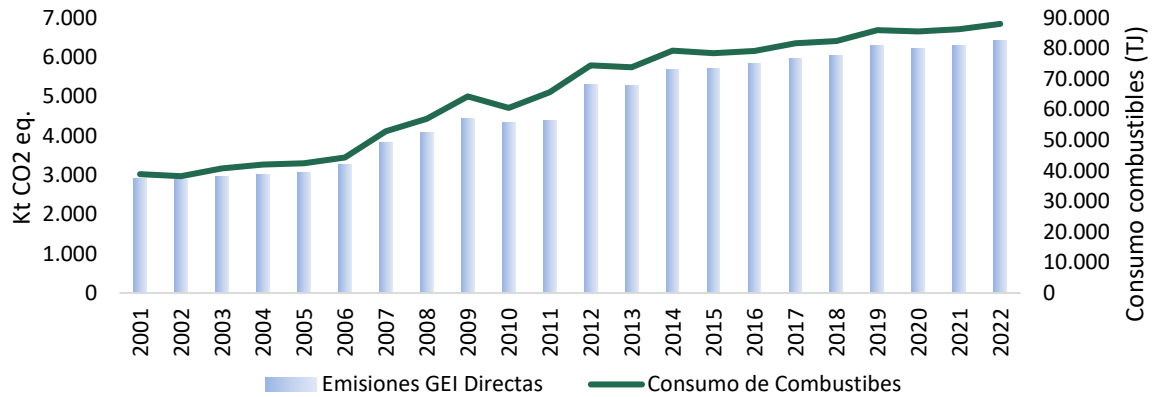
El principal factor que explica las menores tasas de crecimiento en el consumo de combustible entre el 2014 y 2022 es el menor nivel de producción agregada de cobre fino (menor demanda por mineral), que en el período ha ido disminuyendo a una tasa del 0,8% anual versus el crecimiento productivo a una tasa de 1,8% anual entre el 2001-2013.

Ahora bien, a pesar de la menor producción agregada de cobre fino, hay aumentos sucesivos en el consumo de combustibles en el proceso de extracción en mina rajo. Cabe señalar que este proceso en el 2022 representó el 78,9% del total de combustibles usados en minería y dentro del proceso mina rajo el consumo de diésel representó el 99,98%. Por otra parte, comparando el diésel usado en mina rajo con el total de diésel usado en los diferentes procesos mineros, se tiene que para el

año 2022, el diésel usado en mina rajo representa un 87,5% del diésel total usado en minería del cobre.

Revisando la evolución de los GEI directos, vemos de la Figura 2 que su tendencia sigue cercanamente a la del consumo de combustibles, creciendo a una tasa anual del 5,3% entre 2001 al 2013 y a una tasa promedio anual del 2,2% entre 2014 y 2022, llegando así al 2022 con un total de 6.418,1 ktCO₂ eq. .

Figura 2 Emisiones de GEI directas y consumo de combustibles de la minería del cobre en Chile, 2001 -2022



Fuente: Cochilco

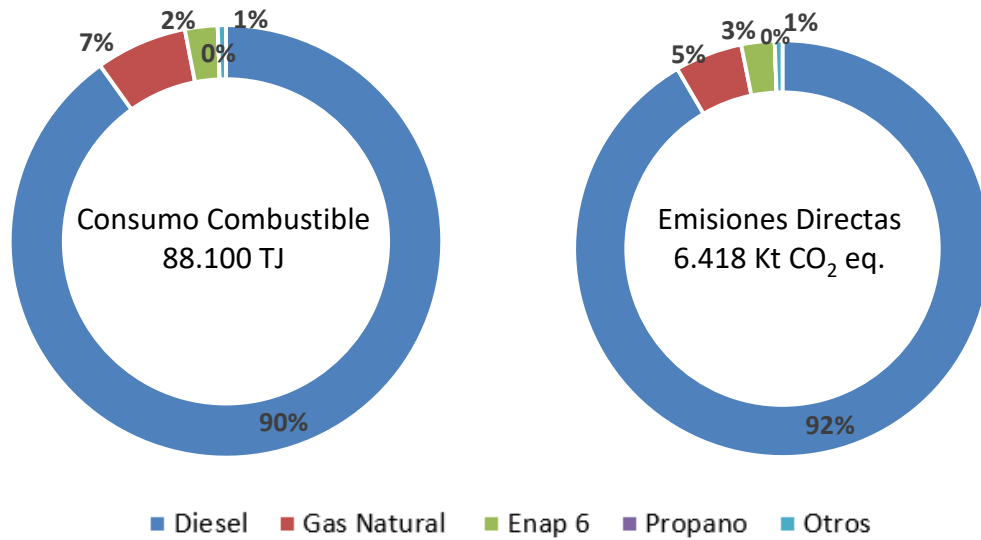
Al analizar el período completo, las emisiones de GEI directas se han duplicado en la minería del cobre aumentando un 120,8% al 2022 versus el ya mencionado aumento de la producción de cobre en igual período en un 12,5 %.

3.2. Emisión de GEI Directos por Tipo de Combustible

Dentro de los tipos de combustibles usados en minería del cobre, en el 2022 se observa que el diésel es por lejos el principal, concentrando el 90,1% del total. A distancia, el uso de Gas natural y Enap 6 representan el 6,8% y 2,4 % respectivamente.

En la Figura 3 se presenta el consumo por tipo combustible para el año 2022 y su consecuente estimación de emisiones directas. Es así como se observa que el Diésel es responsable del 91,6% de las Emisiones Directas de la minería del cobre en el 2022, seguido de lejos por el Gas natural responsable del 5,2% y el Enap 6 con un 2,6%. El cambio en los porcentajes de uso y emisiones observados obedece a los mayores factores de emisiones de GEI del Enap 6 (Fuel Oil n°6) y del Diésel por sobre el Gas natural.

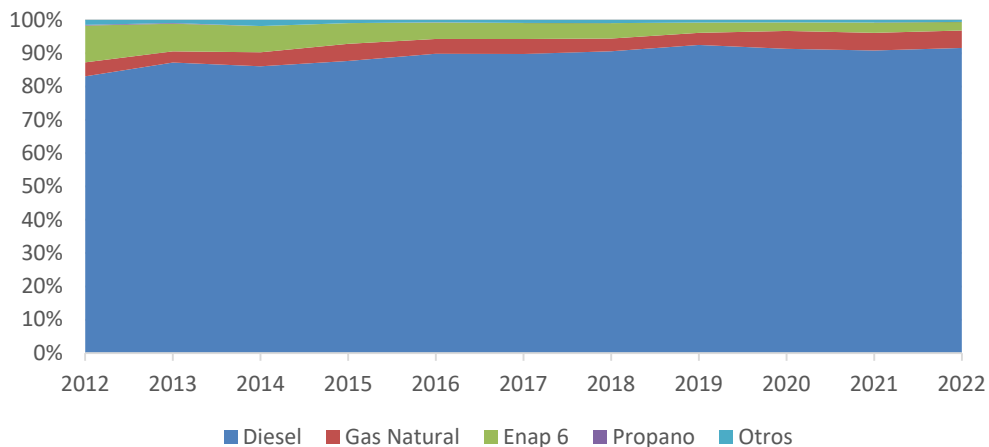
Figura 3 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustibles, 2022



Fuente: Cochilco

Como se aprecia en la Figura 4, al analizar la participación por combustibles en las emisiones GEI directas de la minería del cobre en el período 2012-2022, se observa que el Diésel ha ido incrementando su participación en la contribución de emisiones GEI directas, de 83,1% en 2012 al 91,6% en 2022, en tanto el segundo combustible más utilizado en 2022 que es el Gas natural, el cual ha estado estable en el período, aumenta levemente su participación en emisiones directas de 4,2% en 2012 a 5,2% en 2022. El Enap 6, también conocido como Fuel Oil n°6., en el 2022 es el tercer combustible más usado en minería y en los últimos ocho años ha reducido consistentemente su participación en el conjunto de combustibles, pasando de contribuir de un 11,0% en emisiones directas en 2012 a sólo un 2,6% en 2022. El mayor consumo de Enap 6 era en las fundiciones, las cuales han ido a procesos más autógenos con el uso de oxígeno.

Figura 4 Participación por tipo de combustible en las emisiones directas de la minería del cobre en Chile, 2012-2022



Fuente: Cochilco

El reemplazo del Enap 6 por Gas natural o Diésel ha disminuido en alguna medida las emisiones de GEI, producto de la utilización de un insumo considerablemente más contaminante que nace del remanente del crudo luego que la gasolina y los *fuel oil* destilados son extraídos a través de la destilación.

3.3. Emisión de GEI Directos por Proceso en la minería del cobre en Chile

Antes de analizar las emisiones de GEI por proceso, se revisan algunos puntos principales en el consumo de combustibles a este nivel de desagregación. En la Figura 5, se presenta el consumo agregado de energía en base a combustibles por proceso minero entre los años 2001 y 2022.

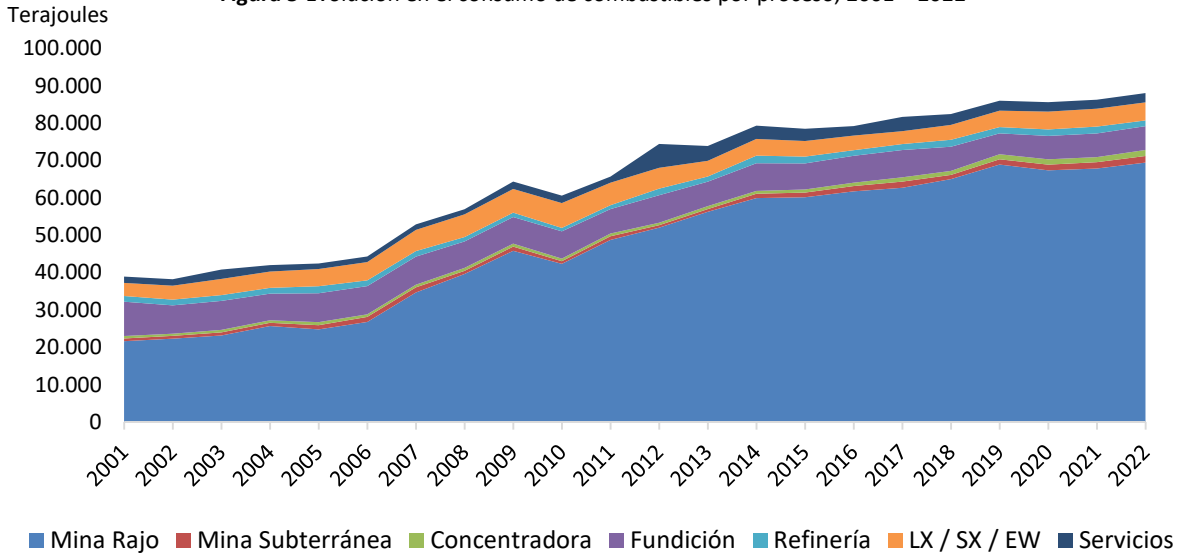
El proceso que mayor combustible demanda es la mina rajo (78,9% del total de combustibles usados en minería) y al ver su evolución en el tiempo en los últimos 21 años, el consumo de combustible se ha más que triplicado de 21.664 TJ en 2001 a 69.482 TJ en 2022. Esto se explica por un lado por el incremento del 12,5% de la producción de cobre entre 2001-2022 lo que conlleva un mayor procesamiento de mineral, un crecimiento de 126,1% en el periodo de análisis. Por otro lado debido a temas estructurales que enfrenta la minería como el decrecimiento en las leyes de las minas, un 44,2% entre 2001 y 2022, lo que involucra una mayor cantidad de mineral a transportar para sostener un volumen de producción y también al envejecimiento de los yacimientos, lo que implica, mayor profundidad de excavación y por tanto mayores distancias de acarreo del mineral desde su extracción hasta su procesamiento. Con la profundización de los rajos, la relación estéril-mineral aumentará más, lo que encarece el proceso también.

El combustible más utilizado en el proceso de mina rajo es el diésel (99,9% del total de combustibles usados en mina rajo en 2022) principal insumo de los camiones extractores de mineral y que tiene un alto nivel de emisión de CO₂ eq. El diésel usado en mina rajo representa un 87,5% del total diésel usado en minería del cobre en el 2022. A pesar de esto, el acelerado desarrollo de la tecnología de hoy, ha permitido el ingreso de la electro movilidad en la actividad minera y también de tener camiones que utilicen hidrógeno verde⁸, combustible que Chile podría producir a partir de la energía solar, abriendo un conjunto de opciones a la gran minería en materia económica y ambiental y, a su vez, traduciéndose obviamente en menores emisiones de CO₂ equivalente en el mediano y largo plazo.

Por otra parte, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles y que representa un 7,2% del total de combustibles usados en minería el 2022, disminuyó en un 30,6% entre el 2001 al 2022 aun cuando su nivel de procesamiento se ha mantenido en el período analizado, y no ha presentado variaciones significativas en su consumo nominal en relación a años previos. Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha mantenido con participaciones anuales inferiores al 6%.

⁸ Hidrógeno que sería producto de la electrólisis de moléculas de agua H₂O, en oxígeno e hidrógeno (H₂)

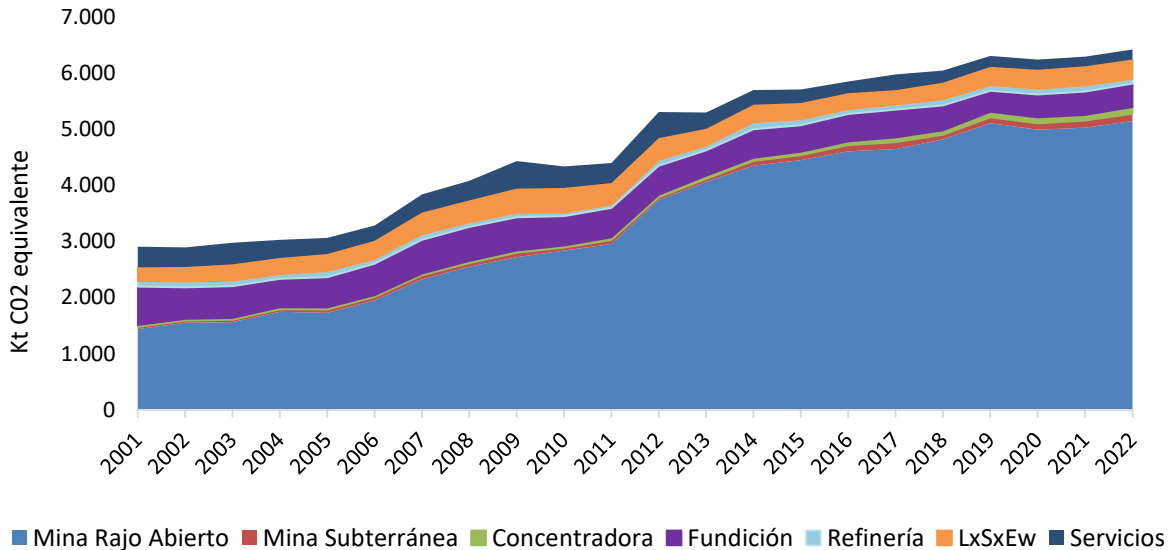
Figura 5 Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2022



Fuente: Cochilco

Como resultado, y tal como se ha comentado anteriormente, las emisiones de GEI directos por proceso siguen cercanamente al consumo de combustibles en cada proceso.

Figura 6 Emisiones de GEI directos de la minería del cobre por proceso, 2001 – 2022



Fuente: Cochilco

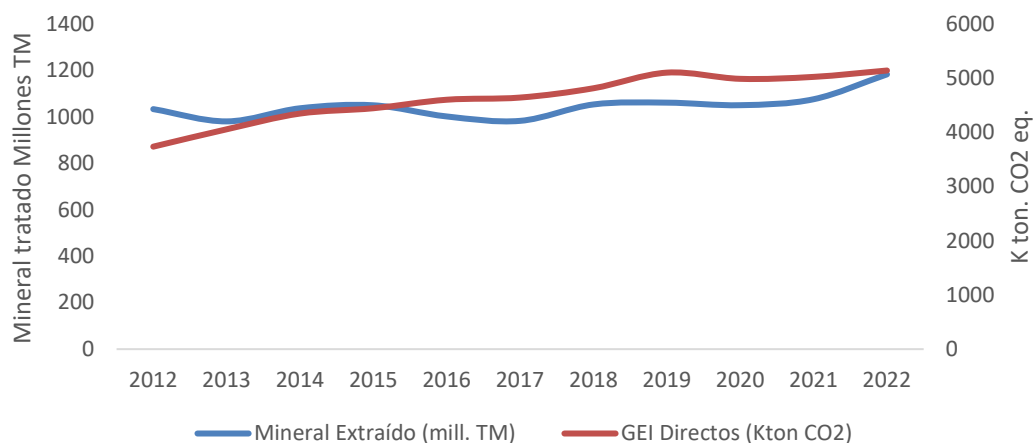
En efecto, la Figura 6 nos muestra que el proceso con mayores emisiones directas de GEI es la extracción desde mina rajo, siendo responsable de 5.143,8 Kt CO2 equivalente en 2022, representando el 80,2% de las emisiones directas de GEI de la minería del cobre ese año.

En el periodo analizado el aumento de emisiones GEI de mina rajo ha sido de 257,4%, con un 2,7% anual entre 2014 y 2022, aumento considerablemente menor que el crecimiento anual de 9,3% entre 2001 y 2013. El crecimiento más acelerado hasta 2014 se puede explicar por el incremento de

la producción de cobre (requiere más minerales); la reducción de la ley de cobre (requiere más mineral por unidad de cobre producido); el ingreso en operación de diferentes minas rajo abierto; el hecho de que a medida que las minas rajo abierto se profundizan aumenta la relación estéril mineral, aumenta la distancia de acarreo y la altura a vencer, con el consiguiente aumento de consumo de diésel y por tanto de emisiones directas de GEI. De aquí la necesidad de continuar con la sustitución de diésel como insumo primario y mejoras tecnológicas.

Como se aprecia en la Figura 7, si bien el mineral extraído desde la mina rajo ha presentado fluctuaciones positivas y negativas desde el 2012, las emisiones directas GEI en este proceso en general ha tendido al alza en cada año, sosteniendo la tesis de que mayores consumos de energía se deben a un mayor uso de diésel por el aumento de las distancias de acarreo desde el punto de extracción hasta la planta de proceso. Dado lo planteado en el párrafo anterior, se estima que siga incrementando su peso relativo, de no incorporarse medidas como la sustitución del diésel como insumo primario o mejoras tecnológicas.

Figura 7 Mineral extraído y emisiones directas GEI en mina rajo, 2012 – 2022



Fuente: Cochilco

Luego, en el proceso de fundición de cobre se cuantifican 416,3 mil toneladas de CO₂ durante 2022 y equivalente al 6,5% del total de emisiones de GEI directos de la minería del cobre en Chile.

Esto se debe al nulo crecimiento en la capacidad instalada en esta etapa de proceso, pues desde el término del comisionamiento de la nueva fundición Chagres en 2002, no se han registrado cambios significativos en la capacidad de tratamiento. Lo anterior a pesar de que en 2016 Chagres, Altonorte y Ventanas debieron cumplir con el Decreto 28 de emisiones de 2013, que para el año 2016 fijó límites máximos para el azufre y el arsénico (cada fundición deberá capturar al menos el 95% de ambos) y que para el 2018 esta norma se hace extensible a las fundiciones de Chuquicamata, Potrerillos, Hernán Videla Lira y Caletones. Si bien estos contaminantes con mejoras en captación no son GEI, es esperable que igualmente contribuyan a reducir las emisiones de CO₂ debido a que

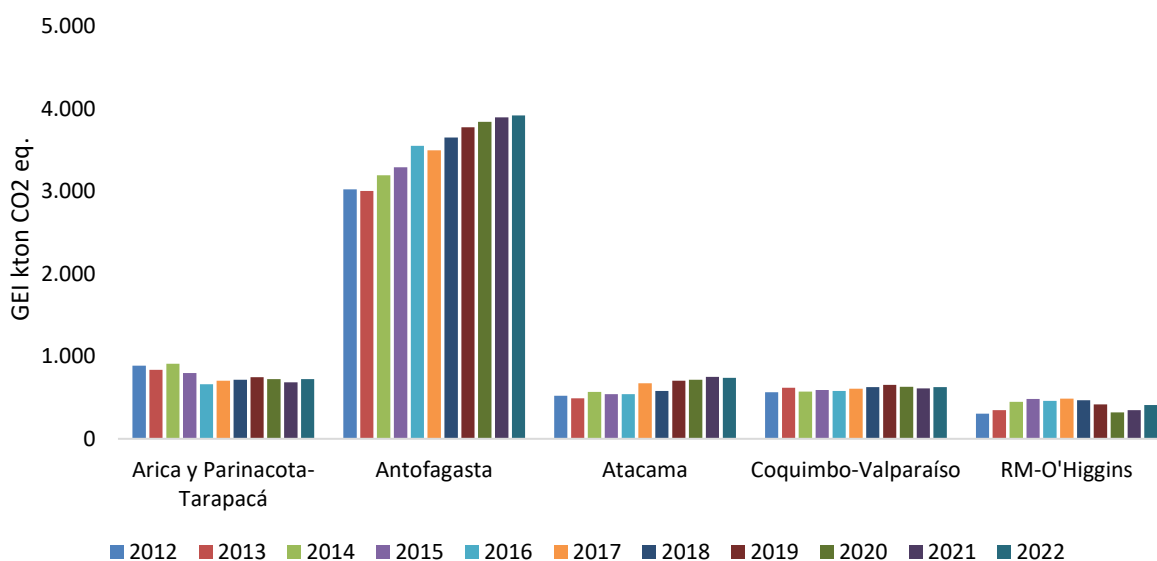
la captura de ambos implicará, por arrastre, la captura de CO₂⁹. Al mismo tiempo, se contempla al 2025 la construcción de una nueva fundición para Hernán Videla Lira, que tendría niveles de emisión aún menores (deberá capturar al menos el 98% del azufre y el 99,97% del arsénico), lo que a su vez redundará en menores emisiones de CO₂.

Finalmente el tercer proceso en importancia de emisiones de GEI directos es el de LX-SX-EW con 341,3 mil toneladas de CO₂ emitidas en 2022, lo que equivale al 5,4 % del total de emisiones directas. Entre el 2010 al 2022 las emisiones GEI de este proceso han disminuido un 22,1% en tanto la producción de Cátodos Electro Obtenidos disminuyó un 32,3%. Cabe señalar que en este proceso paulatinamente se ha ido reemplazando el diésel por lo general utilizado, por otras fuentes de energía, como la electricidad y también ha ido contribuyendo el reemplazo que algunas operaciones han realizado con el uso de la energía termosolar en el calentamiento de las soluciones.

3.4. Emisión de GEI Directos por Región en la minería del cobre en Chile

En la Figura 8 se presenta la evolución de las emisiones de GEI directos asociados a la minería del cobre desde el 2012 al 2022 por región. Antofagasta es por lejos la región con mayor nivel de emisiones, con 3.922,1 kt de CO₂ equivalente por GEI directos durante 2022, representando así el 61,1% del total de GEI directo minero. Esto debido a que en la región se concentran las mayores operaciones de minas a rajo abierto del país (proceso con intensivo uso de diésel) lo que implica que más del 56,1% de la producción de mina provenga de la segunda región.

Figura 8 Emisiones de GEI directas por región 2012-2022

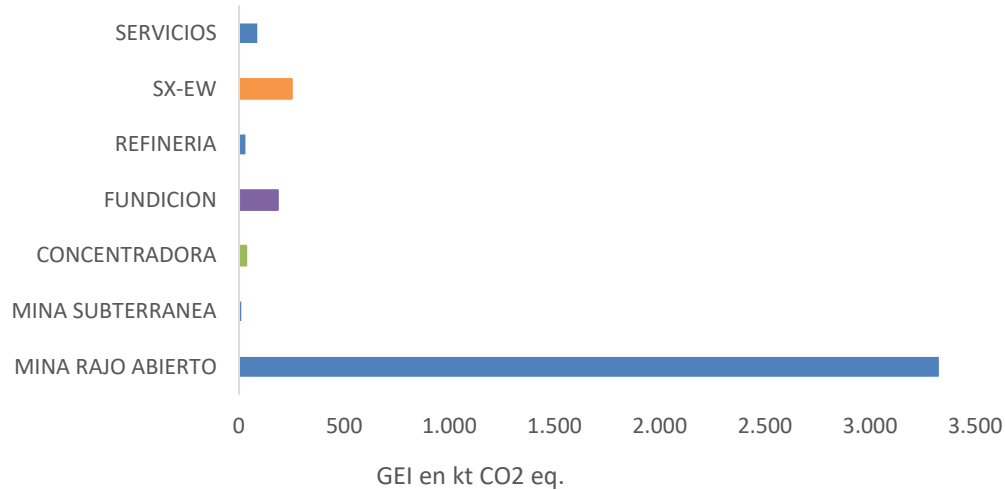


Fuente: Cochilco

⁴ La captura de azufre y arsénico trae como efecto secundario la captura de otros gases que si pueden contribuir a los GEI, ya que es económicamente costoso y carente de sentido práctico separar sus capturas.

Al analizar las emisiones de GEI directas por proceso en la región de Antofagasta, se observa en Figura 9 que la mina rajo es el proceso que mayores emisiones tiene con 3.326,3 kt CO₂ equivalente durante el 2022, lo cual representa el 84,8% de las emisiones directas de GEI de la región. Le sigue LX-SX-EW con 250,8 kt CO₂ equivalente (6,4% de las emisiones directas de GEI de la región) y Fundición con 184,3 kt CO₂ equivalente (4,7%) en el 2022.

Figura 9 Emisiones de GEI directas por proceso en región de Antofagasta 2022

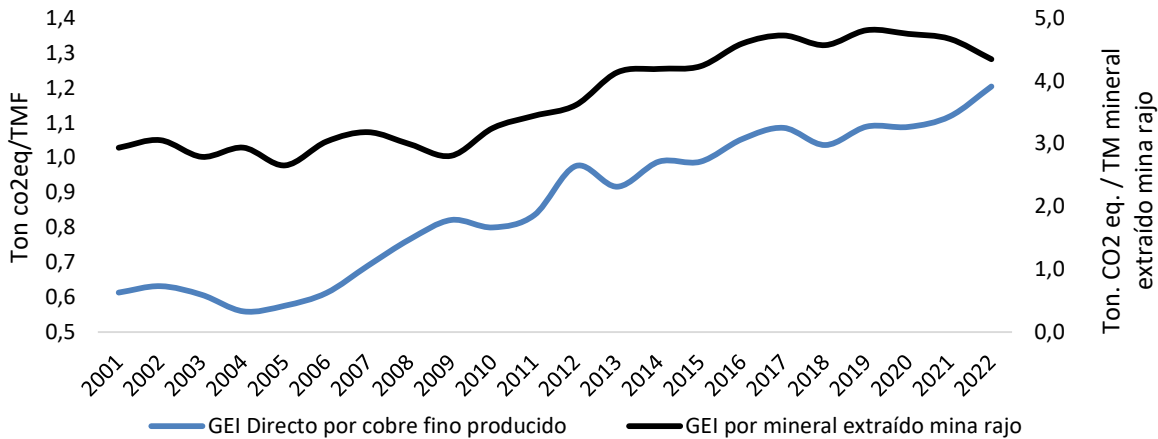


Fuente: Cochilco

3.5. Coeficientes Unitarios de emisión de GEI directos en la minería del cobre en Chile

Como se aprecia en la Figura 10, en general las emisiones directas de CO₂ equivalente tanto por cobre fino producido como por mineral extraído en mina rajo han ido en progresivo aumento desde el año 2001 al presente. En consecuencia, se infiere que la mayor producción de cobre no es el único factor responsable del mayor nivel de emisiones, sino que existen factores estructurales de la minería nacional que inciden en los niveles de contaminación, siendo el envejecimiento de las minas el principal. Esta situación involucra yacimientos más profundas (y por ende una mayor distancia de acarreo desde las minas hasta las plantas de procesamiento) y menores leyes del mineral (lo que implica una mayor extracción de mineral para producir la misma cantidad de cobre).

Figura 10 Emisiones de GEI directos por tonelada de cobre fino, 2001 – 2022

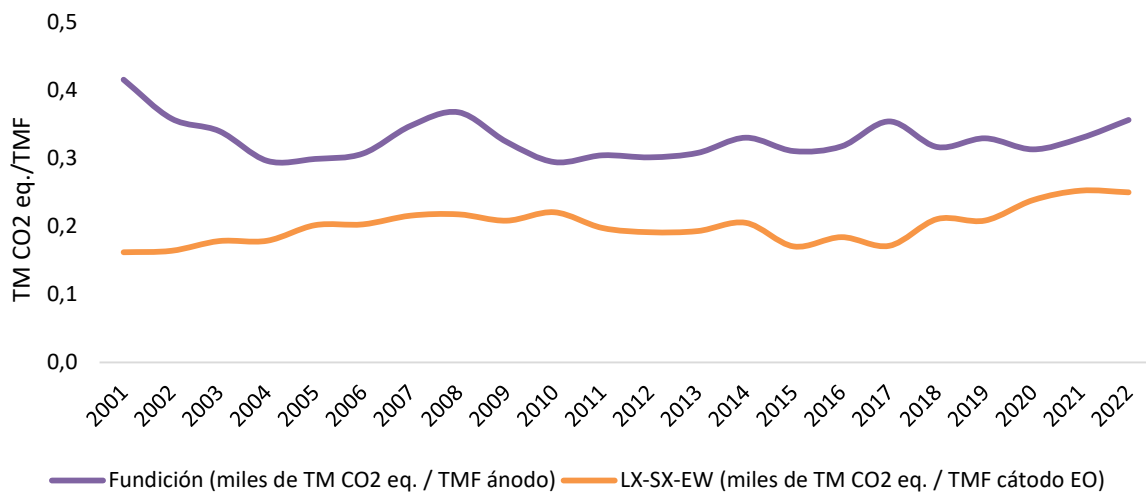


Fuente: Cochilco

Para el año 2022 se registraron 1,2 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de cobre fino producido. En la misma figura se presenta la evolución del proceso con mayor emisión de GEI directos, el de mina rajo. A nivel unitario este proceso en el año 2022 alcanzó las 4,4 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de mineral extraído. Este indicador se asocia al aumento del consumo de diésel producto de las mayores distancias de acarreo y profundidad relativa de extracción.

Los procesos que siguen en relevancia de emisiones de GEI directos son los de Fundición y Lx-Sx-Ew. En Figura 11 se puede observar que en relación a las Fundiciones, el coeficiente unitario de GEI directas por kilo tonelada de cobre fino contenido en Blíster/Ánodos alcanzó las 0,36 toneladas de CO₂ equivalente en el año 2022, siendo el promedio sostenido en las últimas dos décadas de 0,33. A su vez, el proceso de Lx-Sx-Ew, presenta un coeficiente de 0,25 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de cátodo electro obtenido, también similar al promedio del todo el periodo, equivalente a 0,20.

Figura 11 Emisiones de GEI directos por cobre fino contenido en Fundición y Electro-obtención, 2001 -2022



Fuente: Cochilco

4. Emisión de GEI Indirectos en la Minería del Cobre en Chile

En esta sección, se muestran los principales resultados del consumo de energía eléctrica de la minería del cobre en Chile y su respectiva emisión de GEI Indirectos en toneladas de CO₂ equivalente.

En primer lugar se presentan los datos agregados de consumo de energía eléctrica en la minería del cobre en Chile y su consecuente estimación de emisiones de gases de efecto invernadero indirectos para el periodo 2010 – 2022. Luego se presentan los indicadores de consumo eléctrico y emisiones por proceso de producción para el mismo rango de tiempo. Finalmente se exponen los resultados de la cuantificación de emisiones de GEI indirectos a nivel regional.

4.1. Sistema Eléctrico Nacional

Desde el año 2018 el suministro de electricidad de la minería del cobre proviene del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), sistema que desde el 2017 comenzó a forjarse y es la unión de los dos principales sistemas que tenía el país, el Sistema Interconectado Central (SIC) para el centro sur del país y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) para el norte grande de Chile. Hasta el año 2017 el Ministerio de Energía publicaba los factores de emisión promedio para los sistemas interconectados SING y SIC, donde variaban dependiendo del tipo de generación eléctrica que entra al sistema. En la Tabla 3 se muestran los factores de emisión para el SING-SIC y SEN en el periodo 2010 – 2022.

Las emisiones de CO₂ equivalente relacionadas con el consumo de electricidad están directamente relacionadas con la composición de la matriz energética del sistema eléctrico nacional, variando según el tipo de generadoras. En este sentido, mientras mayor sea la participación de generación utilizando combustibles fósiles, como por ejemplo el carbón y el gas natural, mayores serán las emisiones de GEI emitidas a la atmósfera debido al consumo eléctrico.

Como se puede apreciar en Tabla 3 comparativamente el menor valor del factor de emisión del SIC respecto del SING, se explicaba porque el SIC tenía una matriz de generación más diversificada con generación eléctrica hidráulica y de energías renovables no convencionales, entre otras, mientras que en el SING la generación era en gran parte térmica.

Al materializarse la interconexión completa de los sistemas de suministro de energía SING y SIC en el 2018, los factores de emisión de cada sistema se fusionaron dando paso a un único factor de emisión del ahora gran suministrador de energía nacional, el SEN.

El factor de emisión del SEN ha ido disminuyendo dado el importante aumento de la generación renovable en la matriz energética chilena, llegando en el 2022 a un 55,6% de generación renovable. El mayor aumento lo han tenido las tecnologías solar fotovoltaicas y eólica, que han aumentado drásticamente pasando en conjunto de un 0,8% en 2013 a un 28% en 2022¹⁰ (ACERA, 2023).

¹⁰<https://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>

Tabla 3 Factores de emisión de GEI según Sistema Interconectado y SEN

Año	SIC (tCO ₂ eq/MWh)	SING (tCO ₂ eq/MWh)	SEN (tCO ₂ eq/MWh)
2010	0,3555	0,7158	
2011	0,3841	0,7388	
2012	0,3945	0,8057	
2013	0,4351	0,8113	
2014	0,3636	0,7905	
2015	0,3459	0,7643	
2016	0,3970	0,7667	
2017	0,3364	0,7730	
2018			0,4187
2019			0,4056
2020			0,3834
2021			0,3907
2022			0,3006

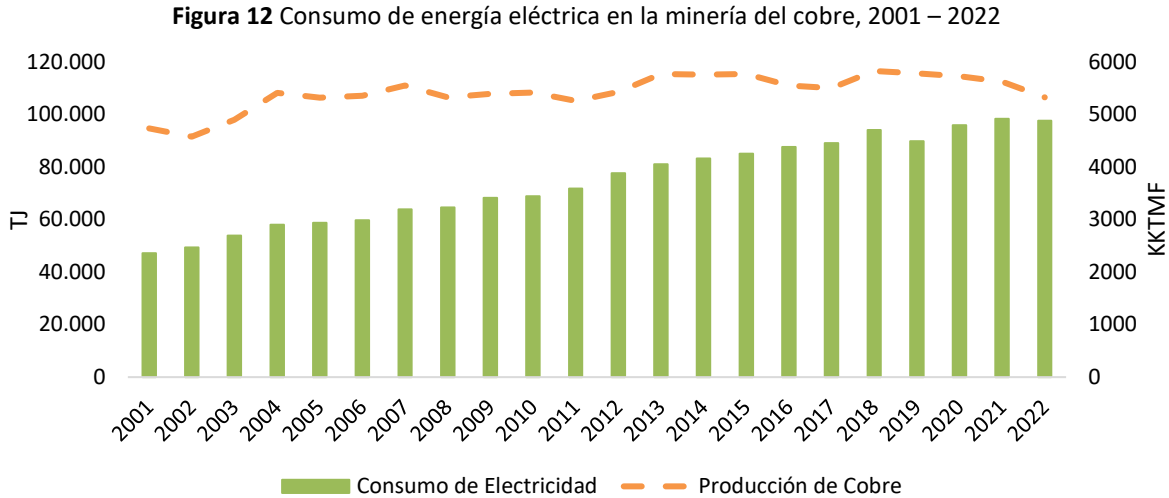
Fuente: Ministerio de Energía

Es así como para el 2018, el factor de emisión publicado por el Ministerio de Energía para el SEN es de 0,4187 tCO₂ eq/MWh, que es un 45,8% menor que el factor de emisión del SING y un 24,5% mayor que el factor de emisión del SIC en el año 2017. En el 2022, el factor de emisión para el SEN es de 0,3006 tCO₂ eq/MWh, que es un 61,1% menor que el factor de emisión del SING y un 10,6% menor que el factor de emisión del SIC en el año 2017. En el año 2022 la matriz de generación eléctrica tuvo una mayor participación de energías no renovable desde el 2019, lo que se refleja en que el factor de emisión del SEN disminuyó un 21,6% respecto al 2021.

4.2. Emisión Total de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile

Las emisiones de GEI indirectos de la minería del cobre en Chile, y de otras industrias es el resultado del consumo total de electricidad y de la composición de la matriz nacional de generación eléctrica al que está conectado, la cual se compone de fuentes altas en emisiones como las termoeléctricas a carbón o diésel, la energía hídrica, así como también de energías renovables no convencionales con nula o bajos niveles de emisión de GEI.

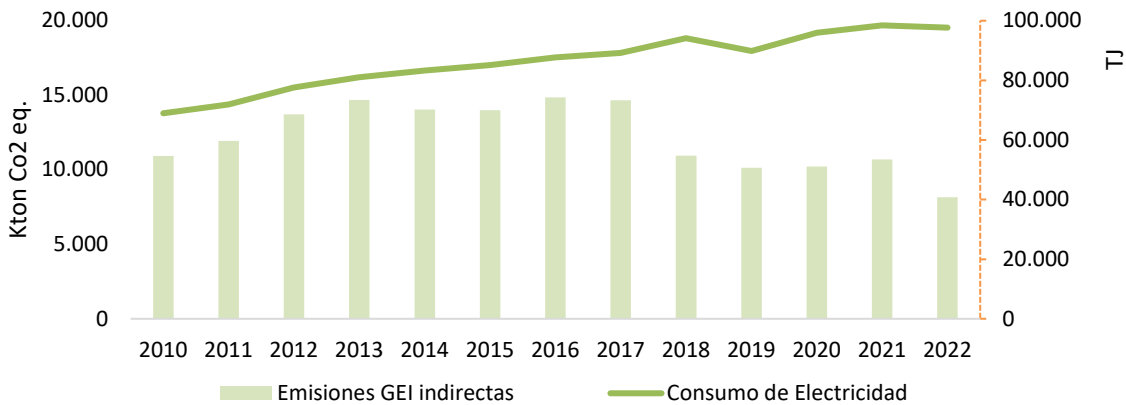
En la Figura 12 se presenta el consumo de energía eléctrica para la minería del cobre en Chile entre los años 2001 y 2022, que ha aumentado un 106,7%, en tanto la producción de cobre en igual período se incrementó en un 12,5%. Durante todo el periodo se registró una tasa de crecimiento anual en el consumo de electricidad de un 3,6%. El aumento del consumo eléctrico, viene dado principalmente por el aumento de capacidad de procesamiento de concentración a nivel nacional (22,3%) con el consecuente aumento de su consumo eléctrico en 154,7% en el período analizado, asimismo ha influido en el incremento de consumo eléctrico minero, además de la energía electricidad consumida en procesamiento, el del uso de agua de mar, por la desalación y los sistemas de impulsión de agua desalada o directa de mar a las faenas.



Fuente: Cochilco

En la Figura 13 se observa la evolución de las emisiones de GEI indirectas y el consumo de electricidad minero entre el año 2010 al 2022. En el año 2022 la minería del cobre en Chile emitió un total de 8.157,6 mil toneladas de CO₂ equivalente, corresponde a una disminución de 25,3% respecto del año 2010, en tanto el consumo de electricidad aumentó un 41,7% y el de producción de cobre fino en un 1,6% en el mismo período. El principal factor detrás de este menor nivel de GEI indirectos reside en una baja importante en el factor de emisión del SEN (-61,1%) con respecto al factor de emisión del SING en el 2017, sistema del que se suministraba la mayor parte la minería del cobre, en efecto, las emisiones GEI mineras disminuyeron un 44,3% respecto del 2017.

Figura 13 Emisiones de GEI indirectas y consumo de electricidad de la minería del cobre en Chile, 2010-2022



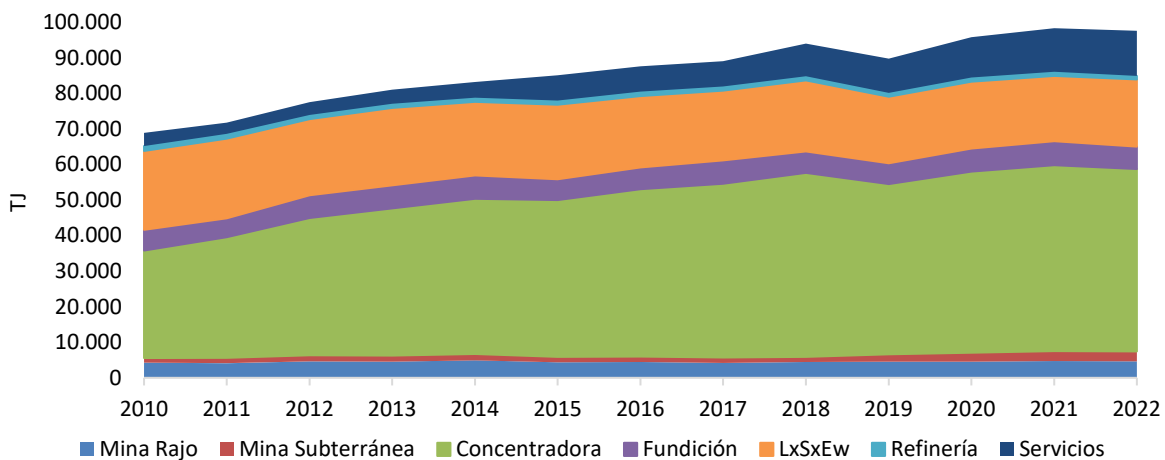
Fuente: Cochilco

Es así como se puede observar el fuerte impacto que tuvo el nuevo coeficiente de emisión del SEN en los cálculos de emisiones indirectas para la minería del cobre. Este coeficiente de emisión nacional se espera además vaya bajando a futuro a medida que se integren más fuentes de energías renovables en la matriz energética nacional.

4.3. Emisión de GEI Indirectos por proceso en la minería del cobre en Chile

En la Figura 14 se presenta la evolución del consumo eléctrico por proceso en la minería del cobre. Se aprecia que el proceso de concentradora ha sido el más demandante y el con mayor crecimiento de la demanda en todo el periodo. Entre el 2010 al 2022 la producción de concentrados aumentó en un 22,3%, en tanto el proceso de concentración aumentó un 69,5% su consumo de electricidad, llegando a representar un 52,5% del total de electricidad consumida en la minería del cobre en el año 2022. Este aumento de consumo de electricidad en la concentración se debe principalmente al chancado y molienda dada la mayor dureza de la roca, mayor volumen de mineral procesado en plantas concentradoras, un 62,5% en el periodo analizado, y al incremento sostenido de la producción de concentrados.

Figura 14 Consumo de electricidad por proceso minero, 2010 – 2022



Fuente: Cochilco

El proceso de electro-obtención es el segundo proceso de mayor relevancia en su consumo eléctrico representando en el 2022 el 19,4% del consumo eléctrico de la minería del cobre. Entre el 2010 al 2022, la producción de cátodos disminuyó en un 32,3% mientras el consumo de electricidad en electro-obtención se ha mantenido relativamente constante disminuyendo un 14,9% en el período analizado.

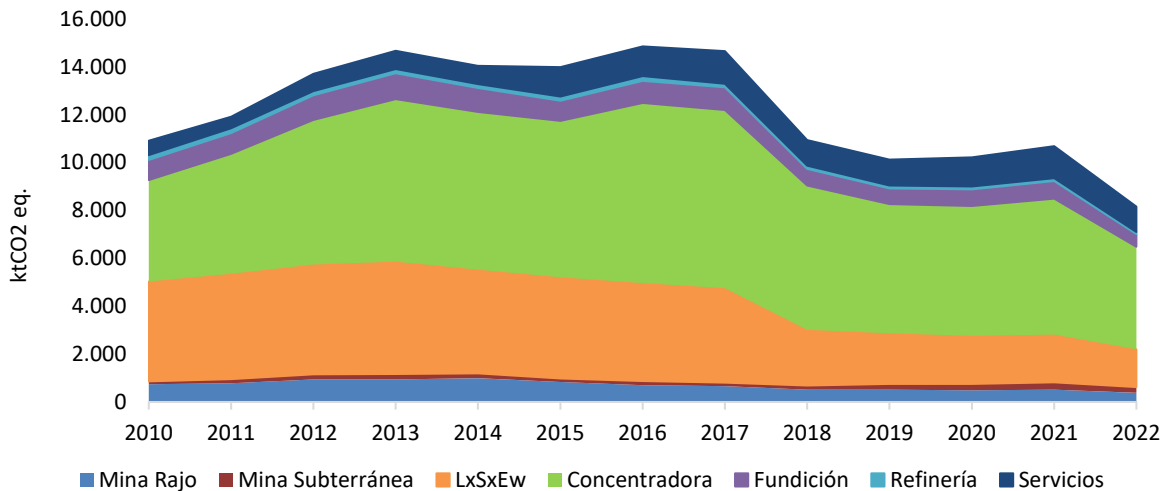
Por otro lado, el progresivo aumento del consumo eléctrico del sector Servicios en los últimos años, que si bien en el 2022 representa un 12,9% del total de electricidad consumida en minería del cobre, ha triplicado su consumo de energía eléctrica entre el 2010 y 2022 debido a la creciente demanda eléctrica de sistemas de desalación de agua de mar y especialmente su impulsión a las faenas mineras, procesos altamente intensivos en energía eléctrica y que están incluidos en Servicios representando el 69,1% del consumo eléctrico de este proceso.

Dado el comportamiento descrito previamente en el consumo de energía eléctrica, en los distintos procesos de la industria cuprífera, se estiman las emisiones de GEI indirectos asociados a cada uno, los cuales se presentan en la Figura 15.

Al 2022 el proceso de concentración registro un total de 4.283,0 mil toneladas de CO₂ equivalente, disminuyendo un 24,7% respecto del año 2021 y es un 1,0% mayor que en el 2010. Considerando que este proceso hasta el año 2017 se suministraba del SING en un 48% aproximadamente, este sistema tenía en ese año un coeficiente de emisión un 61,1% mayor que el actual SEN, es así como se explica la baja de emisiones de este proceso en el 2022 en un 42,4% respecto al 2017. En términos de participación, en el 2022 el proceso representa el 52,5% de las emisiones GEI indirectas de la minería del cobre.

Por otro lado, el proceso de Electro-Obtención ha ido disminuyendo sus emisiones progresivamente entre el 2010 y 2017 en un total del 5,0%, pasando de 4.166,1 mil toneladas de CO₂ equivalente a 2327,9 mil toneladas de CO₂ en 2017. En el año 2022 el proceso de Electro-Obtención registro un total de 1.578,6 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que corresponde a una baja del 62,1 respecto del 2010, de un 60,1% respecto al 2017 y de un 21,1% respecto del año 2021.

Figura 15 Emisiones de GEI indirectas por procesos, 2010 – 2022



Fuente: Cochilco

En cuanto al ítem de Servicios, durante 2022 disminuyó en un 20,8% el nivel de emisiones respecto del 2021, con lo que alcanzó un total de 1.056,0 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 12,9% de las emisiones GEI indirectas totales de la minería del cobre el 2022. En el año 2022 las emisiones GEI indirectas por concepto de uso de agua de mar (desalación y/o impulsión) son 729,7 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 69,1% de las emisiones dentro de Servicios y un 8,9% del total de emisiones GEI indirectas de la minería del cobre.

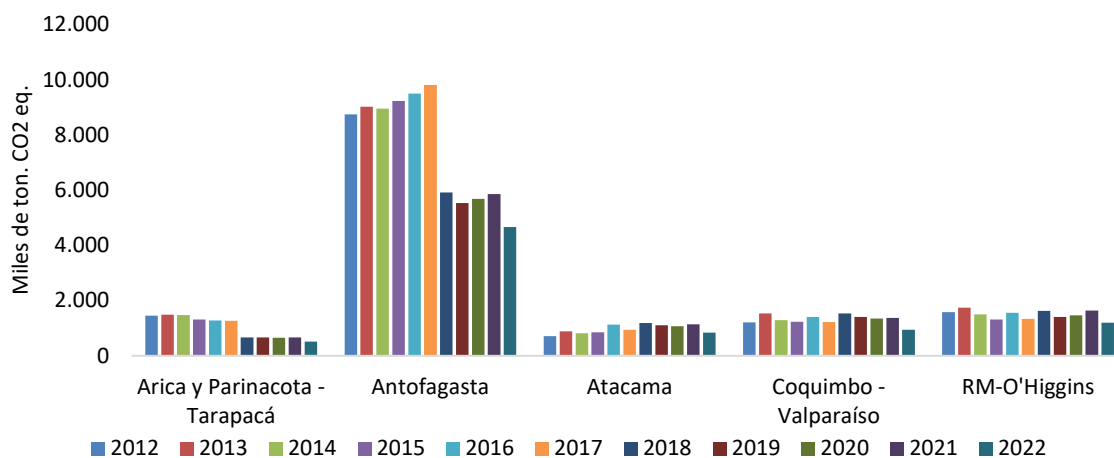
Cabe mencionar, el ítem Servicios se estima continuará aumentando su participación relativa en la cuantificación de emisiones indirectas, a medida que nuevos proyectos de desalinización e impulsión de agua de mar se lleven a cabo por las empresas mineras. Esto debido a que el incremento de producción de concentrados de cobre y las restricciones al uso de agua continental en el norte chileno ha motivado el uso de agua de mar como solución viable para dar sustentabilidad al negocio minero.

4.4. Emisión de GEI Indirectos por Región en la minería del cobre

En la Figura 16 se presentan las emisiones de CO₂ equivalente asociadas al consumo eléctrico regional entre los años 2012 y 2022. Cabe señalar, que en el año 2022 a todas las regiones se le aplican un mismo factor de emisión de 0,3006 tCO₂ eq/MWh perteneciente al SEN, en tanto hasta el 2017, Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta estaban conectadas al SING (que tenía un factor de emisión de un 61,1% mayor que el SEN actual) y Atacama, Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins conectadas al SIC (que tenía en el 2017 un factor 10,6% mayor que el del SEN actual).

Por tanto es de esperar que este hecho haya "mejorado" en términos de emisiones a las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta y "afectado" a las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins. Al observar la Figura 17 se muestra que Antofagasta sigue liderando el nivel de emisiones en línea con su mayor producción cuprífera y consumo eléctrico, registrando emisiones de GEI indirectos en 2022 por un total de 4.664,1 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa un 57,2% del total de emisiones de GEI indirectos de la minería del cobre. En tanto, las regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins emitieron en conjunto 1.196,9 mil toneladas de CO₂ equivalente (15,3% del total de emisiones de GEI indirectas de minería del cobre), nivel cercano a Coquimbo-Valparaíso que tiene 1.375,4 mil toneladas de CO₂ equivalente (14,7% del total), le sigue Atacama con 836,8 mil toneladas de CO₂ equivalente (10,3% del total), y finalmente Arica y Parinacota-Tarapacá con 511,4 mil toneladas de CO₂ equivalente (6,3% del total).

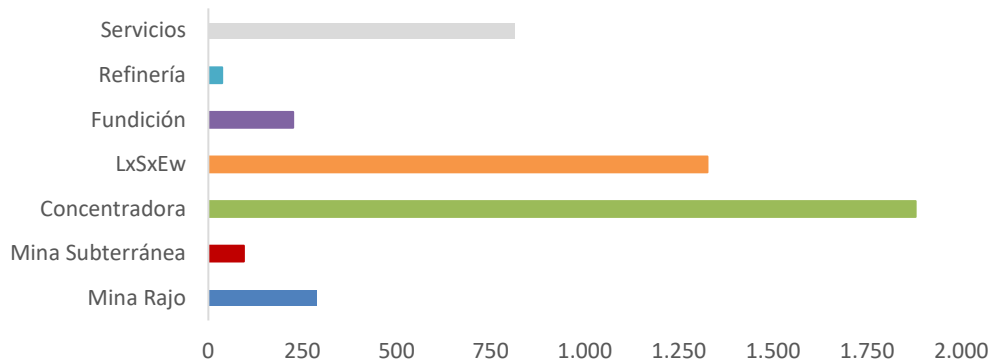
Figura 16 Emisiones indirectas en la minería del cobre por región, 2012-2022



Fuente: Cochilco

Al analizar las emisiones de GEI indirectas por proceso en la región de Antofagasta, se observa en la Figura 18 que el proceso de concentración es el proceso que mayores emisiones tiene con 1.878,8 mil toneladas de CO₂ equivalente durante el 2022, lo cual representa el 40,3% de las emisiones indirectas de GEI de la región. El otro proceso importante en cuanto a nivel de emisiones en la región es el de Electro obtención con 1.325,8 mil ton CO₂ equivalente durante el 2022, lo cual representa el 28,2% de las emisiones indirectas de GEI de la región y el tercer proceso en importancia términos de GEI indirectas en la región, es el de Servicios con 815,3 mil toneladas de CO₂ equivalente lo que representa el 17,5% de las emisiones GEI indirectas de la región.

Figura 17 Emisiones de GEI indirectas (Kton. CO2 eq.) por proceso en región de Antofagasta 2022

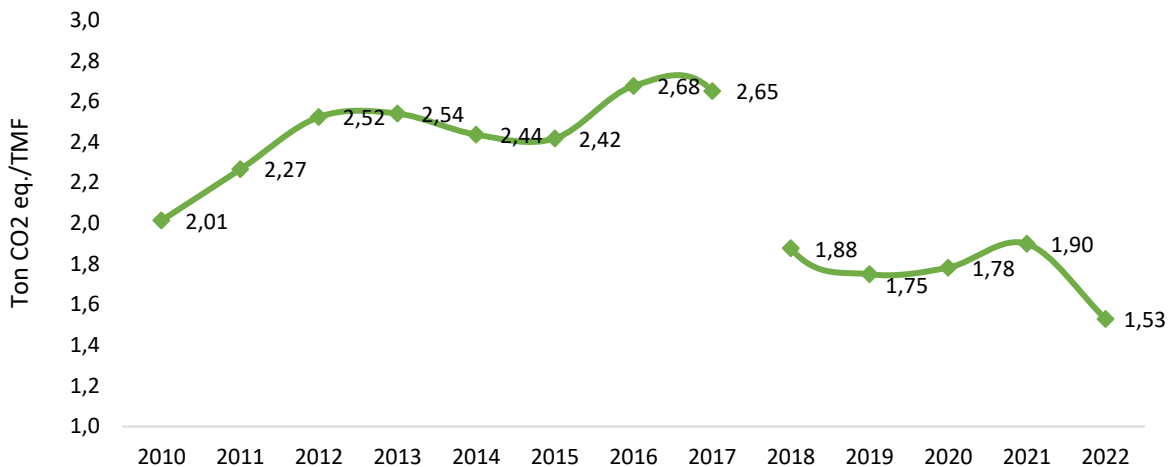


Fuente: Cochilco

4.5. Coeficiente Unitario de emisión de GEI indirectos en la minería del cobre en Chile

En la Figura 18 se presenta un indicador global de las emisiones de GEI de la minería del cobre a nivel nacional que es el coeficiente unitario de emisiones indirectas de GEI en toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de cobre fino producido. Al 2022 este indicador alcanzó un valor de 1,53 ton CO₂ eq por cobre fino producido, lo cual es un 24,0% menor que en 2010, 42,3% menos que en 2017 y un 19,4% menor que en 2021. Los motivos de este decrecimiento se vinculan principalmente con la caída en el factor de emisión en el nuevo SEN, como vimos previamente.

Figura 18 Coeficiente unitario global de GEI indirectos en la minería del cobre en Chile 2010-2022



Fuente: Cochilco

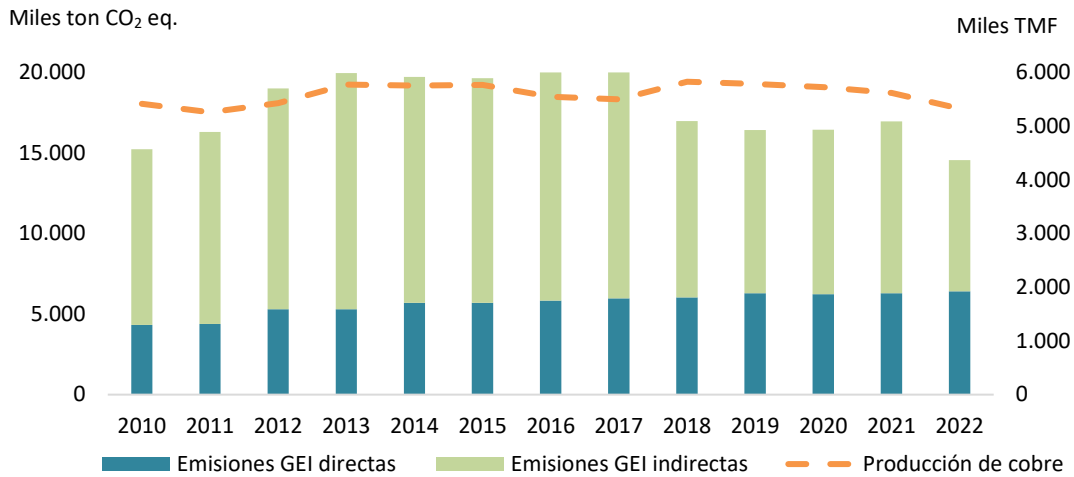
5. Emisión de GEI Totales en la minería del cobre en Chile

Agregando los totales de emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos (véase la Figura 19), vemos que en el año 2022 se registraron emisiones por 14.575,7 mil toneladas de CO₂ equivalente, distribuidas en 6.418,1 mil por GEI directos (44,0% del total de emisiones de la minería del cobre) y 8.157,6 mil por GEI indirectos (56,0% del total). Esto representa una caída del 4,4% con respecto al año 2010. Respecto del año 2017 se observa una disminución de un 29,1%, ello se atribuye principalmente a la caída en un 44,1% en las emisiones indirectas lo que a su vez se explica, cómo se vio anteriormente, al efecto de usar el nuevo factor de emisión del SEN en los cálculos desde su funcionamiento a partir del año 2018.

Comparando el 2022 con el año 2021, el nivel de emisiones GEI totales tuvo una disminución del 14,1% (un 2,0% de aumento de GEI directos y un 23,6% de disminución de GEI indirectos).

Ahora bien, analizando el período completo desde 2010, se ha registrado una disminución del 4,4% en las emisiones totales en tanto la producción se ha mantenido relativamente estable disminuyendo un 1,6% en el período. La disminución de las emisiones totales a pesar del aumento de demanda energética tanto de combustibles como electricidad en igual período, muestra el impacto positivo de la integración de energías limpias sin emisiones para suministro eléctrico.

Figura 19 Emisiones de GEI directos e indirectos de la minería del cobre, 2010-2022



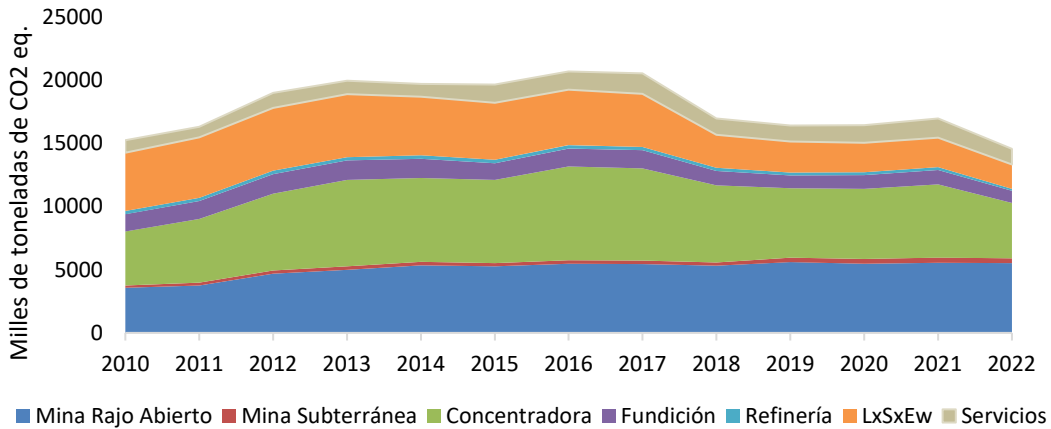
Fuente: Cochilco

Del mismo modo, revisando las emisiones de GEI a nivel agregado por proceso (véase Figura 20 y 21) se advierte que el proceso de mina rajo lidera las emisiones 5.527,9 mil toneladas de CO₂ eq., que representa el 37,9% del total en 2022 (un 93,1% proviene de emisiones directas y un 6,9% de indirectas). Entre el 2010 al 2022 este proceso ha aumentado sus emisiones en un 54,7% básicamente debido a temas estructurales que enfrenta la minería como lo es el envejecimiento de las minas.

El segundo proceso con mayor emisión de GEI en el 2022 es el de Concentración, con 4.402,3 mil toneladas de CO₂ eq., lo que representa un 30,2% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 97,3% proviene de emisiones indirectas y un 2,7% de directas). En tanto entre el 2010 y 2022

las emisiones de este proceso aumentaron un 3,0%. Como hemos visto, este incremento se vincula directamente a la tendencia nacional hacia la producción de concentrados, que en el período fue de un incremento en 26,4%, la cual es altamente intensiva en energía eléctrica y, consecuentemente, involucran la generación de emisiones del tipo indirectas.

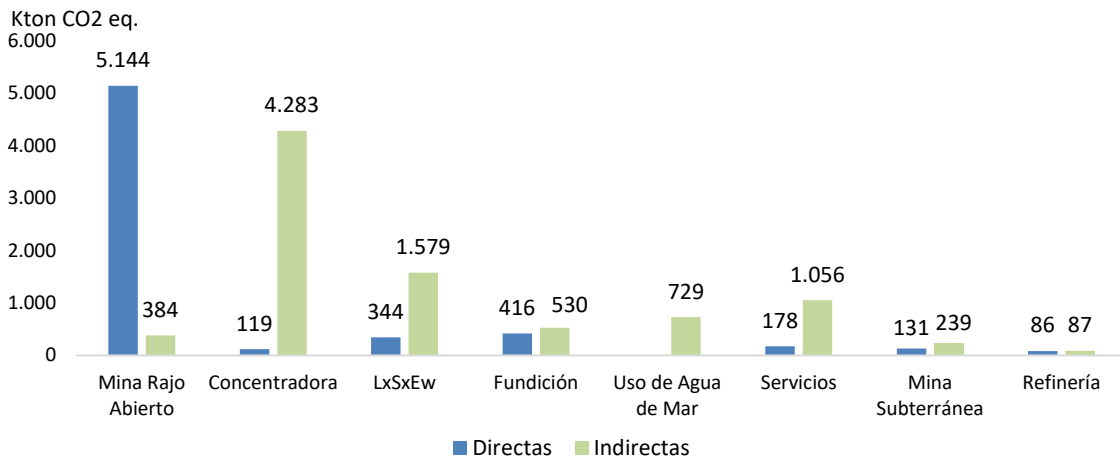
Figura 20 Evolución de Emisiones de GEI totales por proceso, 2010-2022



Fuente: Cochilco

El tercer proceso que tiene mayor emisión en el 2022 es el de Lixiviación con 1922,9 mil toneladas de CO₂ eq. emitidas, lo que representa un 13,2% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 82,1% proviene de emisiones indirectas y un 17,9% de emisiones directas). Entre el 2010 y 2022 las emisiones de este proceso han disminuido un 58,3%, por un lado por un tema estructural que es el agotamiento de los minerales lixiviables, lo que ha llevado a una menor producción de cátodos electro obtenidos (disminución del 32,3% entre 2010 y 2022) y además dado que este proceso que usa intensivamente electricidad en comparación a combustibles, sus emisiones indirectas han disminuido al aplicar el nuevo factor de emisión del SEN que cada año disminuye debido a que la matriz energética nacional integra cada vez más energías renovables.

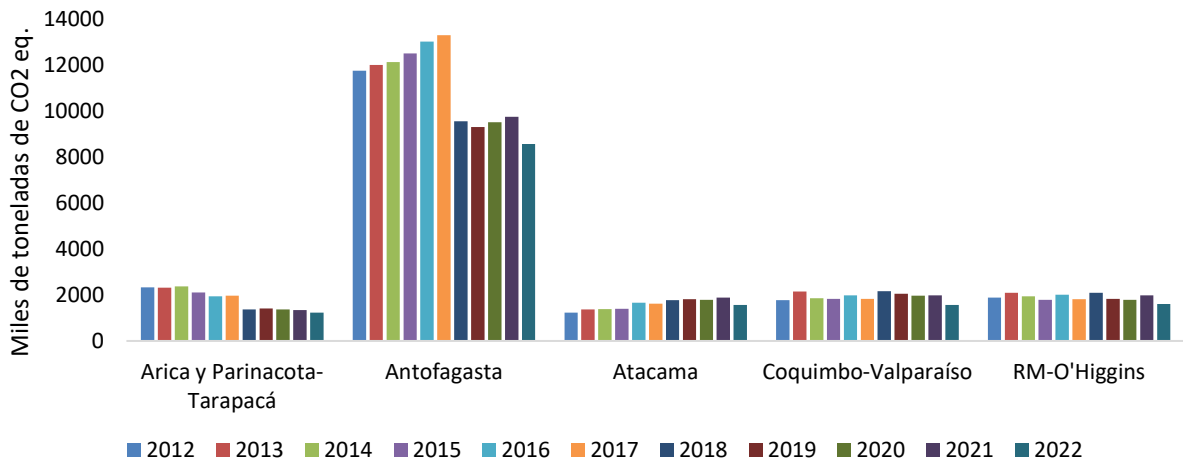
Figura 21 Emisiones de GEI por proceso, 2022



Fuente: Cochilco

Por último revisando las emisiones a nivel regional, se observa de la Figura 22, como es de esperar, que Antofagasta es la región con mayor nivel de emisiones por minería del cobre, con el 57,6% del total de emisiones de la minería del cobre durante el año 2021 (un 39,9% proviene de emisiones directas y un 60,1% de las indirectas). Esta situación se debe a que Antofagasta es la principal región cuprífera del país, pero también a las restricciones hídricas y demás factores estructurales que afectan a la minería del cobre en la zona. Al comparar las emisiones de la región con las del año 2017 se observa que la región ha “mejorado” disminuyendo sus emisiones totales, ello se debe a la disminución de las emisiones indirectas debido al nuevo factor de emisión del SEN que es mucho menor que la del antiguo sistema SING.

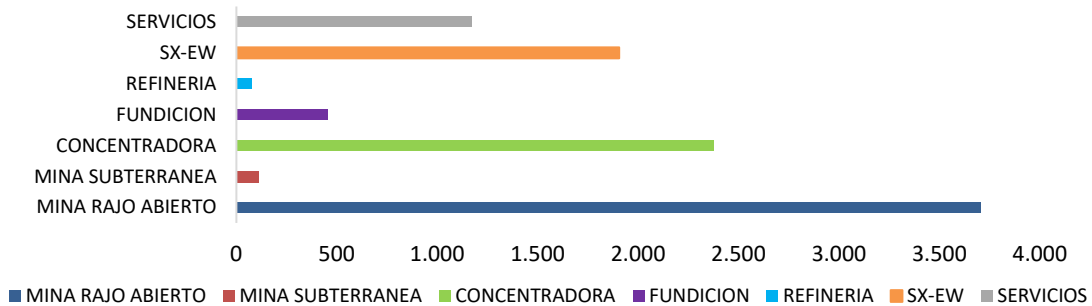
Figura 22 Emisiones de GEI totales por región, 2010-2022



Fuente: Cochilco

Al analizar en la región de Antofagasta las emisiones de GEI totales por proceso, se observa en Figura 23 que durante el 2022 la mina rajo es el proceso que mayores emisiones tiene con 3.705,2 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo cual representa el 37,8% de las emisiones totales de GEI de la región. Seguido por el proceso de concentración con 2.379,6 mil toneladas de CO₂ eq., lo que representa el 24,3 % de las emisiones totales de la región. Y el tercer proceso que más emite en Antofagasta es la Lixiviación, con 1.905,7 mil toneladas de CO₂ eq., lo que representa el 19,4% de las emisiones totales de Antofagasta.

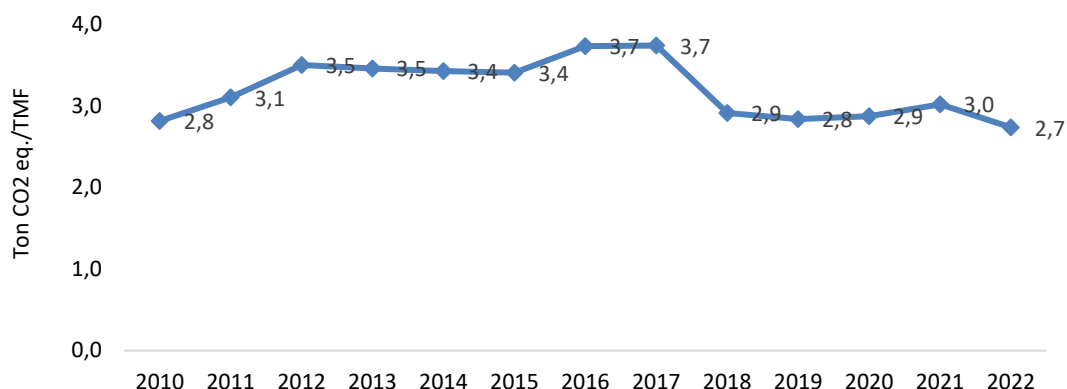
Figura 23 Emisiones de GEI totales (kt CO₂ eq.) por proceso en región de Antofagasta 2022



Fuente: Cochilco

Al calcular el coeficiente unitario global de las emisiones totales de GEI de la minería del cobre a nivel nacional, se observa en Figura 24 que en el 2022 este indicador alcanzó un valor de 2,7 toneladas de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido.

Figura 24 Coeficiente unitario global de GEI total en la minería del cobre en Chile 2010-2022

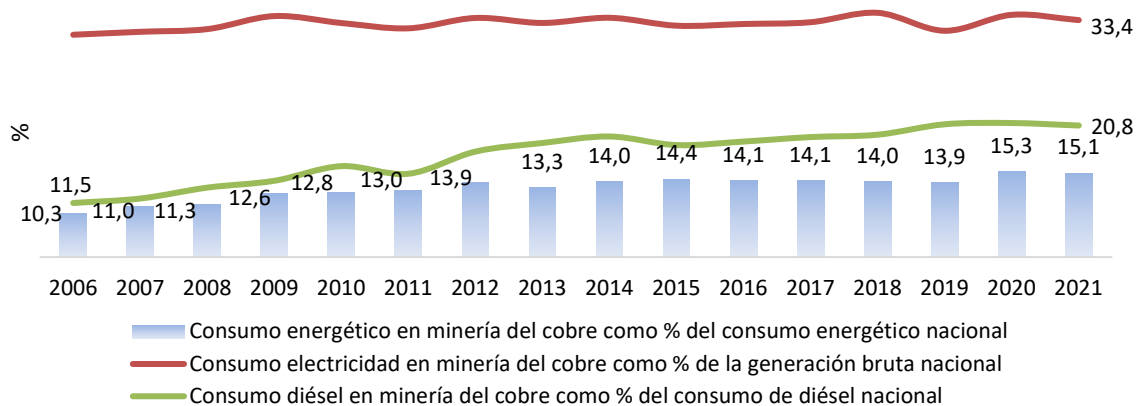


Fuente: Cochilco

6. Emisiones GEI minería del cobre en el contexto emisiones país

A nivel nacional, la minería es uno de los principales consumidores de energía. De acuerdo a los datos nacionales de consumo energético provistos por la Comisión Nacional de Energía, Cochilco estima que el sector minero en el 2021 es responsable del 15,1% del consumo energético del país y desglosando por tipo de energía el consumo eléctrico representa un 33,4% mientras que el consumo de diésel, el principal combustible minero representa un 20,8 % del consumo nacional en el año 2021 (Ver Figura 25).

Figura 25 Participación del consumo sectorial de energía en el consumo nacional, 2006-2021



Fuente: Cochilco en base a datos propios y el Anuario Estadístico de Energía 2022 (Comisión Nacional de Energía, 2023)

En término de emisiones nacionales, el Ministerio de Medio Ambiente, en conjunto con el Ministerio de Energía, tienen la tarea de elaborar oficialmente el Inventario Nacional de gases de Efecto Invernadero. En el último informe de emisiones GEI elaborado a nivel país, el Quinto Informe Bial

de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (BUR) 2022, se muestran las cifras del “Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2020”. Este documento expone que las emisiones totales de Chile en el 2020 son de 105.552 mil toneladas de CO₂ eq.

Si se comparan cifras del 2020 calculadas por COCHILCO de emisiones directas e indirectas de la minería del cobre con las del BUR (Ver Tabla 4), se tiene que:

- Las emisiones directas o de alcance 1 de la minería del cobre representan el 5,9% del total nacional de emisiones GEI
- Las emisiones indirectas o de alcance 2 de la minería del cobre representan el 9,7% del total nacional de emisiones GEI
- Es así como las emisiones totales de la minería del cobre son un 15,6% de las emisiones GEI totales a nivel país

Tabla 4: GEI minería del Cobre vs GEI País

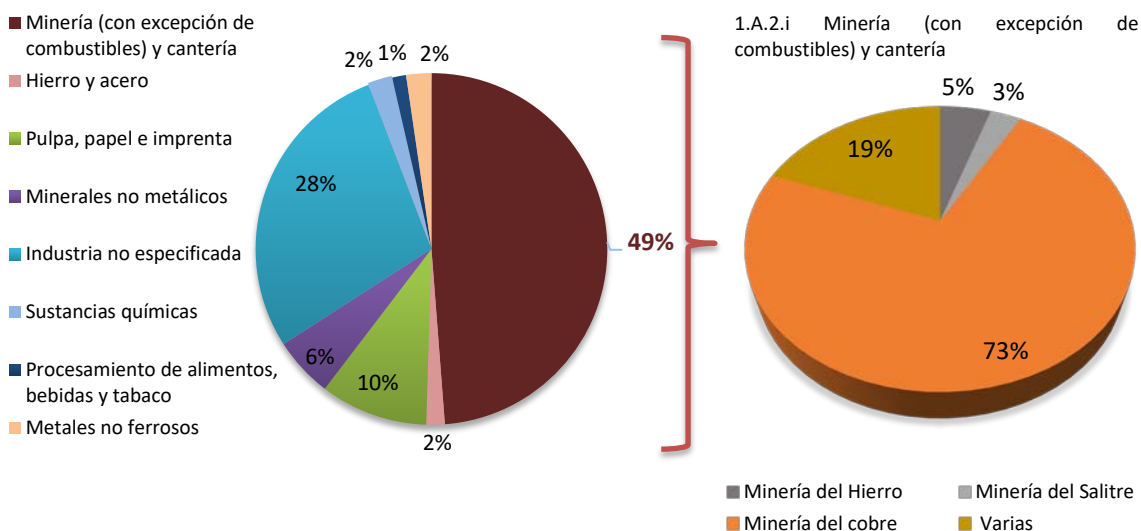
Emisiones GEI (kt CO ₂ eq)	Año 2020		
	Minería del Cobre (COCHILCO)	Total Nacional (BUR)	% del Total Nacional
Directo	6.238,3		5,9%
Indirecto	10.218,6		9,7 %
Total	16.457	105.522	15,6%

Fuente: Elaboración propia en base a BUR 2022 y COCHILCO 2022

Cabe señalar que las emisiones de la minería del cobre consideradas a nivel nacional y expuestas en el Quinto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático 2022, son las de Alcance 1. Al respecto el BUR 2022 señala que las emisiones de la minería del cobre son 5.491,8 mil toneladas de CO₂ eq, lo que representa un 5,2% del total nacional en el 2020. Las emisiones de alcance 2 de minería del cobre no son consideradas en dicho Informe.

En el BUR 2022, las emisiones de diferentes sectores productivos nacionales están contenidos en el ítem 1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción con un total de 15.528,2 ktCO₂eq., en este ítem el 49% lo representa el sub ítem 1.A.2.i Minería (con excepción de combustibles) y cantería con un total de 7.576 mil toneladas de CO₂eq., categoría en la cual está las emisiones de la minería del cobre representando un 73% de las emisiones respecto a los otros sectores mineros nacionales (Ver Figura 26). Ahora si se compara con otros sectores productivos nacionales, contenidos en la categoría 1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción, representaría un 35,4% de ésta.

Figura 26 Emisiones de GEI directas de 1.A.2 Industrias manufactureras y de la construcción, 2020



Fuente: Elaboración propia en base a BUR 2022

7. Camino hacia la transición energética en Chile

7.1. Política energética, una política de Estado

Chile ha enfrentado regularmente el desafío continuo de encontrar suministros de energía adicionales para apoyar el crecimiento económico, a pesar de tener abundantes recursos hidroeléctricos, las sequías son frecuentes, y la energía fósil es muy limitada, por lo que se debe importar carbón, petróleo, derivados del petróleo y gas natural para dar abasto a la demanda energética del país. Además de la dependencia de importaciones para poder cubrir las necesidades energéticas (con la consecuente vulnerabilidad a la volatilidad de los precios internacionales de combustibles), se tenía muy altos precios en electricidad y una matriz de suministro energético constituida por un gran número de centrales eléctricas de combustión de carbón conocidas por su alto nivel de contaminación y emisiones GEI.

Después de consecutivas crisis energéticas el país requería un cambio importante para asegurar un suministro seguro, hacer al país menos vulnerable y dependiente de la energía extranjera, y en concordancia con las nuevas exigencias sociales y ambientales que la sociedad imponía. Se fue así desarrollando y consolidando, un marco normativo y la creación de la institucionalidad necesaria para abordar toda la problemática energética del país. Dentro de las múltiples iniciativas en el sector, cabe destacar en el año 2010 la creación del ministerio de energía; en el 2014 el ministro de energía de la época empujó la aprobación de leyes energéticas que favorecieron entre otras cosas, la integración de energías renovables no contaminantes, más adecuadas para un crecimiento sostenible y cumplir compromisos internacionales en cambio climático que Chile ya había suscrito, además de mejorar seguridad del suministro eléctrico a costos progresivamente menores; en el 2015 el ministerio de energía publicó la Política Energía 2050 con el fin de fortalecer las políticas en

materia energética. Esta Política define una idea compartida del futuro energético del país construida mediante un proceso participativo que convocó a muchas personas, visiones y la diversidad del territorio nacional. Dentro de las metas establecidas estaba el tener un matriz renovable, fomentando también la participación de combustibles de bajas emisiones de GEI y contaminantes atmosféricos.

Bajo el marco y en concordancia con Energía 2050, se fueron generando en cada gobierno consecutivo, importantes iniciativas en política energética que han ido dando prioridades, fomentando, concretando y colando nuevas metas entre otros aspectos, como aumentar la capacidad de generación de renovable, tener un marco regulatorio para la eficiencia energética, generar un proceso de descarbonización de la matriz energética con retiro o reconversión de centrales a carbón, impulso de la electromovilidad, del desarrollo de una industria de hidrógeno verde y ver como introducirlo en sectores de alto consumo energético y emisiones, capacitación y desarrollo de competencias y habilidades en la gestión, uso sustentable de la energía, etc.

Otro punto a destacar es que en mayo de 2022, entró en vigencia el Decreto Nº10 de 2022, que aprobó la primera actualización quinquenal de la Política Energética 2050 estableciendo objetivos, metas con énfasis en la transición energética chilena y lograr tener Energía sin emisiones en el país.

Ello evidencia un sólido desarrollo de la política energética chilena, que ha podido trascender los gobiernos llegando a consolidarse como una política de Estado, lo cual da estabilidad, y ha posibilitado una mayor rapidez en el camino de concreción de las ambiciosas metas del país de ser carbono neutral al 2050, con un sector energético no dependiente, con seguridad de suministro, que hace uso eficiente de sus recursos y con licencia social.

7.2. Cambio Climático, hoy una pionera política de Estado

Como ya lo señalaba el Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático, la crisis climática es uno de los mayores desafíos de la humanidad y aunque Chile, contribuye con un porcentaje mínimo (0,2%) a la emisión de gases de efecto invernadero a nivel mundial, es muy vulnerable a sus impactos.

Para hacer frente a los impactos de esta crisis climática, Chile ha definido una política de Estado, lo cual se suma al contundente proceso de consolidación del marco normativo e institucionalidad ambiental chilena, que ha se ha ido desarrollando y concretando desde la promulgación de la Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente (Ley 19.300) en 1994. Es así como el 13 de junio de 2022 fue publicada en el Diario Oficial la Ley Marco de Cambio Climático, que establece como meta que el país sea carbono neutral y resiliente al clima a más tardar el 2050. Este nuevo marco jurídico permite exigir elaboración de planes sectoriales de mitigación y adaptación con medidas y acciones concretas para cumplir estas metas.¹¹

¹¹<https://www.gob.cl/noticias/un-hito-en-la-historia-medioambiental-de-chile-partir-de-hoy-contamos-con-nuestra-primer-ley-marco-de-cambio-climatico/>

En el contexto mundial de enfrentar el cambio climático, Chile se convierte así en el primer país en desarrollo que establece la carbono neutralidad por Ley, actuando así en concordancia con los ambiciosos compromisos internacionales adquiridos anteriormente por el país para la reducción de gases de efecto invernadero y/o de modo que sus aportes netos de contaminación no generen efectos al cambio climático, como los definidos en la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile (NDC). Es así como para alcanzar dichas metas y cumplir con los objetivos del Acuerdo de París Chile ha hecho prioritario y necesario transformar de manera revolucionaria la manera en que se produce y consume la energía¹², dado que el sector energético es el principal emisor de GEI representando el 75,5% de las emisiones totales de Chile en 2020¹³.

7.3. La transición energética

Así como ya lo señalaba Energía 2050 en el año 2015, en el mundo se viene dando una revolución tecnológica en el desarrollo de las energías renovables, la incorporación de electricidad a nuevas actividades y la preocupación de la comunidad internacional por descarbonizar la matriz energética mundial con el objeto de reducir suficientemente las emisiones GEI, en un contexto de hacer frente al cambio climático. Para enfrentar este escenario, mundialmente se ha posicionado como herramienta principal a la transición energética, que es el cambio de un sistema energético que se basa en combustibles fósiles, a uno de bajas emisiones o sin emisiones de carbono que esté basado en fuentes energéticas renovables.

Como se vio anteriormente, dentro de este contexto mundial, Chile ha establecido por Ley la carbono neutralidad y para ello ha decidido construir una transición energética que además de asegurar el suministro, da prioridad a mitigar el cambio climático aprovechando las excelentes condiciones para el funcionamiento de energías renovables, fomentando su incorporación, impulsando la descarbonización, estableciendo criterios de uso eficiente de la energía, dentro de un mercado energético estable con un marco regulatorio sólido que ha logrado trascender a los gobiernos convirtiéndose en políticas de Estado, con énfasis en que esta transición sea justa y sustentable con consenso social y sobre la importancia de llevar todos los esfuerzos para una pronta transición energética.

7.4. Desafíos país en la transición energética

Resultado concreto de la transformación energética que Chile ha decidido realizar, es el importante aumento de la generación renovable en la matriz energética chilena en los últimos años.

Ahora bien, no obstante los importantes avances que ha tenido Chile en la materia, hoy ante el abrupto ingreso de las energías renovables no convencionales y el comparativamente lento crecimiento en líneas de transmisión, actualmente se evidencian importantes desafíos para lograr la total transición y una carbono neutralidad al 2050. Entre los principales están:

¹² https://www.politicanacionalminera.cl/wp-content/uploads/2022/03/Mineria_2050-Politica_Nacional_Minera.pdf

¹³ Quinto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (2022)

- Baja flexibilidad del sistema.
- Poco uso de infraestructura existente.
- Mejorar fallas detectadas de infraestructura u otras, además de tratar de solucionar congestión en sistema de transmisión, que hacen que no pueda ingresar energía renovable generada hoy.
- Disminuir el desfase entre la construcción de nuevas obras y redes de transmisión en relación al abrupto desarrollo y requerimiento de ingreso de generadoras de energías renovables no convencionales.
- Aumentar capacidad de almacenamiento ante intermitencia actual de las energías renovables no convencionales (ERNC).
- Mejorar la planificación territorial y que esta sea proactiva.
- Mejorar tiempos de tramitación de permisos para desarrollar proyectos de energía, transmisión, almacenamiento.

Por tanto, Chile sigue trabajando fuertemente para lograr la meta de tener una matriz energética descarbonizada, sustentable y que además sea eficiente.

Es así como en julio de 2023, el Ministerio de Energía ingresó el Proyecto de Ley de Transición Energética que busca posicionar a la transmisión eléctrica como un sector habilitante para la carbono neutralidad. Su objetivo es acelerar la participación de las energías renovables en la matriz eléctrica nacional a través de modificaciones al mecanismo de asignación de ingresos tarifarios, mejoras al sistema de transmisión eléctrica, desarrollo de la infraestructura habilitante y el fomento para el desarrollo de proyectos de almacenamiento energético.

7.5. Política nacional minera 2050

En el año 2022, el Ministerio de Minería presentó el anteproyecto de la Política Nacional Minera 2050¹⁴ (PNM2050), trabajo que contó con la participación de más de 3.500 personas entre académicos, sector público, sector privado, trabajadores y proveedores de la minería, comunidades y sociedad civil.

Esta Política es un documento estratégico que dentro de su pilar ambiental plantea entre otros temas, lineamientos y metas que apuntan a tener una minería sustentable, líder en economía circular, que esté a la vanguardia en gestión ambiental y comprometida con un uso racional y eficiente de los recursos naturales y energéticos en sus procesos productivos. Dentro de estas metas, está también a) lograr la ambiciosa meta de la carbono neutralidad corporativa al 2040 y b) hacer crecer el modelo de economía circular a través de minería secundaria y procesos de construcción, ambos componentes importantes en la transición energética chilena.

¹⁴ <https://www.politicanacionalminera.cl/>

Tabla 5: Metas de la PNM2050 relacionadas con una minería sustentable que apoya la transición energética

Pilar Ambiental: Minería a la vanguardia en la gestión de sus recursos y el medioambiente, aborda sus impactos y genera una ganancia neta en la biodiversidad	
Lineamiento	Meta
Liderar la adaptación y mitigación al cambio climático, logrando la carbono neutralidad del sector al 2040	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Reduce al menos un 50% las emisiones de CO2 equivalente de las operaciones de la gran minería al 2030, alcanzando la carbono neutralidad al 2040 ✓ Genera planes de flota cero emisión al 2025 para la gran minería e inicia su implementación al 2030, según disponibilidad tecnológica ✓ Un 90% de los contratos de energía eléctrica del sector minero proveniente de fuentes renovables al 2030 y el 100% al 2050 ✓ Establece metas de emisiones de GEI de alcance 1, 2 y 3¹⁵, dando cumplimiento al 2030, y su posterior monitoreo y actualización ✓ El 100% de las empresas cuenta con sistema de gestión y de auditorías para la eficiencia energética al 2050 ✓ Elabora un plan de adaptación y mitigación al Cambio Climático del Sector Minero en línea con el Acuerdo de París, Plan de Acción del Cambio Climático y de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) al 2022, luego este se monitorea y actualiza cada 5 años. ✓ Prioriza la elaboración de un plan de acción tecnológico del sector minero, en el marco de la estrategia de desarrollo y transferencia tecnológica para el cambio climático al 2025.
Liderar el modelo de economía circular a través de la reutilización de residuos y uso eficiente de recursos	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Impulsa la economía circular a través de minería secundaria polimetálica ✓ Impulsa la economía circular a través de los procesos constructivos de los proyectos mineros ✓ Fomenta la inclusión en la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor de otros residuos no mineros, fuera de los siete residuos prioritarios ✓ Promueve la generación de indicadores de circularidad en línea con los compromisos de la NDC.

Fuente: Elaboración propia en base a metas contenidas en la Política Nacional Minera 2050, 2021

7.6. Minería Verde

En diciembre 2022, la Comisión *Desafíos del Futuro, Ciencia, Tecnología e Innovación* del Senado y la Fundación *Encuentros del Futuro, Congreso Futuro* lanzaron el libro “Chile tiene futuro desde sus territorios: Minería verde para enfrentar la emergencia climática”, trabajo que contó con la participación de más de 150 actores claves de la minería en Chile y en que se elaboró un diagnóstico, propuestas y metas para construir una minería verde con el fin de mejorar la eficiencia minera y disminuir el impacto ambiental¹⁶.

¹⁵ Aquellas emisiones generadas en actividades que ocurren en fuentes que no son controladas por la operación minera, relacionadas con la actividad de proveedores de bienes y servicios de la minería. Guía sobre emisiones en la cadena de suministro de la minería, 2022.

¹⁶ <https://www.senado.cl/mineria-verde-y-emergencia-climatica-lanzan-libro-que-aborda-desafios>

En este libro se menciona que “el término minería verde fue acuñado en Finlandia como una herramienta para posicionar a su industria minera como sustentable”; basado en ello, los autores proponen definir minería verde como aquella que comprende los siguientes atributos en todo su proceso minero:

- ✓ Baja en emisiones locales y globales y que se adapta al cambio climático
- ✓ Baja en residuos, minimizando su generación e insertándose en sistemas de producción circulares
- ✓ Que cuida la biodiversidad en los ecosistemas donde opera
- ✓ Eficiente en el uso de agua
- ✓ Eficiente en el uso de energía y uso intensivo de energías renovables de bajas emisiones
- ✓ Impulsora de desarrollo de encadenamientos productivos o clusters
- ✓ Inserta en los territorios, abriendo espacios para la participación de las capacidades locales en los procesos de creación de valor de una minería sostenible

Dentro de los ejes estratégicos planteados en el libro, hay dos que se puede relacionar directamente con la transición energética y minería:

Eje1: Descarbonización, acceso a mercados y desafíos tecnológicos. En este eje se plantea que para desarrollar una industria minera carbono neutral, es clave impulsar un proceso de transición energética que, junto con disminuir emisiones tenga un sistema de trazabilidad confiable, tarea no sólo de envergadura sino de gran complejidad”. Dentro de sus metas están:

- ✓ Contar con una metodología para el cálculo, reporte y gestión de emisiones de alcance 1, 2, y 3 bajo estándares internacionales, homologada y operativa al año 2023.
- ✓ Reducir la intensidad de emisiones en un 50% al año 2030 para la gran minería del cobre alcanzar la carbono neutralidad de la minería al año 2050.
- ✓ Crear una red de centros o institutos de investigación con foco en producción limpia, operativa al año 2025.
- ✓ Tener el 70% de la producción de cobre trazable al año 2025, y el 100% trazable al año 2030.
- ✓ Aumentar la participación de empresas locales en el desarrollo de soluciones tecnológicas para la trazabilidad y reducción de emisiones. Aumento de al menos 10% de las compras asociadas a estas soluciones provistas localmente al año 2030, respecto a línea base; 20% de aumento al 2040 y 30% de aumento al 2050, sobre línea base.

Eje 4: Procesamiento de concentrados, minería secundaria, reciclaje y pasivos ambientales. Este eje plantea iniciativas para minimizar la generación de residuos y recuperar más elementos de valor, y ya al 2030 habilitar un centro de minería secundaria en región minera evaluada y al 2040 reducir, reutilizar y reciclar un 100% de los residuos susceptibles de reciclar generados en operaciones mineras.

8. Rol de la minería del cobre en la transición energética

Se podría decir que la minería del cobre tiene un doble rol dentro de la transición energética. Por un lado como activador del uso de energías limpias en el país y por otro proveyendo una materia prima que es componente importante en el funcionamiento de tecnologías limpias como la fotovoltaica, eólica, electromovilidad por mencionar algunas.

Es así como se visualiza a la industria minera del cobre, importante cliente energético, como actor clave en fomentar la incorporación de energías renovables sin emisiones en la matriz energética; que ha mostrado acciones concretas de estar comprometido con la reducción de emisiones GEI; y que ha ido incorporando además la eficiencia energética. Estos componentes, tanto la reducción de emisiones como la eficiencia energética, son claves en lograr una transición energética. Asimismo, se concibe a la producción de cobre refinado como parte importante de la solución frente al desafío global del cambio climático, ya que la transición energética mundial será un gran movilizador de la demanda de cobre, ya que este es un importante componente en la generación de energías renovables, electromovilidad, y por tanto se espera que el consumo de cobre se duplique del nivel actual al 2050¹⁷.

8.1. Acciones para la mitigación del cambio climático

El sector minero del cobre ha mostrado su compromiso para enfrentar la crisis climática con una serie de acciones que ayudan a mitigar el cambio climático, como el reducir sus emisiones GEI aportando así a la carbono neutralidad: estableciendo metas, integrando energías renovables, con apertura y desarrollo de pilotajes de integrar nuevas tecnologías, nuevos combustibles para en un futuro poder integrar electro movilidad, reemplazar diésel, etc.

8.1.1. Metas de carbono neutralidad

En 2021 el Consejo Minero anunció el compromiso de reportar anualmente las metas individuales de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería que son parte del Consejo Minero, convirtiéndose así la minería en el primer sector productivo que asume este tipo de compromiso.

En relación a estas metas individuales (Ver Tabla 6), se puede observar que si bien tienen un objetivo final similar, son de distinto alcance, ya sea a nivel local como global y no hay un único camino estandarizado para lograr carbono neutralidad en las empresas mineras hoy. Dependiendo de las características, estado de avance en la materia y necesidades de cada operación, en algunos casos están definidas como una reducción en el nivel de emisiones y otras incluyen carbono neutralidad, algunas fijan objetivos de corto plazo y otras para horizontes más largos¹⁸.

Se puede observar que estas metas mayormente se basan en las reducciones de emisiones indirectas o de alcance 2, puesto tienen que ver con el uso de energía renovable dado por los nuevos contratos de suministro eléctrico con fuentes renovables, que las empresas mineras han ido entablando en los últimos años con los proveedores de energía.

¹⁷<https://www.guiaminera.cl/maximo-pacheco-en-la-previa-de-asia-copper-week-sostuvo-que-el-cobre-es-parte-de-la-solucion-frente-al-cambio-climatico/>

¹⁸ <https://consejominero.cl/areas-de-trabajo/energia-y-cambio-climatico/>

Tabla 6: Metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de las empresas de la gran minería asociadas al Consejo Minero

Empresa	Meta de reducción de emisiones GEI
Anglo American	Reducción global de 30% al 2030, respecto al 2016, y carbono neutralidad al 2040 (emisiones alcance 1 y 2), con 8 operaciones carbono neutrales al 2030. Reducción de 50% en las emisiones de alcance 3 al 2040.
Antofagasta Minerals	Reducción de emisiones de alcance 1 y 2 en un 30% al año 2025 respecto del 2020 y carbono neutralidad al 2050, o antes si el desarrollo tecnológico lo permite.
Barrick	Reducción global de al menos un 10% al 2030, respecto al 2019.
BHP	Reducción global de alcance 1 y 2 en un 30% al año fiscal 2030, respecto al año 2020, y carbono neutralidad de alcance 1 y 2 al 2050. Para Escondida y Spence, suministro eléctrico 100% con fuentes renovables a partir del año 2025. Respaldo a una reducción del 40% en la intensidad de emisiones de alcance 3 asociadas al transporte marítimo, al año 2030.
Caserones	Cero emisiones de alcance 2 a partir del 2021.
CMP	Reducción de emisiones de alcance 1 y 2 en un 40% al año 2030, en base a las mediciones del año 2020.
Codelco	Reducción de 70% de las emisiones de alcance 1 y 2 al 2030, respecto al 2019, y carbono neutralidad al 2050.
Candelaria	Reducción de emisiones de alcance 2 al año 2024, basado en suministro de energía proveniente como mínimo en 80% desde fuentes renovables.
Collahuasi	Cero emisiones de alcance 2 desde abril 2020 y balance neto de cero emisiones de alcance 1 y 2 al 2040.
Freeport McMoRan	Para América, reducción de 15% de las emisiones por cátodo de cobre al 2030 respecto al 2018. Para el Abra, cero emisiones de alcance 2 al 2021.
Glencore	Reducción global de 15% de las emisiones de alcance 1, 2 y 3 al 2026 con respecto al 2019, y de 50% al 2035, además de carbono neutralidad al 2050.
KGHM	En Sierra Gorda, cero emisiones de alcance 2 a partir del 2023.
Rio Tinto	Reducción global de emisiones de 15% al 2025 y de 50% al 2030, y carbono neutralidad a 2050.
Teck	Reducción de la intensidad de emisiones de 33% al 2030, respecto al 2019, y carbono neutralidad al 2050.

Fuente: Consejo Minero, Diciembre 2022

Esto es una muestra de cómo la gran minería del cobre chilena se ha comprometido públicamente en reducir sus emisiones GEI en la próxima década aportando y estando alineados con los esfuerzos del país para lograr la carbono neutralidad al 2050.

Se puede observar también en Tabla 6 que hay empresas mineras que ya tienen metas de reducción de emisiones alcance 3. Qué y hasta donde se puede considerar como emisión alcance 3 es un tema largamente discutido, en ese sentido, información aclaradora es provista en el estudio lanzado en

2022 llamado: “ Guía sobre emisiones en la cadena de suministro de la minería”¹⁹, el cual fue gestionado y financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) a solicitud del Ministerio de Minería de Chile y elaborado por expertos de un consorcio compuesto por la Corporación Alta Ley, Karungen, SAMMI y LinkMiners, con objeto de generar un marco teórico sobre las emisiones de alcance 3 en la minería del cobre, entregando una caracterización de la organización industrial de la cadena de suministros de los principales insumos y servicios, proponiendo una herramienta de cálculo de emisiones de alcance 3.

También recientemente en noviembre de este año 2023, las principales compañías mineras del país, Anglo American, Antofagasta Minerals, BHP, Codelco, Freeport-McMoRan, Glencore, Teck oficializaron un Acuerdo Marco de colaboración técnica para la conformación de la primera “Mesa de Trazabilidad de Emisiones de Alcance 3”, coordinado por la Corporación Alta Ley, con el fin de disponer un único criterio y homologar los estándares y metodologías existentes para medir las emisiones asociadas a su cadena de proveedores y suministro. Para ello planean desarrollar una guía metodológica estándar para la medición y reportabilidad de las emisiones de alcance 3 aplicado a la realidad de la industria del cobre. El trabajo de la Mesa se irá validando y direccionando en directa colaboración con el Consejo Internacional de Minería y Metales (ICMM), la Organización Internacional del Cobre (ICA) y colaborando con asociaciones como Aprimin, Minnovex, Sonami, entre otros²⁰.

8.1.2. Integración de Energías Renovables

En el contexto de: a) El gran avance en el desarrollo de las energías renovables y de tecnologías para su almacenamiento; b) Que estas energías han ido disminuyendo su costo en los últimos años (haciéndolas más convenientes que algunas energías convencionales); c) Que el país a su vez ha liderado una revolución energética en los últimos años, que ha hecho posible avanzar en mejoras significativas para un escenario energético más eficiente y sustentable, aprovechando el gran potencial del país para la generación de energías renovables y hacer posible la integración actual y futura de esta energía limpia a la matriz energética nacional;

Ha habido y se estima habrá un creciente uso de las energías renovables en el sector minero chileno: La minería del cobre, importante cliente energético, ha realizado esfuerzos por usar energías renovables, integrando estas energías a las operaciones mineras de distinta forma: a) Uso Directo de energías renovables en algún proceso (ejemplo calentamiento soluciones en lixiviación), mediante un proyecto de energías renovables desarrollado por la propia minera para su abastecimiento; b) A través de contratos PPA (Power Purchase Agreements) en los que la minera ha participado en la inversión del proyecto de energías renovables; c) A través de contratos PPA en los que la minera como cliente solicita a su generador que el suministro sea con energías renovables.

¹⁹<https://corporacionaltaley.cl/wp-content/uploads/2022/08/Gui%CC%81a-sobre-emisiones-en-la-cadena-de-suministro-de-la-mineri%CC%81a.pdf>

²⁰ <https://corporacionaltaley.cl>

Esta última forma de integración ha sido la principal opción elegida por las operaciones mineras chilenas con poderosos procesos de renegociación de sus contratos eléctricos, con el objetivo de iniciar contratos con energías renovables y con precios más convenientes. Otras compañías mineras si bien han optado por vender sus acciones en proyectos de energías renovables para concentrarse en el negocio minero, se siguen abasteciendo a través de contratos PPAs de estos proyectos de energías renovables.

Por ello, este año Cochilco decidió integrar nuevas preguntas en encuesta EMPAE relacionadas al suministro de energías renovables en el consumo de electricidad de cada minera y que ha permitido en este informe contabilizar con información provista por las compañías mineras, sobre el porcentaje de uso de renovables dentro del total de consumo eléctrico del sector.

Tabla 7: Suministro de energías renovables por tamaño de operación minera del cobre en el 2022

Tipo de Minería	N° de Operaciones	Consumo Electricidad (TJ)	N° de Operaciones con PPA suministro de ER	PPA con suministro ER registrados en RENOVA	Electricidad suministrada con ER (TJ)
Gran Minería Estatal	8	25.216	1	0	4.909
Mediana Minería Estatal	6	971	6	1	961
Gran Minería	21	67.361	17	13	57.192
Mediana Minería	18	4.148	10	9	2.277
TOTAL	53	97.696	34	23	65.339
	Porcentaje (%)		64%	43%	67%

Fuente: Cochilco en base a datos EMPAE 2023

En Tabla 7 se puede observar que la totalidad de las operaciones de la mediana minería estatal Enami, ya tiene en el 2022 suministro eléctrico con energías renovables en un 100%, le sigue la gran minería del cobre en que la mayoría de sus operaciones (81%) ya cuentan con suministro renovable, y este representa el 85% de su consumo eléctrico, en tanto un 56% de las operaciones de la mediana minería tienen ya integrado un suministro renovable que representa un 55% del consumo eléctrico de ese segmento, Codelco tiene una de sus operaciones con contrato de suministro renovable y este suministro representa el 13% de su consumo eléctrico total. Es así como la minería del cobre chilena tiene un 64% de sus operaciones con contratos con energías renovables que suministran el 67% de la demanda eléctrica total del sector minero.

Ahora bien, hoy en día dada la estructura de nuestro sistema eléctrico es bastante complejo identificar o correlacionar una unidad de generación de la matriz energética con el consumidor final (en este caso la minería) y pueden haber por ejemplo eventuales restricciones en la transmisión, cuando se producen congestiones en la transmisión. Por tanto estos contratos que el proveedor ofrece de energías renovables debieran ser certificados y o trazados.

Es así como el Coordinador Eléctrico Nacional, apoyado por el Ministerio de Energía, está implementando RENOVA²¹, un sistema de trazabilidad para acreditar que los contratos de suministro eléctrico basados en energías renovables que cumplen con esta condición y a la vez

²¹ <https://www.coordinador.cl/renova/>

reconocer el atributo cero emisión de la electricidad generada de fuentes renovables. Para evitar conflictos de doble contabilidad, RENOVA generó una metodología para determinar también un factor de emisión residual de la red eléctrica basado en el Greenhouse Gas Protocol (GHG) Protocol.

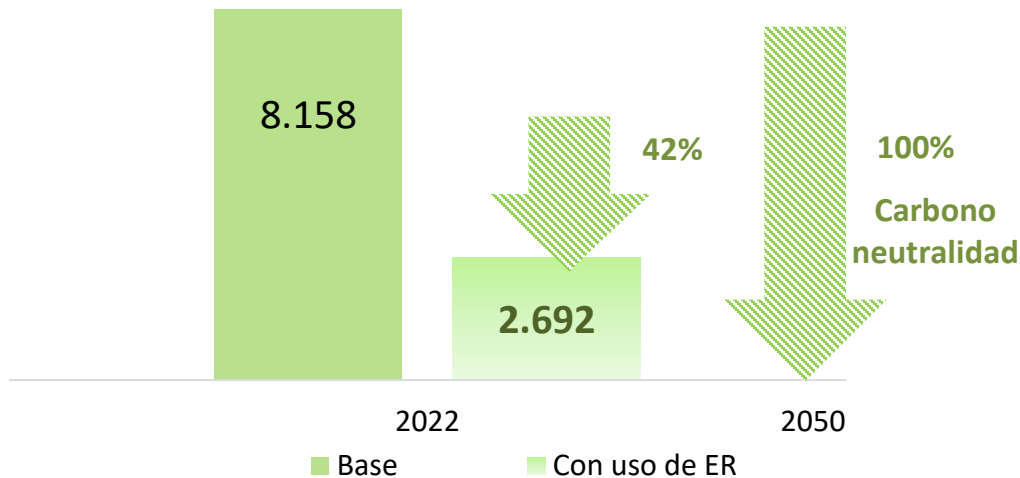
De los contratos de suministro con energías renovables, la gran minería tiene un 62% de estos PPAs registrados en RENOVA, le sigue la mediana minería con el 50% de sus contratos también registrados en este sistema. En minería estatal, la mediana minería tiene una operación con registro Renova y Codelco aún no está con registro Renova en el año 2022.

8.1.3. Reducción de emisiones alcance 2

La integración de las energías renovables en minería del cobre le permite reducir las emisiones GEI en las operaciones mineras y así poder dar cumplimiento a los públicos compromisos que ha realizado el sector como lograr una carbono neutralidad en un futuro cercano.

Como se puede observar en Tabla 7, en el año 2022 el uso de energías limpias sin emisiones en las operaciones mineras del cobre representa el 67% del total de electricidad consumida por el sector. Es así como en términos de GEI indirectos, el uso de estas energías limpias implica una reducción de 5.455,8 ktCO²eq. que restándolos al total de emisiones GEI indirectos de la minería del cobre de 8.157,6 ktCO²eq. en el 2022 (Ver Sección 4), se podría estimar que la minería del cobre tuvo un total de emisiones GEI de alcance 2 de 2.701,8 ktCO²eq. ese año.

Figura 27: Emisiones GEI Alcance 2 (Kt CO2 eq.) en minería del cobre



Fuente: Elaboración propia en base a información pública, octubre 2022

8.1.4. Progresiva implementación de la eficiencia energética

Cabe señalar, que si bien esta integración de energías renovables en la matriz energética nacional es muy positivo para un desarrollo sustentable del sector minero, este suministro creciente con fuentes limpias debe complementarse con un mejoramiento continuo de la eficiencia energética y con una gestión de la energía en una minería sustentable líder en la mitigación al cambio climático, Actualmente la Ley de Eficiencia Energética promulgada el 2020 por el Ministerio de Energía establece que el sector minero, entre otros principales consumidores de energía en el país, debe realizar una gestión activa del consumo de energía por lo que deberá implementar sistemas de gestión de energía y además deberá reportar sus parámetros energéticos anualmente para su debida fiscalización, con los que el Ministerio elaborará anualmente un reporte público. Con esto se busca promover mejoras continuas y reducción de emisiones.

En la materia, cabe destacar que en 2015 el Consejo Minero (CM), como representante de la gran minería, Codelco y el Ministerio de Energía, firmaron un Convenio de colaboración orientado a impulsar un uso cada vez más eficiente de la energía en las empresas que componen esta asociación y a fomentar iniciativas que contribuyan a la innovación y la cultura en el buen uso de la energía. Es así como el sector minero fue el primero en firmar un acuerdo de este tipo, anticipando la implementación de las normas que se establecerían años después. Dentro de los principales compromisos de este Convenio estuvieron: a) las auditorías energéticas que empresas mineras realizaron con el objetivo de identificar oportunidades de mayor eficiencia energética relacionadas con mejoras operacionales, mantenimiento, reemplazo de equipos e introducción de nuevas tecnologías; b) Compromiso de implementar Sistemas de Gestión de Energía con estándares internacionales o fortalecer sistemas de este tipo con los que ya cuentan; c) Reportar informes de avances en materia de eficiencia energética.

En el año 2018, la Subsecretaría de Energía, la Subsecretaría de Minería y La Agencia Chilena de EE (hoy Agencia de Sostenibilidad Energética) suscribieron con SONAMI un Convenio de Cooperación que involucra: a) Promoción e incorporación de sistemas de gestión; b) Identificación de oportunidades para la incorporación de nuevas capacidades y tecnologías; c) Apoyo a la ejecución de proyectos de investigación aplicada y de pilotaje; d) Promoción y el desarrollo de actividades y prácticas que conduzcan al uso eficiente de la energía (ministerio de energía, 2022).

Otro importante avance público privado en la materia se puede ver en página web del *Proyecto eficiencia energética en la minería* <https://www.energiaenmineria.cl/>, ejecutado entre el 2019 y 2022, financiado por Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza, Seguridad Nuclear y Protección al Consumidor de Alemania (BMUV) gestionado por GIZ Chile, habiendo sido contrapartes el Ministerio de Energía de Chile y la Agencia de Sostenibilidad Energética.

Este Proyecto consideró la creación de una Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones en el sector minero en Chile, en el que el objetivo común es mejorar gestión energética de mineras o implementar medidas de eficiencia energética, valiéndose para lograrlo del intercambio de experiencias, problemáticas y recursos mutuos. De este grupo de trabajo se recopiló una serie de

medidas de eficiencia energética aplicables a distintos procesos mineros que están publicadas en el sitio web.

Cochilco estimó que en el año 2022, el 92% del sector minero del cobre está afecto a la Ley de eficiencia energética, el 72% de las operaciones mineras de cobre ya tienen sus sistemas de gestión de energía implementados, adelantándose así a lo exigido por la Ley en el 2023-2014. Sin embargo, un 79% de las empresas mineras identifican brechas para tener su sistema de gestión energético totalmente implementado²². Por tanto es importante que la industria minera del cobre siga incrementando la eficiencia energética en uso de electricidad y combustibles en aquellas faenas que ya han comenzado en esta senda, y desarrollar esta línea de trabajo en las faenas donde no se ha implementado aún, de esa forma también reducirá sus emisiones GEI. Por ello el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y dentro de sus divisiones, con la eficiencia energética es relevante, ya que permitirá la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo así el negocio minero en su conjunto.

8.1.5. Otras iniciativas

Hay diversas iniciativas en desarrollo que ambicionan reemplazar el uso de combustibles fósiles como el diésel en procesos mineros, ya sea por combustibles con menores o sin emisiones GEI, o bien electrificando procesos. De lograr ser exitosas estas iniciativas en el tiempo, validarse y así lograr extrapolarla a diferentes operaciones mineras, podrían impactar con una importante reducción de las emisiones directas. Entre estas iniciativas están el uso de hidrógeno verde y la electromovilidad por mencionar las principales.

En relación al uso de hidrógeno verde, la minería del cobre ha participado en las convocatorias que CORFO ha realizado para proyectos con el potencial de usar este nuevo combustible para el reemplazo del diésel en transporte en proceso mina (mina rajo/mina subterránea), tales como: a) Proyecto de camiones duales (hidrógeno verde-diésel) usado para transporte de carga; b) Proyecto para adaptar la operación de cargadores frontales de la minería subterránea de diésel a hidrógeno, mediante celdas de combustibles sin emisiones; c) Proyecto vehículos mineros (batería-hidrógeno verde) que busca desarrollar módulos de trenes de potencia híbridos que puedan emplearse también en camiones mineros.

Es así como estos proyectos y otros en la misma línea, han contado con el apoyo de diversas mineras como Codelco, Sierra Gorda, Antofagasta Minerals, Collahuasi, Anglo American entre otras, donde ya en el 2022 hay prototipos desarrollados, en tanto otros proyectos se están estudiando, evaluando y/o desarrollando, con todo, de ser factibles técnica/económicamente y dar buen resultado, podrían permitir introducir estas nuevas tecnologías a nivel industrial minero.

También ya hay iniciativas de las faenas mineras para usar hidrógeno verde en otros procesos: el caso de Minera Spence con su proyecto piloto en electroobtención, que busca generar hidrógeno en reemplazo diésel y gas natural en calderas de agua caliente; asimismo están Minera San Pedro

²² Estudio Consumo de Energía de la minería del cobre chilena al 2022, Cochilco 2023

con el Centro Nacional de Pilotaje que ya iniciaron construcción de planta de hidrógeno verde (operativa en marzo 2023)²³, para suministrar energía eléctrica a su campamento minero. Este proyecto permitirá tener capacidades permanentes para validar y pilotear tecnologías en base a hidrógeno verde en las instalaciones de Minera San Pedro, que al ser una pequeña minera tiene mayor flexibilidad para probar o incorporar de forma dinámica nuevas tecnologías, e innovaciones en base a hidrógeno verde en sus procesos mineros²⁴.

Chile ya cuenta con una Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde²⁵ con el objetivo de generar a futuro una industria de hidrógeno verde a precios competitivos. Ahora bien, cabe señalar que la producción de hidrógeno verde, su normativa y tecnologías que lo usen, está aún en vías de desarrollo. Por ello, otras alternativas de desarrollo de nuevas tecnologías para transporte bajo en emisiones en mina, además del uso del hidrógeno verde, han sido discutidas y planteadas por empresas mineras y expertos mineros como por ejemplo en presentaciones realizadas en la red de aprendizaje de eficiencia energética en minería (ver sección siguiente para más detalle de esta red) y dentro de las cuales están tener transporte de carga u otro, exclusivamente con baterías, o con el uso de catenarias, que podrían ser parte de la solución de transporte pesado para la minería, así como el futuro uso de combustibles sintéticos, que podrían ayudar a la transición de los motores diésel a motores o dispositivos de baja emisiones²⁶.

En esta línea, está el estudio anunciado por Antucoya en 2022 que verá la factibilidad de modificar camiones CAEX a equipos 100% eléctricos a través de la incorporación de pack de baterías en reemplazo del motor diésel, además de validar el sistema de electrificación de ellos, reemplazando así el consumo de diésel en estos camiones.

De lo anterior, se puede observar que estas iniciativas están aún en etapa de planificación, estudio o de desarrollo de prototipos, pilotos y pruebas, que además necesitan considera el tiempo de tramitación de permisos sectoriales respectivos, por lo que a juicio de expertos, estas iniciativas se visualizan como opciones más al mediano y largo plazo.

Por otro lado, la Ley de eficiencia energética también ha impulsado la electromovilidad. La electromovilidad en transporte liviano es otra iniciativa para reemplazar combustible y así conjuntamente con una matriz eléctrica más limpia, se reducen emisiones GEI. Ejemplos de ello son el uso de taxis y buses eléctricos para el traslado de trabajadores y de equipos en zonas de operación, probando además rutas que tienen ciertas complejidades como por ejemplo caminos con nieve durante el invierno, enfrentando así vehículos eléctricos a condiciones reales de una operación minera con el fin de validar variables tecnológicas, de negocios y de sustentabilidad. Lo anterior, contribuirá a entender la nueva tecnología e identificar los desafíos para extrapolarla, incorporarla y escalarla otros procesos. También progresivamente se han ido introduciendo equipos como palas y sistemas de tracción de camiones eléctricos. Estas alternativas de electromovilidad en

²³ Reportaje minería chilena, SEC autoriza construcción de planta de hidrógeno verde para proveer energía a campamento minero, noviembre 2022

²⁴ <https://pilotaje.cl/minera-san-pedro/>

²⁵ https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf

²⁶ <https://4echile.cl/noticias/webinar-analizara-alternativas-de-transporte-bajo-en-emisiones-para-mineria/>

minería se visualizan ya al corto y mediano plazo tal como lo indica el reciente estudio de septiembre 2022: "Oportunidades de negocio para la transición energética en la minería chilena"²⁷, realizado en por el Centro Nacional de Piltaje, la consultora Phibrand y la Universidad técnica Federico Santa María.

Cochilco estimó además, que en el año 2022, el 86% de las operaciones de la gran minería del cobre ya cuentan con planes de electromovilidad y/o transporte bajo en emisiones. En Codelco el 75% de sus operaciones ha avanzado en esta dirección, en tanto en la mediana minería, el 50% de sus operaciones cuentan con avances en la materia, mientras que Enami aún no tiene planes de electromovilidad implementados²⁸.

8.2. Cobre como materia prima en la transición energética

Tal como lo plantea la Política Nacional Minera 2050 el cobre es esencial para dar el salto definitivo hacia la carbono neutralidad. La electrificación y digitalización a nivel mundial, las energías renovables y sus sistemas de almacenamiento, la electromovilidad que son elementos fundamentales para lograr la carbono neutralidad, tienen un uso intensivo en minerales y por tanto serán los principales impulsores de la demanda en los próximos años de minerales como el cobre entre otros. Por tanto el cobre es y será necesario para las transiciones energéticas que se están dando y que se espera incrementarán en el mundo.

Ahora bien, ante esta mayor demanda esperada de cobre y otros minerales, se tornará de gran relevancia el poder garantizar el suministro y además, con la exigencia de tener una explotación y producción sustentable de estos, que pueda requerírsele trazabilidad para exportarlos, acorde a los nuevos paradigmas mundiales de la actualidad.

Es así como, cobra gran importancia, las alternativas de suministro de estos minerales, ahora estratégicos en la transición energética mundial. Una importante alternativa es el re uso y reciclaje, pero presenta desafíos y ya hay opiniones internacionales como la de la OECD en sus reportes en el tema, que estas alternativas no serán suficiente, además, es posible que los materiales secundarios no siempre sean menos contaminantes que los materiales primarios, según el producto específico y los procesos relacionados que se lleven a cabo²⁹. En la pasada Conferencia Convenio UE-América Latina sobre Raw Materials en noviembre 2022, se presentaron algunos desafíos del reciclaje: En el proceso de recuperación igual hay pérdida de metal deseado; tiene costo ambiental y económico; atenúa la demanda pero no la substituye.

De todas formas, hay que seguir aunando esfuerzos para lograr la carbono neutralidad y será muy importante fomentar y desarrollar una economía circular en Chile, que también puede abrir nuevas formas de negocio y crecimiento económico con altos estándares ambientales y sociales, si teniendo

²⁷https://www.phibrand.com/wp-content/uploads/2022/10/11_10-Informe-Final-Estudio-Transicio%CC%81n-Energe%CC%81tica.pdf

²⁸ Estudio Consumo de energía en la minería del cobre chilena al 2022, Cochilco 2023

²⁹ Source: Summary report - OECD workshop on international trade and circular economy, 2020

en cuenta de que el reciclaje por sí solo, está lejos de poder satisfacer la demanda actual de cobre y otros minerales, ni la futura en el más optimista escenario³⁰.

Chile y su minería del cobre que han colocado esfuerzos de los que ya se ven concretos resultados en su reducción de emisiones y yendo en comprometido y rápida vía de la carbono neutralidad, tiene en este nuevo contexto de transición energética mundial, una gran ventaja de poder suministrarle al mundo un cobre con altos estándares ambientales y sociales.

³⁰ Cesco en el Asia Copper Week 2022

9. Comentarios Finales

Emisiones a nivel total país

- Durante el año 2022 se registraron emisiones de GEI por un total de 14.576 mil toneladas de CO₂ equivalente en la minería del cobre en Chile, distribuidas en 6.418 mil por GEI directos (44,0% del total de emisiones de la minería del cobre) y 8.158 mil por GEI indirectos (56,0% del total).
- Comparando el 2022 con el año 2021, el nivel de emisiones GEI totales tuvo una disminución del 14,1%. Comparando con el año 2017, las emisiones totales fueron un 29,1% menores, variación que implica una disminución de 5.993 mil toneladas de CO₂ equivalente. Esto se atribuye principalmente a una caída del 44,1% en las emisiones indirectas, lo que a su vez se explica al efecto de usar el nuevo factor de emisión del SEN (factor que es producto de la fusión de las emisiones del SING y del SIC) que en el 2022 tiene un valor de 0,3006 tCO₂ eq/MWh, que es un 61,1% menor que el factor de emisión del SING del año 2017 y un 10,6% menor que el factor emisión SIC del año 2017. Cabe señalar que en el SING (Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta) está concentrada mayormente la producción de cobre.

Emisiones por región

- Antofagasta es la región con mayor nivel de emisiones por minería del cobre, con 8.586 mil toneladas de CO₂ eq. que representa el 58,9% del total durante el año 2022 (un 45,7% proviene de emisiones directas y un 54,3% de las indirectas). Esta situación se debe a que Antofagasta es la principal región cuprífera del país, pero también a las restricciones hídricas y demás factores estructurales que afectan a la minería del cobre en la zona.

Emisiones por proceso

- A nivel agregado por proceso, Mina rajo lidera las emisiones GEI totales con 5.528 mil toneladas de CO₂ eq. que representa el 37,9% del total en 2022 (un 6,9% proviene de emisiones indirectas y un 93,1% de directas). Entre el 2010 al 2022 este proceso ha aumentado sus emisiones en un 54,7%, básicamente debido a temas estructurales que enfrenta la minería como lo es el envejecimiento de las minas.
- El segundo proceso con mayor emisión total de GEI en el 2022 es el de Concentración, con 4.402 mil ton de CO₂ eq. lo que representa un 30,2% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 97,3% proviene de emisiones indirectas y un 2,7% de directas). En tanto entre el 2010 y 2022, las emisiones de este proceso sólo aumentaron un 3,0% pese a que la producción de

concentrados aumentó un 26% y este proceso se caracteriza por ser altamente intensivos en el uso de electricidad y agua, lo que –en las regiones más áridas- incentiva al uso e impulsión de agua de mar hacia las faenas mineras, aumentando considerablemente los requerimientos de energía eléctrica, por tanto en términos de emisiones, se ve reflejado la integración de energías limpias sin emisiones en la matriz eléctrica nacional.

Emisiones GEI directas e indirectas

- En término de emisiones GEI directas, el proceso que mayor emisión tiene en el 2022 es el de mina rajo con 5.144 mil ton de CO₂ eq., lo que representa el 80% de las emisiones directas de la minería del cobre.
- Es así como en la mina rajo se cuantifica la mayor emisión de GEI directos, producto del uso intensivo de diésel por parte del proceso de acarreo y transporte. Este proceso utiliza cerca del 88% de todo el diésel consumido por la minería del cobre en Chile. Ahora bien, cabe señalar que en los últimos años se han promocionado una serie de programas de innovación tecnológica que permitirían el reemplazo parcial del combustible por otros más económicos y menos contaminantes como el hidrogeno verde, lo que contribuiría a la reducción sostenida de emisiones de GEI directos.
- En término de emisiones GEI indirectas, el proceso que mayor emisión tiene es el de concentración, con 4.283 mil ton de CO₂ eq., lo que representa el 53% de las emisiones indirectas de la minería del cobre.

Emisiones Industria del cobre a nivel país

- En relación al coeficiente unitario global de las emisiones totales de GEI de la minería del cobre a nivel nacional, para el 2022 es de 2,7 toneladas de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido. En tanto el coeficiente unitario de las emisiones directas de GEI de la minería del cobre a nivel nacional, es de 1,2 toneladas de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido y el de emisiones indirectas es de 1,5 ton de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido.
- En el Quinto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (BUR) 2022, que es el último informe a nivel país elaborado de emisiones GEI, se muestran las cifras del “Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2020”. Este documento expone que las emisiones totales de Chile en el 2020 son de 105.522 mil toneladas de CO₂ eq., señala que las emisiones de la minería del cobre son 5.492 mil toneladas de CO₂ eq, lo que representa un

5,2% del total nacional en el 2020. Las emisiones de alcance 2 de minería del cobre no son consideradas en dicho informe.

- Al comparar las emisiones de alcance 1 y 2 de la minería del cobre del año 2020 calculadas por COCHILCO en relación a los 105.522 mil toneladas de CO₂ eq emitido por Chile, se tendría que las emisiones directas o de alcance 1 de la minería del cobre representan el 5,9% del total en tanto las emisiones indirectas o de alcance 2 de la minería del cobre representarían el 9,7% del total nacional de emisiones GEI al año 2020. Es así como las emisiones totales de la minería del cobre serían un 15,6% de las emisiones GEI totales a nivel país en el 2020.

Camino a la transición energética

- Ante la crisis climática mundial Chile se ha comprometido fuertemente. Ha establecido por Ley la carbono neutralidad y que además de asegurar el suministro, da prioridad a mitigar el cambio climático aprovechando las excelentes condiciones para el funcionamiento de energías renovables, fomentando su incorporación, impulsando la descarbonización, estableciendo criterios de uso eficiente de la energía, dentro de un mercado energético estable con un marco regulatorio sólido que ha logrado trascender a los gobiernos convirtiéndose en políticas de Estado, con énfasis en que esta transición sea justa y sustentable con consenso social y sobre la importancia de llevar todos los esfuerzos para una pronta transición energética.
- En este contexto de transición energética en Chile, sectorialmente en los trabajos de la Política Nacional Minera 2050 y de Minería Verde se encuentran lineamientos concretos para el sector minero, que apuntan a lograr: la ambiciosa meta de la carbono neutralidad del sector; y hacer crecer en el país el modelo de economía circular a través de minería secundaria; ambos componentes importantes en la transición energética chilena.
- Se podría decir que la minería del cobre tiene un doble rol dentro de la transición energética.
 - ✓ Por un lado, al ser un importante cliente energético (33,4% del consumo eléctrico nacional el 2022) ha ayudado a impulsar el uso de energías renovables en el país al integrar estas en su suministro eléctrico (aprox. 65.339 TJ en 2022), lo que representa el 67% de demanda eléctrica minera del cobre proviene de energías limpias, lo que se traduciría en una reducción de emisiones GEI de 5.466 KtCO₂ eq. en 2022 del sector.
 - ✓ Asimismo, el cobre es una materia prima que es componente importante en el funcionamiento de tecnologías limpias como la fotovoltaica, eólica, electromovilidad por

mencionar algunas. Por tanto el suministro de cobre se vuelve clave y estratégico para lograr una transición energética en Chile y el mundo.

Perspectivas futuras

- La gran minería del cobre chilena se ha comprometido públicamente en reducir sus emisiones GEI en la próxima década aportando y estando alineados con los esfuerzos del país para lograr la carbono neutralidad al 2050, siendo así pioneros en establecer este tipo de metas. Mayormente estas metas se basan en las reducciones de emisiones indirectas o de alcance 2, puesto tienen que ver con el uso de energía renovable dado por los nuevos contratos de suministro eléctrico con fuentes renovables, que las empresas mineras han ido entablando en los últimos años con los proveedores de energía.
- A medida que las energías renovables han ido disminuyendo su costo, se van desarrollando tecnologías de almacenamiento y la matriz energética SEN va adquiriendo flexibilidad para incorporar estas energías, ello ha facilitado una matriz más limpia y competitiva, y posibilita una minería con menores emisiones de alcance 2. Estos incentivos generan un círculo virtuoso entre la minería y el sector energético.
- Es así como si bien las necesidades energéticas del sector minero del cobre han ido aumentando y se espera por temas estructurales que enfrenta la minería, aumenten en el tiempo y por tanto de igual forma se incrementen sus emisiones GEI, en relación a las emisiones indirectas o de alcance 2, se espera vayan reduciéndose a niveles cercanos a cero al 2050 basado en que la electricidad requerida por el sector minero del cobre provenga de fuentes renovables en un futuro.
- Para que esto ocurra, es esencial que Chile aborde desafíos como mejorar: la transmisión e integración de la energía renovable a la matriz; la flexibilidad del sistema; la planificación territorial de generación; y más sistemas de almacenamiento entre otros.
- En la medida que se integren energías renovables, tanto directamente en procesos mineros así como en la matriz energética del país, las emisiones GEI de la minería del cobre irán disminuyendo en un futuro.
- En términos de reducir emisiones directas o de alcance 1 hay diversas iniciativas en desarrollo que ambicionan reemplazar el uso de combustibles fósiles como el diésel en procesos mineros, ya sea por combustibles con menores o sin emisiones GEI, o bien electrificando procesos. Entre estas iniciativas están el uso de hidrógeno verde en transporte de carga y la electromovilidad por mencionar las principales.

- La mayoría de estas iniciativas están aún en etapa de planificación, estudio o de desarrollo de prototipos, pilotos y pruebas, que además necesitan considerar el tiempo de tramitación de permisos sectoriales respectivos, por lo que se visualizan como opciones más al mediano y largo plazo.
- En tanto, la electromovilidad en transporte liviano o en otros equipos como palas y sistemas de tracción de camiones eléctricos están avanzando aceleradamente y se visualizan ya al corto y mediano plazo. Ya en 2022, el 86% de las operaciones de la gran minería del cobre ya cuentan con planes de electromovilidad y/o transporte bajo en emisiones.
- Si bien la integración de energías renovables es muy positivo para un desarrollo sustentable del sector minero y reducir emisiones GEI, este suministro creciente con fuentes limpias debe complementarse con un mejoramiento continuo de la eficiencia energética. Hoy el país cuenta con la Ley de Eficiencia Energética, que mandata a los principales consumidores de energía en el país, entre los cuales está el sector minero, a realizar una gestión activa del consumo de energía, implementar sistemas de gestión de energía y reportar sus parámetros energéticos anualmente para su debida fiscalización, con esto se busca promover mejoras continuas y reducción de emisiones.
- En la materia, la industria minera ha realizado esfuerzos y logrado avances. En el 2022, el 92% del sector minero del cobre está afecto a la Ley de eficiencia energética, el 72% de las operaciones mineras de cobre ya tienen sus sistemas de gestión de energía implementados, adelantándose así a lo exigido por la Ley.
- Con todo, es importante que la industria minera del cobre siga incrementando la eficiencia energética en aquellas faenas que ya han comenzado en esta senda y desarrollar esta línea de trabajo en las faenas donde no se ha realizado aún. Por ello que el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras (en cada una de sus divisiones) con la eficiencia energética es relevante, ya que permitirá la transferencia de mejores prácticas en este ámbito.
- Dado la transición energética en el país, si esta persiste al igual que continúan los esfuerzos de las mineras por lograr la carbono neutralidad, y además si el mundo logra dar suministro continuo y sustentable de los materiales necesarios para una transición energética, existe una buena probabilidad de lograrse los objetivos propuestos de tener una minería que mitigue el cambio climático y cumpla con estándares de minería verde.

Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por:

Rossana Brantes Abarca

Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Patricia Gamboa Lagos

Directora de Estudios y Políticas Públicas

Diciembre / 2023