



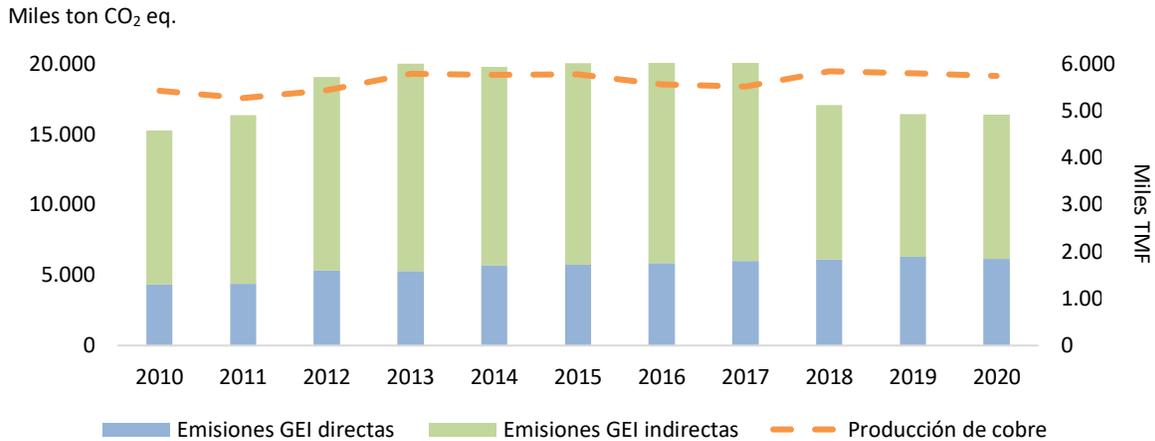
Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2020

DEPP 25/2021

Resumen Ejecutivo

Durante el año 2020 se registraron emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por un total de 16.357 mil toneladas de CO₂ equivalentes distribuidas en 6.138 mil por GEI directos (37,5% del total de emisiones de la minería del cobre) y 10.219 mil por GEI indirectos (62,5% del total).

Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile, 2001 -2020



Fuente: Cochilco

En suma, al 2020, las emisiones totales fueron un 20% menores a las registradas durante 2017, un 4% menor que en 2018 y un 0,3% menos que en 2019. La evidente y marcada baja de emisiones respecto al 2017 se atribuye principalmente a la caída en un 30% en las emisiones indirectas respecto al 2018, lo que a su vez se explica por la baja importante en el factor de emisión del nuevo Sistema Eléctrico Nacional (SEN) 2020 de 0,3834 tCO₂ eq/MWh que es un 50,4% menor con respecto al factor de emisión del SING en el 2017, sistema del que se suministraba la mayor parte de la minería del cobre hasta el 2017. Entre el 2018 y 2020 las emisiones se han mantenido prácticamente. Ahora bien, con respecto al año 2010 en cambio, se ha registrado un aumento del 7,3% en las emisiones totales en tanto la producción se ha mantenido relativamente estables, aumentando un 5,8% en el período. El aumento en las emisiones en el período analizado se atribuye mayormente 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.

En cuanto a los procesos, el de mayores emisiones totales durante 2020 fue el de concentración con 5.538 mil toneladas de CO₂ eq., que representa el 33,9% del total de la minería del cobre (un 98% de las emisiones de este proceso son indirectas por el uso intensivo de electricidad). El segundo proceso con mayor emisión total de GEI en el 2020 es el de Mina Rajo, con 5.376 mil ton de CO₂ eq., lo que representa un 33% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 91% proviene de emisiones directas por el uso intensivo diésel como combustible).

A nivel regional, Antofagasta es la región con mayor nivel de emisiones por minería del cobre, con 9.425 mil toneladas de CO₂ eq., que representan el 57,6% del total de emisiones de la minería del cobre durante el año 2020 (un 39,7% proviene de emisiones directas y un 60,3% de las indirectas).

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 en un futuro basado en que la electricidad requerida por el sector minero del cobre provenga de fuentes renovables en un futuro. Por un lado, hasta ahora 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, es así como el factor emisión SEN disminuye año a año y posibilita una minería con menores emisiones de alcance 2. Estos incentivos generan un círculo virtuoso entre la minería y el sector energético. El sector minero, importante cliente energético ha realizado esfuerzos por concretar nuevos contratos con generadoras por energías 100% renovables y a costos de suministro cada vez más competitivos, ello es y será importante para el impulso de las energías renovables en la matriz energética chilena. Estos esfuerzos tanto del país como del sector minero por un suministro eléctrico con energías limpias de carbono se verán reflejados en un futuro cercano en una industria minera que puede liderar la mitigación al cambio climático logrando la carbono neutralidad por concepto de consumo de electricidad del sector.

Tabla de contenidos

Resumen Ejecutivo	2
1. Introducción	5
2. Metodología	5
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	16
3.5. Coeficientes Unitarios de emisión de GEI directos en la minería del cobre en Chile	17
4. Emisión de GEI Indirectos en la Minería del Cobre en Chile	18
4.1. Sistema Eléctrico Nacional	19
4.2. Emisión Total de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile	20
4.3. Emisión de GEI Indirectos por proceso en la minería del cobre en Chile	22
4.4. Emisión de GEI Indirectos por Región en la minería del cobre	24
4.5. Coeficiente Unitario de emisión de GEI indirectos en la minería del cobre en Chile	26
5. Emisión de GEI Totales en la minería del cobre en Chile	26
6. Emisiones GEI minería del cobre en el contexto nacional	30
7. Comentarios Finales	31

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, 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 50 operaciones mineras, entre las que se encuentran gran y mediana minería, fundiciones y refinерías, en el año 2020 llegó al 99% de la producción de cobre nacional. Lo anterior corresponde a un porcentaje alto de cobertura, sin embargo es crucial que siga el compromiso del sector minero del cobre y poner énfasis en la calidad de los datos entregados, para poder seguir con esta línea de trabajo que transparente y acerca a la ciudadanía la realidad de emisiones del sector y su real impacto e importancia en el país, 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 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 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:

- *EmisionesCO₂*: Emisiones de Carbono (ton. CO₂).
- *EC_j*: Energía consumida en el combustible *j* (TJ).
- *FE_j*: Factor de emisión del combustible *j* (ton C/TJ).
- *FOC_j*: Fracción de carbono oxidado de combustible *j*.
- *44/12*: Relación entre los pesos moleculares del Dióxido de Carbono (CO₂) 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.

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

² 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.

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 global³ del gas i . Corresponde a 21 y 310 para CH_4 y N_2O respectivamente (IPCC 2006).

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.

³ 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, es por ello que para expresarlas como emisiones de CO_2 equivalentes se multiplican por esos factores respectivamente.

Tabla 2 Factores de emisión de CH4 y N2O

Tipo de Combustible	Uso	Factor de Emisión CH ₄	Factor de Emisión N ₂ O
		(Kg/TJ)	(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 de Alcance 2, 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).
- *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

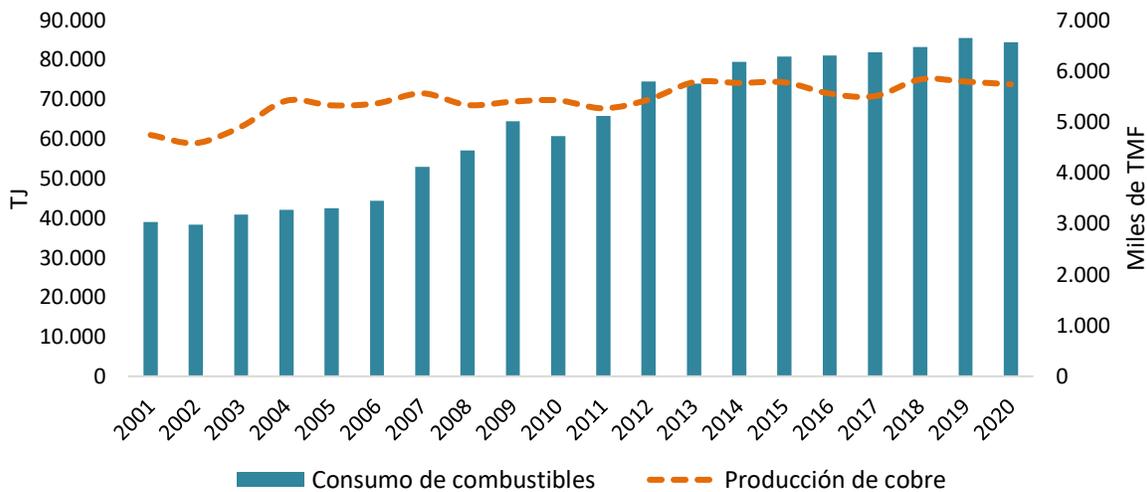
En las secciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 se presentan los consumos de combustibles y emisiones asociadas, los tipos de combustibles usados, los procesos mineros asociados y su emisión por región. Junto con ello, se presenta la cuantificación de emisiones de GEI directos siguiendo los mismos criterios.

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 más que duplicado desde el 2001, en tanto la producción de cobre en igual período se incremento en un 21,0%. Sin embargo, en los últimos seis años el consumo de combustible se ha mantenido más bien estable, en efecto, entre 2014 y 2020 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 – 2020.

Figura 1 Consumo de energía en base a combustibles y producción en la minería del cobre, 2001 – 2020



Fuente: Cochilco.

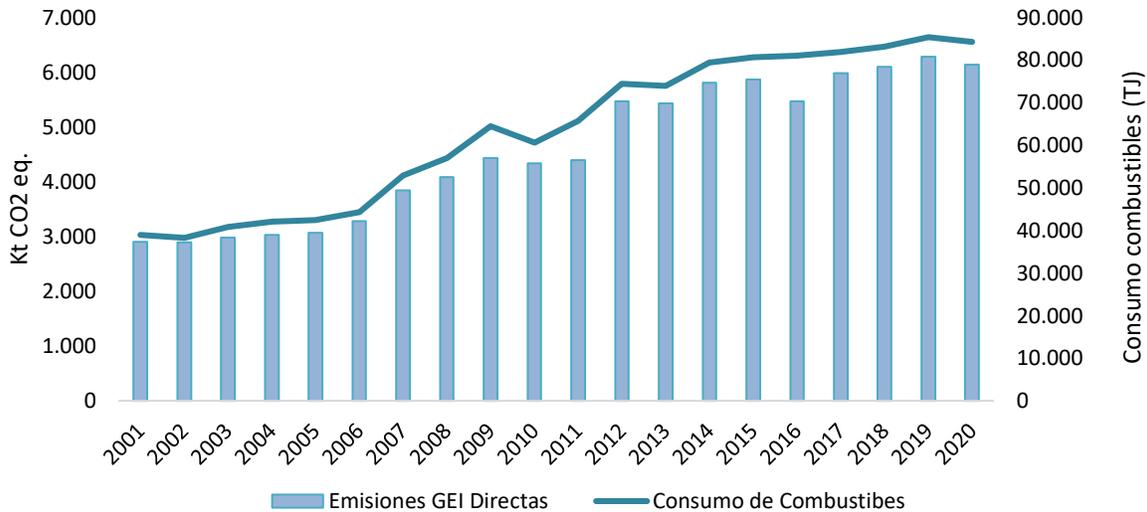
El principal factor que explica las menores tasas de crecimiento en el consumo de combustible entre el 2014 y 2020 es el menor nivel de producción agregada de cobre fino. Este en el período se mantuvo estable sin crecimiento versus el crecimiento de 1,8% anual entre el 2001-2013.

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 2020 representó el 78,3% del total de combustibles usados en minería y dentro del proceso mina rajo el consumo de diésel representó el 99,9%. 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 2020, el diésel usado en mina rajo representa un 87,4% 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 5,6% entre 2001 al 2013 y a una tasa promedio anual del 1,9% entre 2014 y 2020, llegando así al 2020 con un total de 6.138,2 ktCO₂ eq. .

Figura 2 Emisiones de GEI directas y consumo de combustibles de la minería del cobre en Chile, 2001 -2020



Fuente: Cochilco.

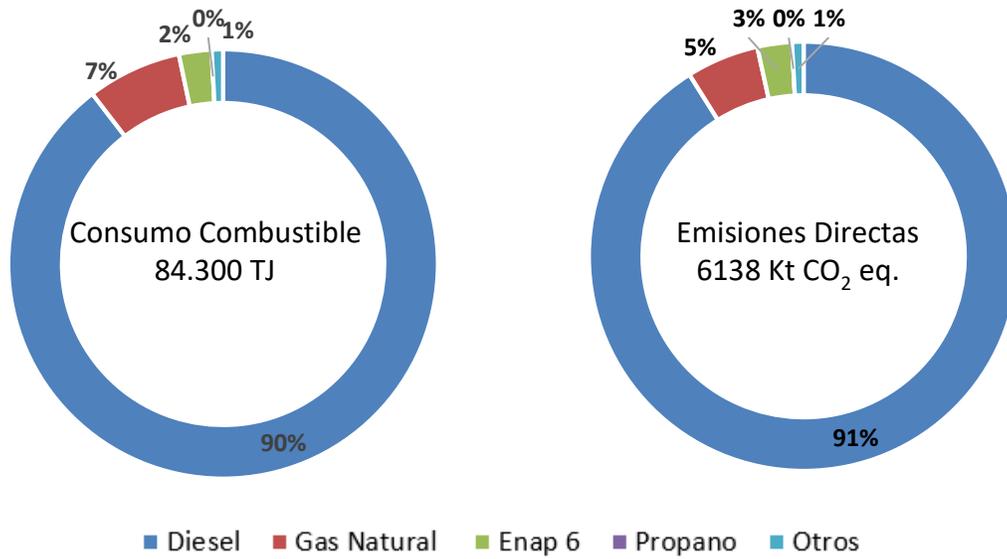
Al analizar el período completo, las emisiones de GEI directas se han duplicado en la minería del cobre aumentando un 111,2% al 2020 versus el ya mencionado aumento de la producción de cobre en igual período en un 21,0 %.

3.2. Emisión de GEI Directos por Tipo de Combustible

Dentro de los tipos de combustibles usados en minería del cobre, en el 2020 se observa que el diésel es por lejos el principal, concentrando el 89,6% del total. A distancia, el uso de Gas natural y Enap 6 representan el 7,1% y 2,5 % respectivamente.

En la Figura 3 se presenta el consumo por tipo combustible para el año 2020 y su consecuente estimación de emisiones directas. Es así como se observa que el Diésel es responsable del 91,1% de las Emisiones Directas de la minería del cobre en el 2020, seguido lejos por el Gas natural responsable del 5,5% 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.

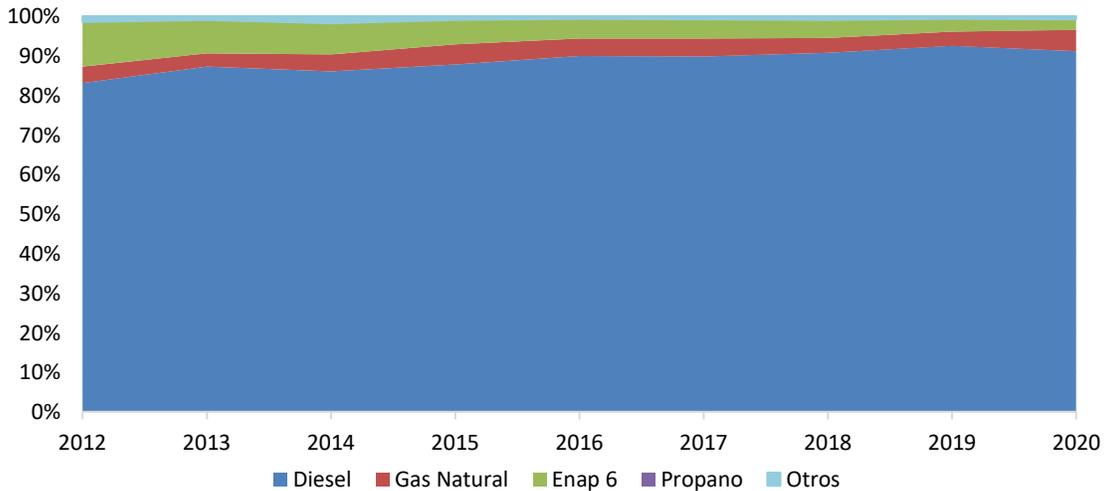
Figura 3 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustibles, 2020



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 2012-2020, se observa que el Diésel ha ido incrementando su participación en la contribución de emisiones GEI directas, de 83,1% en 2012 al 91,1% en 2020, en tanto el segundo combustible más utilizado en 2020 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 5,5% en 2020. El Enap 6, también conocido como Fuel Oil n°6., en el 2020 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% en emisiones directas en 2012 a sólo un 2,6% en 2020.

Figura 4 Participación por tipo de combustible en las emisiones directas de la minería del cobre en Chile, 2012-2020



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.

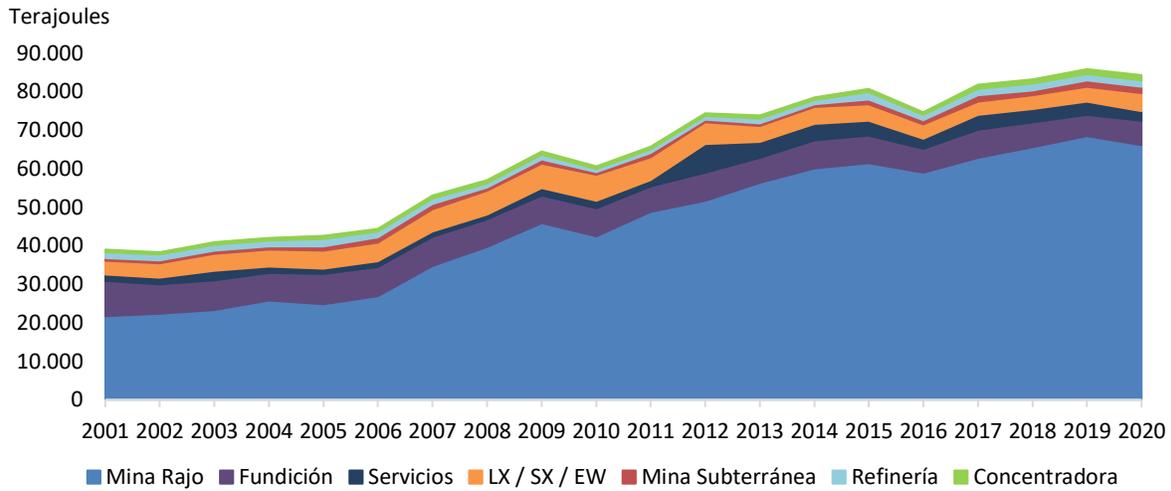
3.3. Emisión de GEI Directos por Proceso en la minería del cobre en Chile

Antes de analizar las emisiones de GEI por proceso, es conveniente revisar 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 2020.

El proceso que mayor combustible demanda es la mina rajo (78,4% del total de combustibles usados en minería) y al ver su evolución en el tiempo en los últimos 17 años, el consumo de combustible se ha triplicado prácticamente de 21.664 TJ en 2001 a 66.081 TJ en 2020. Esto se explica por una lado por el incremento del 21,0% de la producción de cobre entre 2001-2020 lo que conlleva un mayor procesamiento de mineral, un crecimiento de 99,1% 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 41% entre 2001 y 2020, 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.

El combustible más utilizado en el proceso de mina rajo es el diésel (99,9 % del total de combustibles usados en mina rajo en 2020) 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% del total diésel usado en minería del cobre en el 2020. 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, 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.

Figura 5 Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2020



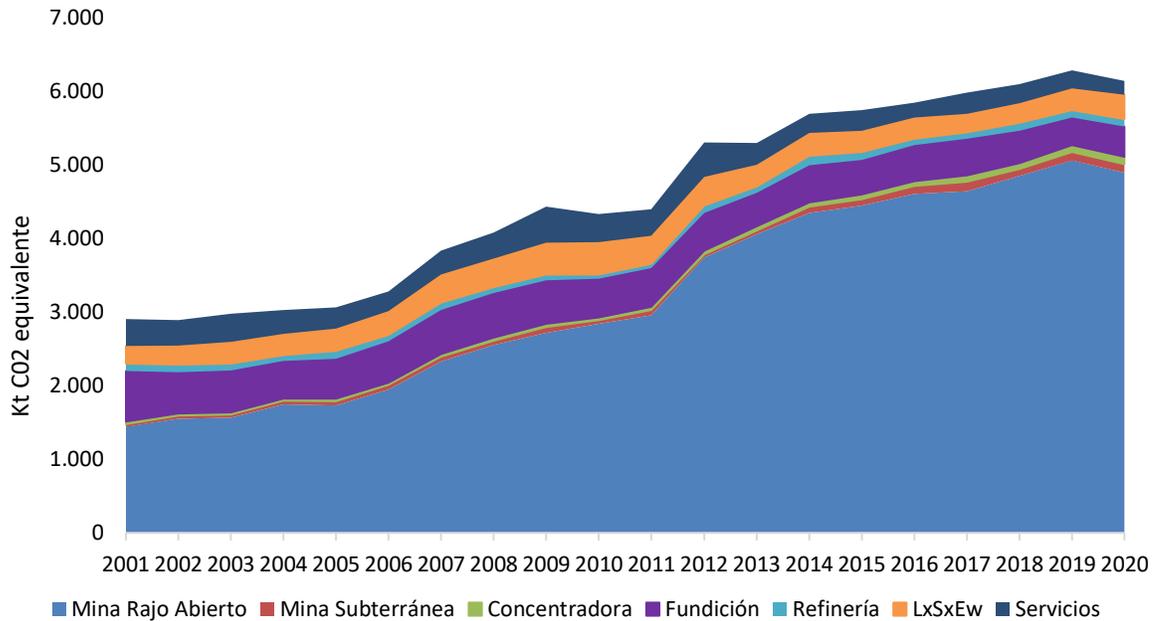
Fuente: Cochilco

Por otra parte, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles y que representa un 7,4% del total de combustibles usados en minería el 2020, disminuyó en un 31,8% entre el 2001 al 2020 aun cuando su nivel de procesamiento se ha mantenido en el período analizado, y no presentando 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%.

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.

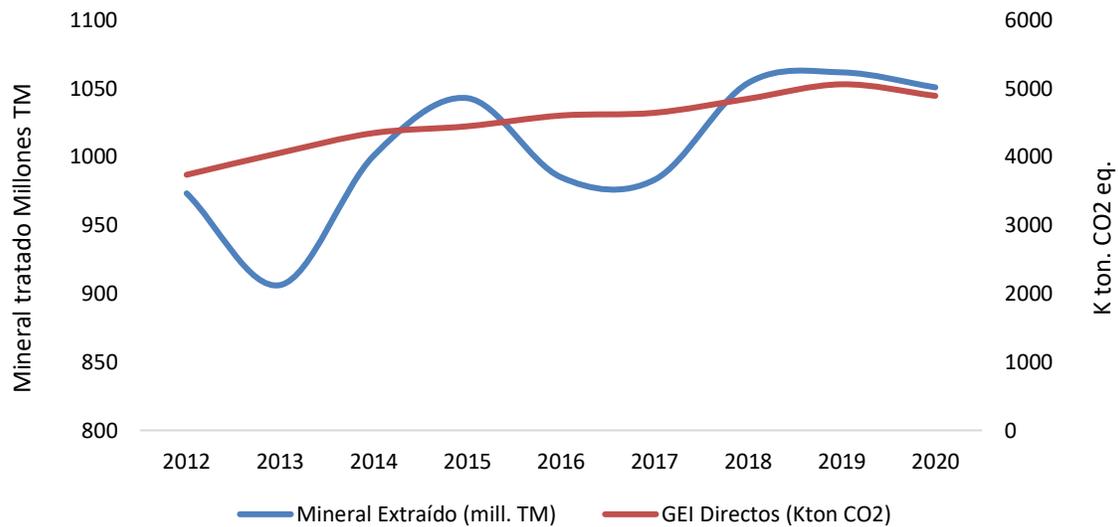
En efecto, la Figura 6 nos muestra que el proceso con mayores emisiones directas de GEI es la extracción desde mina rajo, siendo responsable de 4.892,6 mil toneladas de CO₂ equivalente en 2020 y representando el 79,7% de las emisiones directas de GEI de la minería del cobre en el 2020. En el periodo analizado el aumento de emisiones GEI de mina rajo ha sido de 239,9% , con un 2,8% anual entre 2014 y 2020, aumento considerablemente menor que el crecimiento anual de 9,3% entre 2001 y 2013, ello se puede explicar tomando en cuenta que a principios de la década del 2000 entraron en operación diferentes minas rajo abierto y estas, a medida que han avanzado su explotación, sus distancias y pendientes de acarreo van aumentando, tanto de los minerales como de los materiales estériles, con el consiguiente aumento de consumo de diésel y por tanto de emisiones directas GEI.

Figura 6 Emisiones de GEI directos de la minería del cobre por proceso, 2001 – 2020



Fuente: Cochilco

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 – 2020

Fuente: Cochilco

Luego, en el proceso de fundición de cobre se cuantifican 407,8 mil toneladas de CO₂ durante 2020 y equivalente al 6,6% 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 fundición Chagres en 2002, no se han registrado cambios significativos en la capacidad de tratamiento de mineral. Lo anterior a pesar de que en 2016 Chagres, Altonorte y Ventanas debieron cumplir con la norma 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). Ya 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 CO₂¹. 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 328,9 mil toneladas de CO₂ emitidas en 2020, lo que equivale al 5,4 % del total de emisiones directas. Entre el 2010 al 2020 las emisiones GEI de este proceso han disminuido un 25,6% en tanto la producción de Cátodos Electro Obtenidos disminuyó un 29,7%. Cabe señalar que en este proceso paulatinamente se ha ido reemplazando el diésel por lo general utilizado, por otras fuentes de

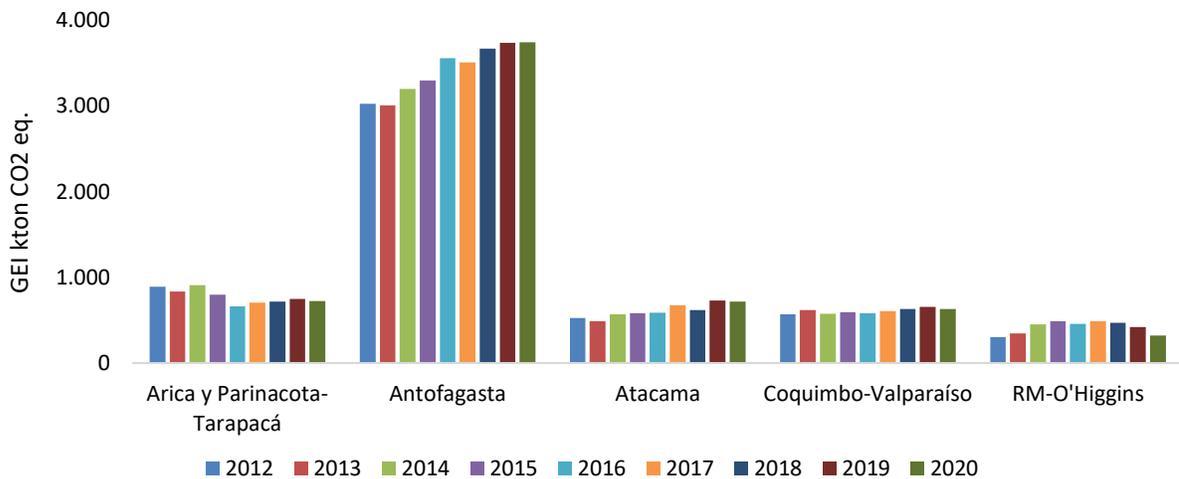
¹ La captura de azufre y arsénico trae como efecto secundario la captura de otros gases que si pueden contribuir a los GEI, ya que es económicamente costoso y carente de sentido práctico separar sus capturas.

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 2020 por región. Antofagasta es por lejos la región con mayor nivel de emisiones, con 3.740,7 kt de CO₂ equivalente por GEI directos durante 2020, representando así el 60,9% 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, como Escondida, Chuquibambilla y Sierra Gorda, lo que implica que más del 60% de la producción de mina rajo provenga de la segunda región.

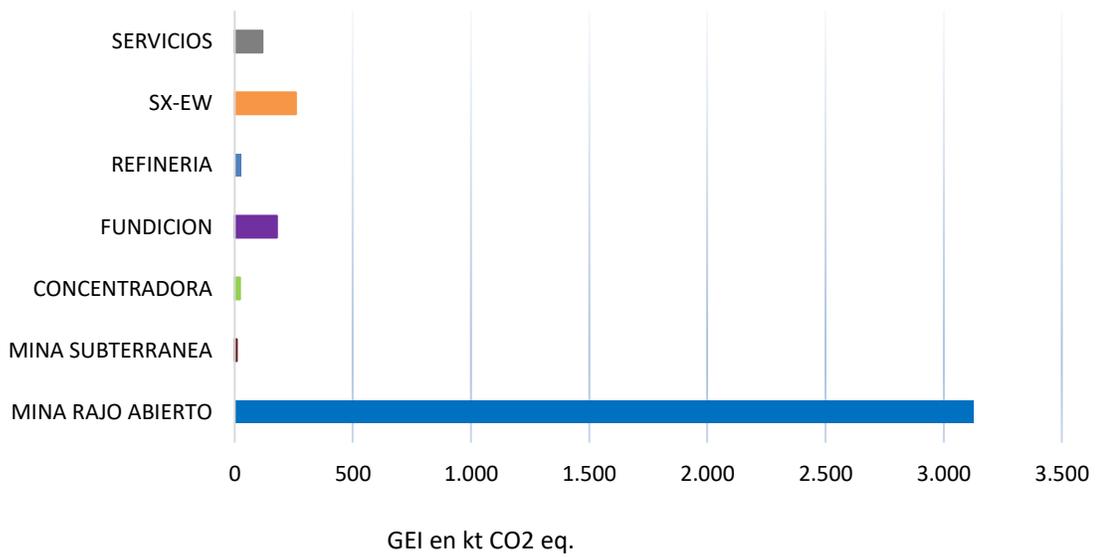
Figura 8 Emisiones de GEI directas por región 2012-2020



Fuente: Cochilco

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 3.126,4 kt CO₂ equivalente durante el 2020, lo cual representa el 83,6% de las emisiones directas de GEI de la región. Le sigue LX-SX-EW con 259,1 kt CO₂ equivalente (6,9% de las emisiones directas de GEI de la región) y Fundición con 178,7 kt CO₂ equivalente (4,8%) en el 2020.

Figura 9 Emisiones de GEI directas por proceso en región de Antofagasta 2020

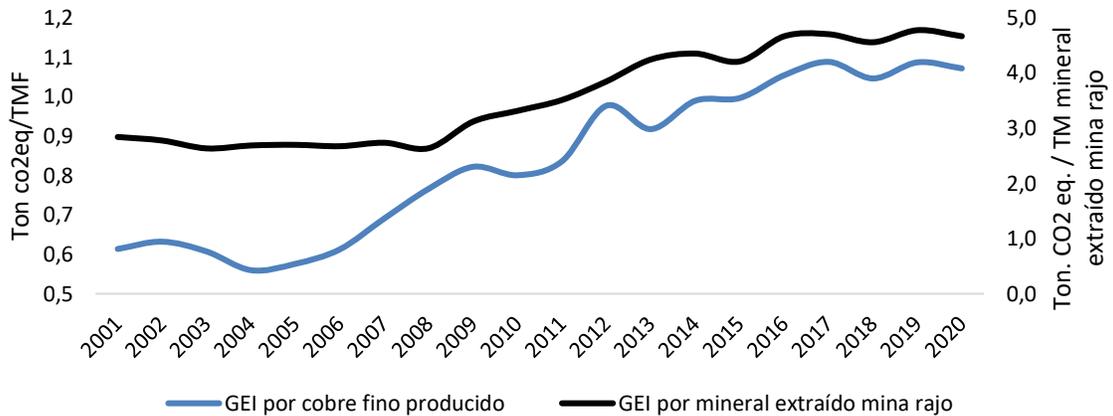


Fuente: Cochilco

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 – 2020

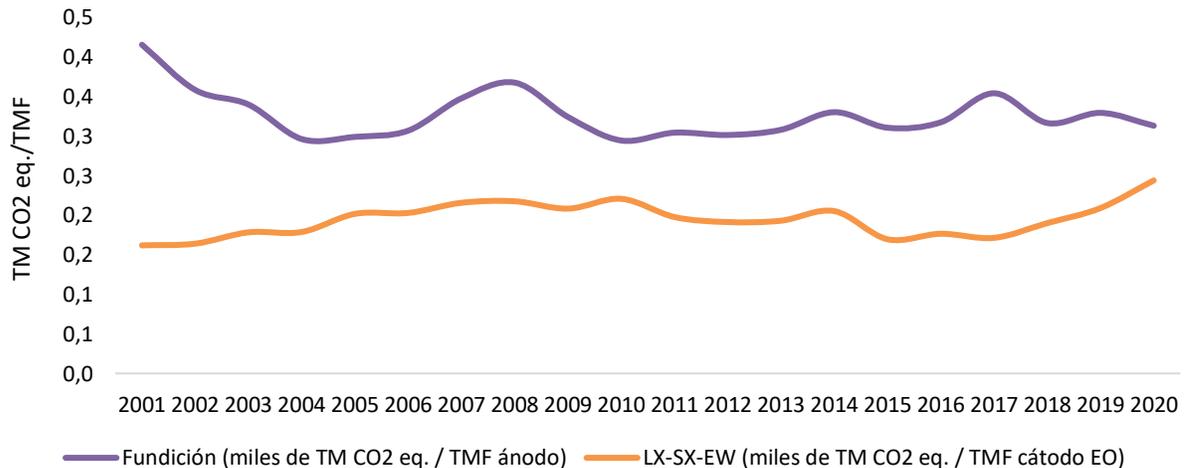


Fuente: Cochilco

Para el año 2020 se registraron 1,07 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 2020 alcanzó las 4,7 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 relación a las Fundiciones, el coeficiente unitario de GEI directas por kilo tonelada de cobre fino contenido en Blíster/Ánodos alcanzó las 0,33 toneladas de CO₂ equivalente en el año 2020, indicador similar al promedio sostenido en las últimas dos décadas de 0,33. A su vez, el proceso de Lx-Sx-Ew, presenta un coeficiente de 0,24 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de cátodo electro obtenido, también similar al promedio del todo el periodo, equivalente a 0,19 (véase Figura 11).

Figura 11 Emisiones de GEI directos por cobre fino contenido en Fundición y Electro-obtención, 2001 -2020



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 – 2020. 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 y SIC en el periodo 2010 – 2020.

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.

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

Fuente: Ministerio de Energía

Como se puede apreciar, 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.

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 2020, el factor de emisión para el SEN es de 0,3834tCO₂ eq/MWh, que es un 50,4% menor que el factor de emisión del SING y un 14,0%

mayor que el factor de emisión del SIC en el año 2017 y un 8,4% menor que factor de emisión del SEN en 2018 y un 5,5% menor que el factor del 2019.

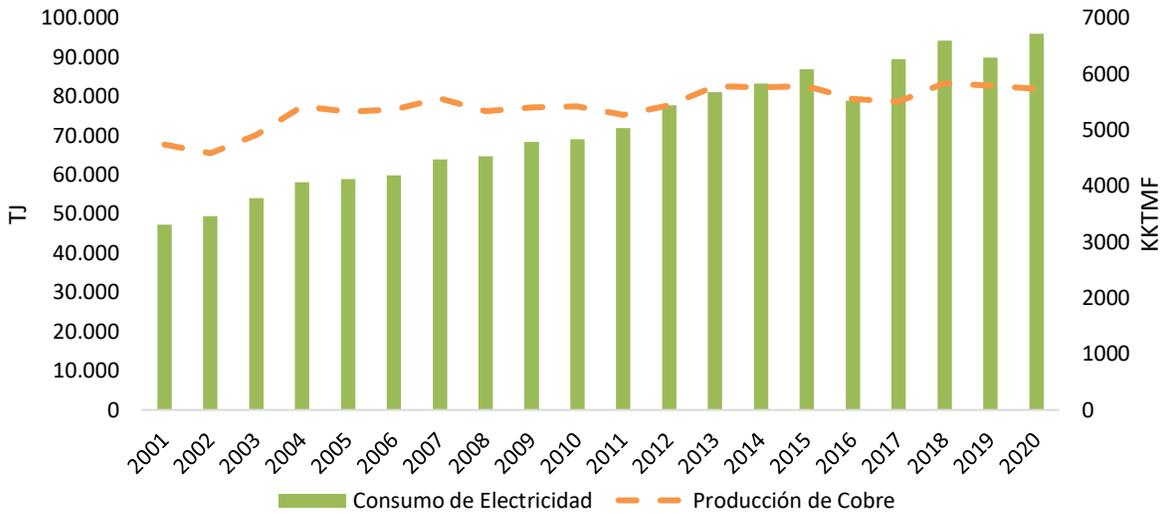
Cabe señalar que en los últimos años a medida que las energías renovables han ido disminuyendo su costo, se van desarrollando tecnologías de almacenamiento y la matriz energética SEN va adquiriendo flexibilidad para incorporar estas energías, ello ha facilitado una matriz más limpia y competitiva, es así como el factor emisión SEN disminuye año a año. Estos incentivos generan un círculo virtuoso entre la minería y el sector energético. El sector minero, importante cliente energético ha realizado también esfuerzos por concretar nuevos contratos con generadoras por energías 100% renovables y a costos de suministro cada vez más competitivos, ello es y será importante para el impulso de las energías renovables en la matriz energética chilena. Estos esfuerzos tanto del país como del sector minero por un suministro eléctrico con energías limpias de carbono se verán reflejados en un futuro cercano en una industria minera que puede liderar la mitigación al cambio climático logrando la carbono neutralidad por concepto de consumo de electricidad del sector.

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 expulsión 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 2020, que ha aumentado un 103,0%, en tanto la producción de cobre en igual período se incrementó en un 21,0%. Durante todo el periodo se registró una tasa de crecimiento anual en el consumo de electricidad de un 3,9%. El aumento del consumo eléctrico, viene dado principalmente por el aumento de capacidad de procesamiento de concentración a nivel nacional, en torno a un 133%, y del aumento del consumo eléctrico de los sistemas de impulsión y desalación de agua de mar a las faenas.

Figura 12 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001 – 2020



Fuente: Cochilco

En la Figura 13 se observa la evolución de las emisiones de GEI directas entre el año 2010 al 2020. En el año 2020 la minería del cobre en Chile emitió un total de 10.218,6 mil toneladas de CO₂ equivalente, corresponde a una disminución de 29,6% respecto del año 2017. El principal factor detrás del menor nivel de GEI indirectos reside en una baja importante en el factor de emisión del SEN (-50,4%) con respecto al factor de emisión del SING en el 2017, sistema del que se suministraba la mayor parte la minería del cobre.

Figura 13 Emisiones de GEI indirectas y consumo de electricidad de la minería del cobre en Chile, 2010-2020



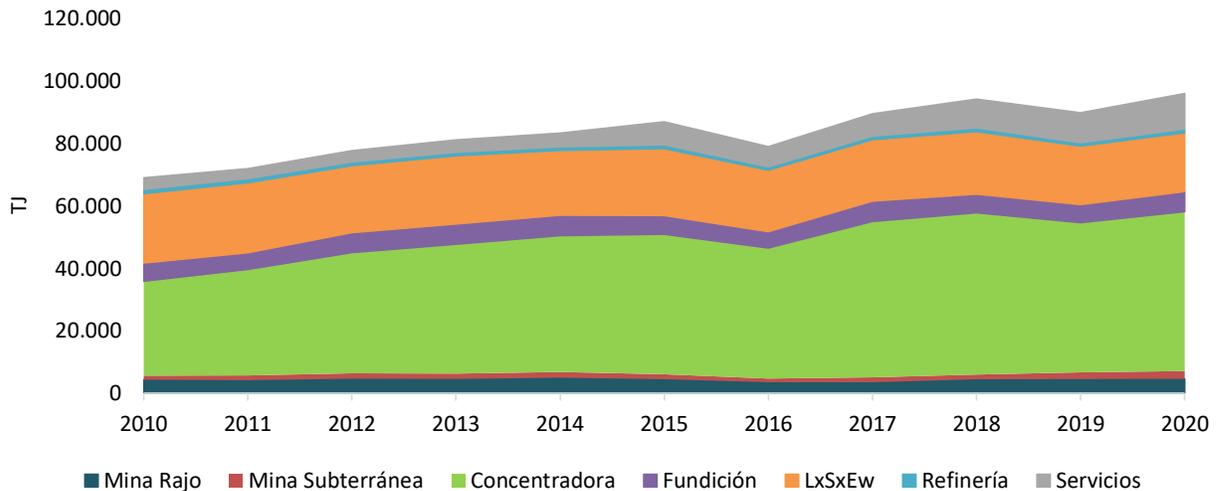
Fuente: Cochilco

Al analizar el período completo, las emisiones de GEI indirectas al 2020 son un 6,4% menor al año 2010, en tanto el consumo de electricidad aumentó un 39,2% y el de producción de cobre fino en un 5,8% en el mismo período. 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 2020 la producción de concentrados aumentó en un 28,1%, en tanto el proceso de concentración aumentó un 68,7% su consumo de electricidad, llegando a representar un 53,2% del total de electricidad consumida en la minería del cobre en el año 2020. 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 63,4% en el periodo analizado, y al incremento sostenido de la producción de concentrados.

Figura 14 Consumo de electricidad por proceso minero, 2010 – 2020



Fuente: Cochilco

El proceso de electro-obtención es el segundo proceso de mayor relevancia en su consumo eléctrico representando en el 2020 el 19,6% del consumo eléctrico de la minería del cobre. Entre el 2010 al 2020, la producción de cátodos disminuyó en un 29,7% mientras el consumo de electricidad en electro-obtención se ha mantenido relativamente constante disminuyendo un 15,2% 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 2020 representa un 11,9% del total de electricidad consumida en minería del cobre, ha triplicado su consumo de energía eléctrica entre el 2010 y 2020 debido a la creciente demanda

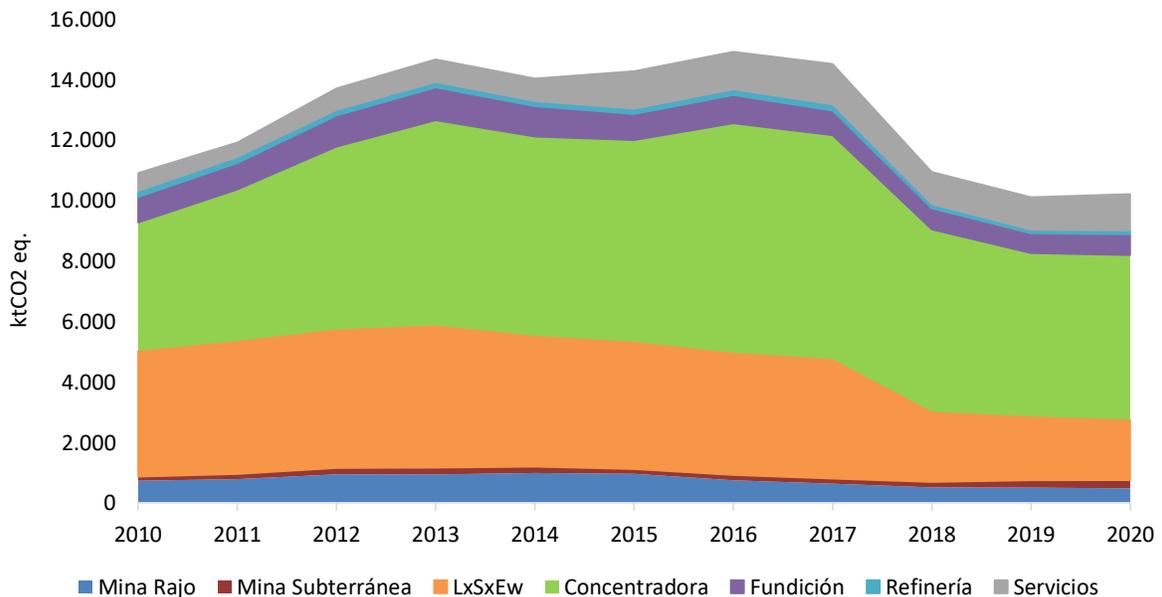
eléctrica de sistemas de desalación de agua de mar y especialmente su impulsión a las faenas mineras, procesos altamente intensivos en energía eléctrica y que están incluidos en Servicios representando el 74,6% del consumo eléctrico de este proceso.

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 2020 el proceso de concentración registro un total de 5.437,2 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que corresponde a un muy leve aumento del 0,7% respecto del año 2019. 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 50,4% mayor que el actual SEN, es así como se explica la baja de emisiones de este proceso en el 2020 en un 26,5% respecto al 2017. En términos de participación, en el 2020 el proceso representa el 53,2% 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 2020 el proceso de Electro-Obtención registro un total de 2.005,9 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que corresponde a una baja del 49,3% respecto al 2017 y de un 5,0% respecto del año 2019.

Figura 15 Emisiones de GEI indirectas por procesos, 2010 – 2020



Fuente: Cochilco.

En cuanto al ítem de Servicios, durante 2020 aumentó en un 11,9% el nivel de emisiones respecto del 2019, con lo que alcanzó un total de 1.210,8 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa

el 11,8% de las emisiones GEI indirectas totales de la minería del cobre el 2020. En el año 2020 las emisiones GEI indirectas por concepto de uso de agua de mar (desalación y/o impulsión) son 903,2 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 74,6% de las emisiones dentro de Servicios y un 8,8% del total de emisiones GI indirectas de la minería del cobre.

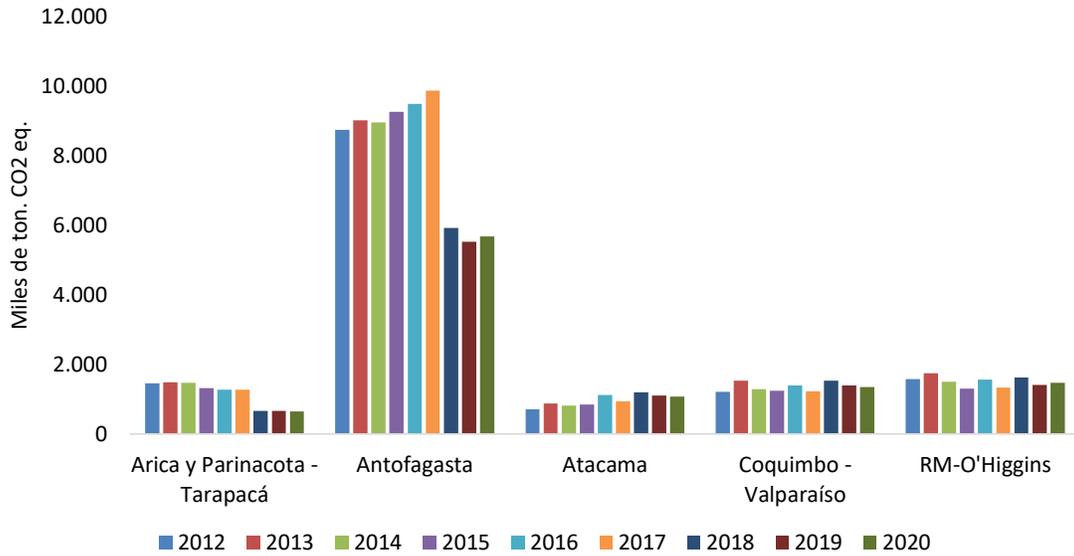
Cabe mencionar, el ítem Servicios se estima continuará aumentando su participación relativa en la cuantificación de emisiones indirectas, a medida que nuevos proyectos de desalinización e impulsión de agua de mar se lleven a cabo por las empresas mineras. Esto debido a que el incremento de producción 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 2020. Cabe señalar, que en el año 2020 a todas las regiones se le aplican un mismo factor de emisión de 0,3834 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 50% mayor que el SEN actual) y Atacama, Coquimbo, Valparaíso y O'Higgins conectadas al SIC (que tenía en el 2017 un factor 14% menor 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 2020 por un total de 5.683,9 mil toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa un 55,6% 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 1.466,7 mil toneladas de CO₂ equivalente (14,4% del total de emisiones de GEI indirectas de minería del cobre), nivel cercano a Coquimbo-Valparaíso que tiene 1.346,6 mil toneladas de CO₂ equivalente (13,2% del total), le sigue Atacama con 1.072,7 mil toneladas de CO₂ equivalente (10,5% del total), y finalmente Arica y Parinacota-Tarapacá con 648,7 mil toneladas de CO₂ equivalente (6,3% del total).

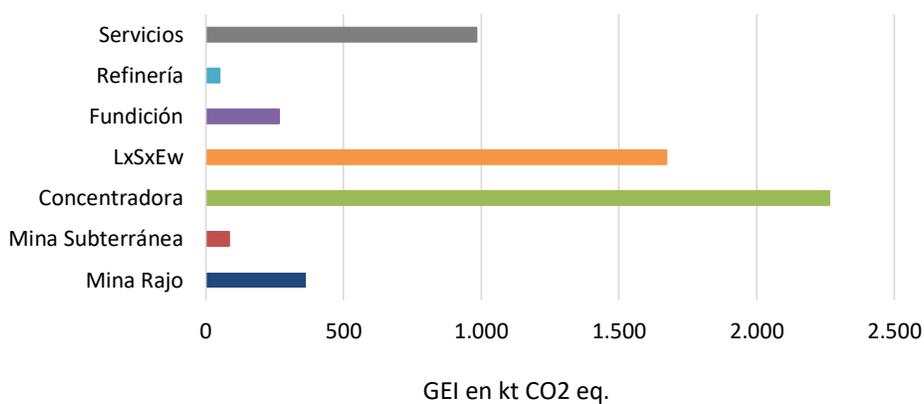
Figura 16 Emisiones indirectas en la minería del cobre por región, 2012-2020



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 2.263,5 mil toneladas de CO₂ equivalente durante el 2020, lo cual representa el 39,8% 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 1.672,1 mil ton CO₂ equivalente durante el 2020, lo cual representa el 29,4% 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 982,6 mil toneladas de CO₂ equivalente lo que representa el 17,3% de las emisiones GEI indirectas de la región.

Figura 17 Emisiones de GEI indirectas por proceso en región de Antofagasta 2020



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 2020 este indicador alcanzó un valor de 1,78 ton CO₂ eq por cobre fino producido, lo cual es un 32,5% menos que en 2017 y un 2,0% mayor que en 2019. 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



Fuente: Cochilco

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

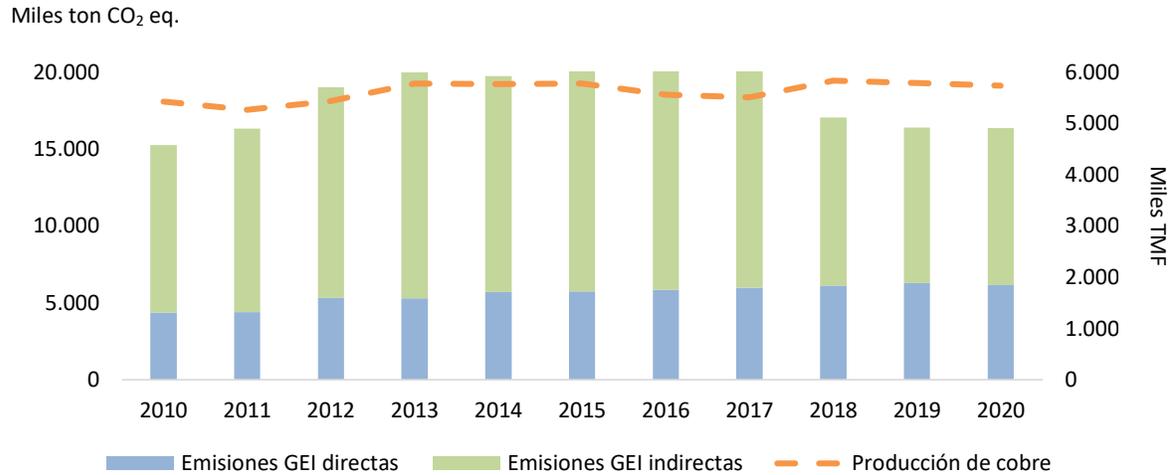
Agregando los totales de emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos (véase la Figura 19), vemos que en el año 2020 se registraron emisiones por 16.357 mil toneladas de CO₂ equivalente, distribuidas en 6.138 mil por GEI directos (37,5% del total de emisiones de la minería del cobre) y 10.219 mil por GEI indirectos (62,5% del total). Esto representa una caída del 20,2% con respecto al año 2017 equivalente a una disminución de 4.148,8 mil toneladas de CO₂ equivalente respecto al 2017, ello se atribuye principalmente a la caída en un 29,6% 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 2020 con el año 2019, se mantuvo prácticamente el nivel de emisiones GEI totales con una leve disminución de un 0,3% equivalente a 43,1 mil de toneladas de CO₂ equivalente menos respecto al 2019.

Ahora bien, analizando el período completo desde 2010, se ha registrado un aumento del 7,3% en las emisiones totales en tanto la producción se ha mantenido relativamente estable aumentando un 5,8% en el período. El aumento en las emisiones en el período analizado se atribuye mayormente a causas estructurales en la matriz productiva minera destacando el envejecimiento de las minas y

causas estructurales (lo que a su vez conlleva a mayores consumos de combustible y electricidad por las mayores distancia de acarreo, mayor dureza de la roca, menores leyes del mineral y mayor uso de agua de mar).

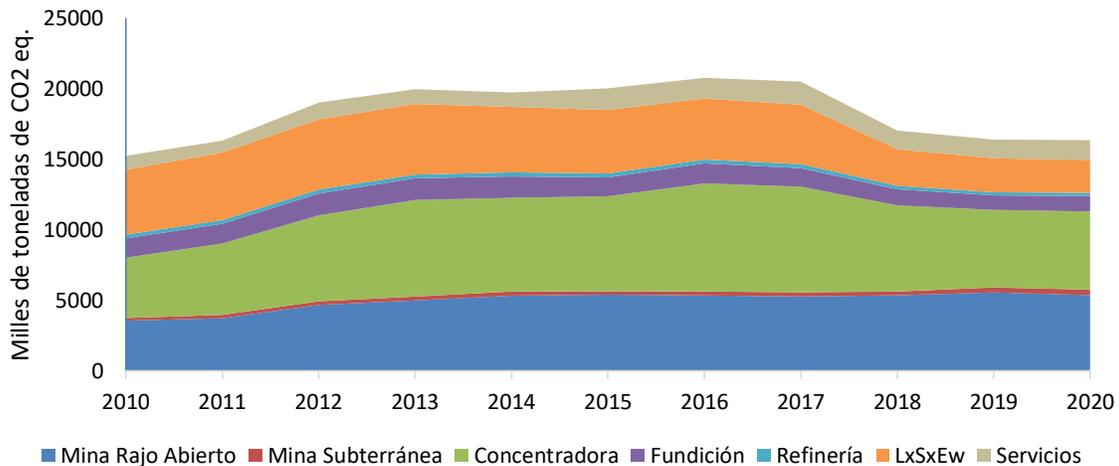
Figura 19 Emisiones de GEI directos e indirectos de la minería del cobre, 2010-2020



Fuente: Cochilco

Del mismo modo, revisando las emisiones de GEI a nivel agregado por proceso (véase Figura 20) se advierte que el proceso de concentración lidera las emisiones 5.538 mil toneladas de CO₂ eq., que representa el 33,9% del total en 2020 (un 98,2% proviene de emisiones indirectas y sólo un 1,8% de directas). Entre el 2010 al 2020 este proceso ha aumentado sus emisiones en un 29,5%. 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 28,1%, la cual es altamente intensiva en energía eléctrica y, consecuentemente, involucran la generación de emisiones del tipo indirectas.

Figura 20 Emisiones de GEI totales por proceso, 2010-2020

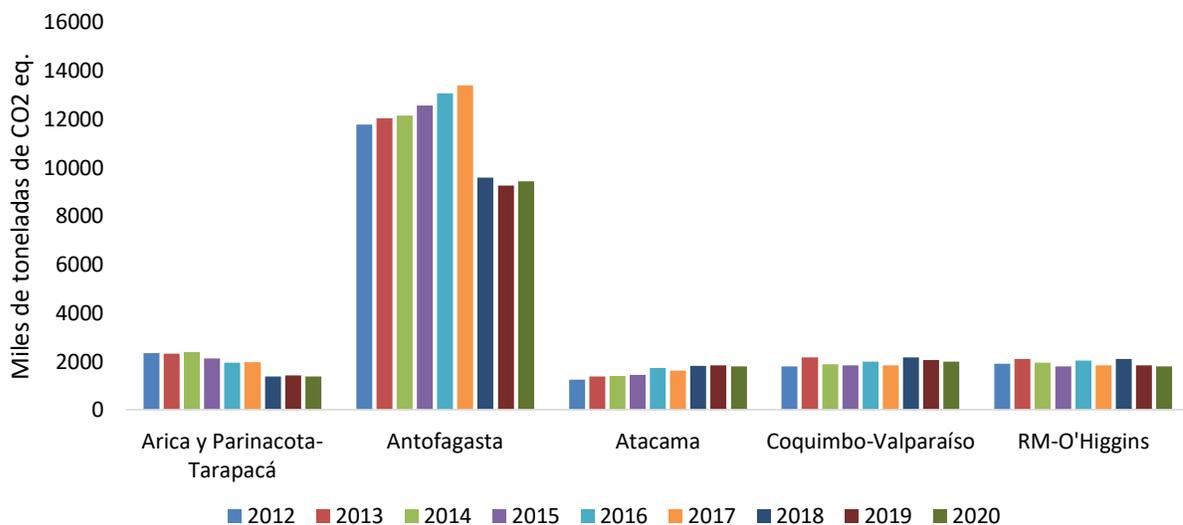


Fuente: Cochilco

El segundo proceso con mayor emisión de GEI en el 2020 es el de Mina Rajo, con 5.376 mil toneladas de CO₂ eq., lo que representa un 32,9% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 91,0% proviene de emisiones directas y un 9,0% de indirectas). En tanto entre el 2010 y 2020 las emisiones de este proceso aumentaron un 50,5% básicamente debido a temas estructurales que enfrenta la minería como lo es el envejecimiento de las minas. El tercer proceso que tiene mayor emisión en el 2020 es el de Lixiviación con 2.335 mil toneladas de CO₂ eq. emitidas, lo que representa un 14,3% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 85,9% proviene de emisiones indirectas y un 14,1% de emisiones directas). Entre el 2010 y 2020 las emisiones de este proceso han disminuido un 49,3%, 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 29,7% entre 2010 y 2020) 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.

Por último revisando las emisiones a nivel regional, se observa de la Figura 21, 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 2020 (un 39,7% proviene de emisiones directas y un 60,3% 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. 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 21 Emisiones de GEI totales por región, 2010-2020

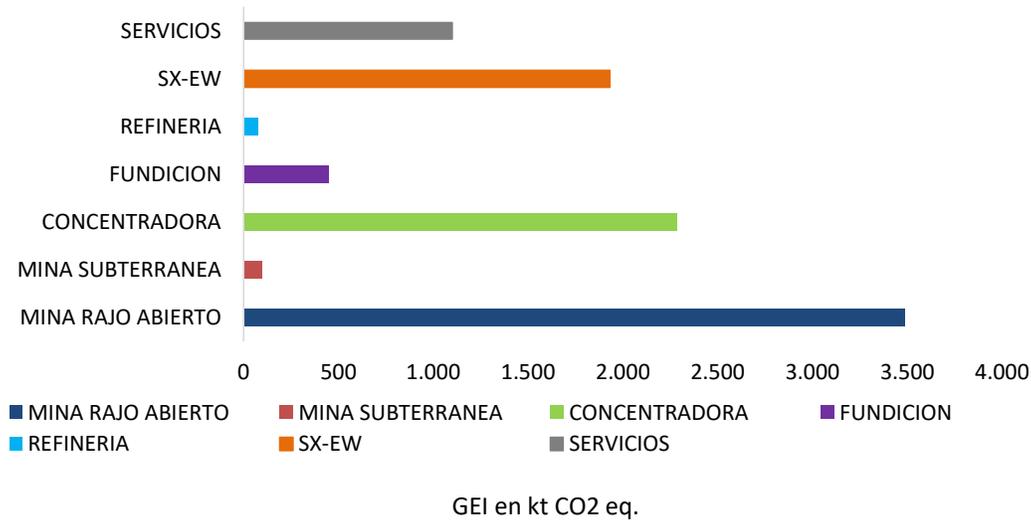


Fuente: Cochilco

Al analizar en la región de Antofagasta las emisiones de GEI totales por proceso, se observa en Figura 22 que durante el 2020 la mina rajo es el proceso que mayores emisiones tiene con 3.488 mil

toneladas de CO₂ equivalente, lo cual representa el 37,0% de las emisiones totales de GEI de la región. Seguido por el proceso de concentración con 2.286 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 1.931 mil toneladas de CO₂ eq., lo que representa el 20,5% de las emisiones totales de Antofagasta.

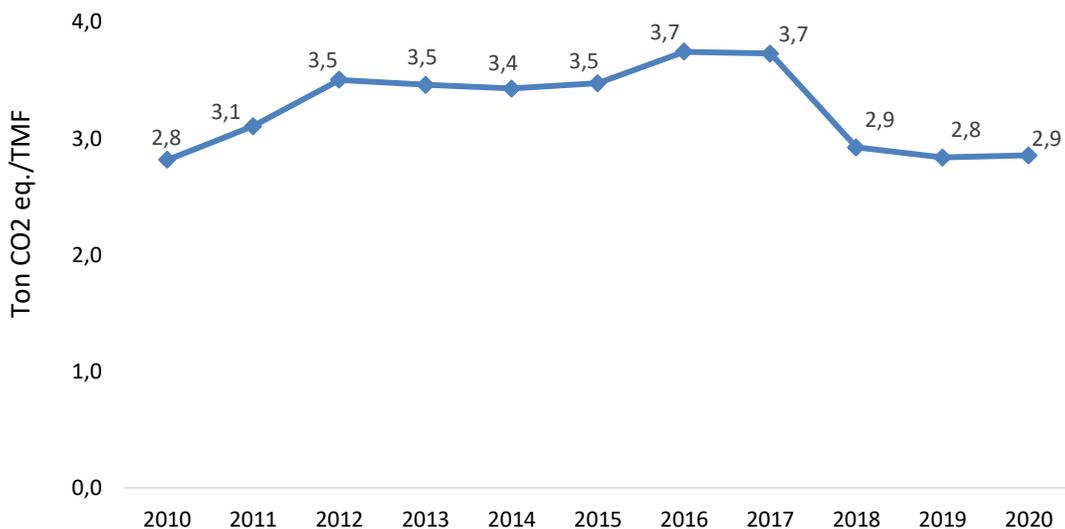
Figura 22 Emisiones de GEI totales por proceso en región de Antofagasta 2020



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 23 que en el 2020 este indicador alcanzó un valor de 2,9 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



Fuente: Cochilco.

6. Emisiones GEI minería del cobre en el contexto nacional

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 a nivel país elaborado de emisiones GEI, el Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (BUR) 2020, se muestran las cifras del “Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2018”. Este documento expone que las emisiones totales de Chile en el 2018 son de 113.640,2 mil toneladas de CO₂ eq.

Si se comparan cifras del 2018 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 5,4% del total nacional de emisiones GEI
- Las emisiones indirectas o de alcance 2 de la minería del cobre representan el 9,6% del total nacional de emisiones GEI
- Es así como las emisiones totales de la minería del cobre son un 15,0% de las emisiones GEI totales a nivel país

Tabla 4: GEI minería del Cobre vs GEI País

Emisiones GEI (kt CO ₂ eq)	Año 2018		
	Minería del Cobre (COCHILCO)	Total Nacional (BUR)	% del Total Nacional
Directo	6.094,7		5,4%
Indirecto	10.943,0		9,6 %
Total	17.037,8	113.640,2	15,0%

Fuente: BUR 2020 y COCHILCO 2020

Cabe señalar que las emisiones de la minería del cobre consideradas a nivel nacional y expuestas en el Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático 2020, son las de Alcance 1. Al respecto el BUR 2020 señala que las emisiones de la minería del cobre son 5.826 mil toneladas de CO₂ eq, lo que representa un 5,1% del total nacional en el 2018. Las emisiones de alcance 2 de minería del cobre no son consideradas en dicho informe.

7. Comentarios Finales

- Durante el año 2020 se registraron emisiones de GEI por un total de 16.357 mil toneladas de CO₂ equivalente en la minería del cobre en Chile, distribuidas en 6.138 mil por GEI directos (37,5% del total de emisiones de la minería del cobre) y 10.219 mil por GEI indirectos (62,5% del total).
- Comparando con el año 2017, las emisiones totales fueron un 20,2% menores, variación que implica una disminución de 4.149 mil toneladas de CO₂ equivalente. Esto se atribuye principalmente a una caída del 29,6% 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 2020 tiene un valor de 0,3834 tCO₂ eq/MWh, que es un 50,4% menor que el factor de emisión del SING del año 2017 y un 14% mayor 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.
- Comparando el 2020 con el año 2019, se mantuvo prácticamente el nivel de emisiones GEI totales con una leve disminución de un 0,3% equivalente a 43,1 mil de toneladas de CO₂ equivalente menos respecto al 2019.
- Antofagasta es la región con mayor nivel de emisiones por minería del cobre, con 9.425 mil toneladas de CO₂ eq. que representa el 57,6% del total durante el año 2020 (un 39,7% proviene de emisiones directas y un 60,3% 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.
- A nivel agregado por proceso, la Concentración lidera las emisiones GEI totales con 5.538 mil toneladas de CO₂ eq. que representa el 33,9% del total en 2020 (un 98,2% proviene de emisiones indirectas y sólo un 1,8% de directas). Entre el 2010 al 2020 este proceso ha aumentado sus emisiones en un 29,5%. Este incremento se vincula directamente a la tendencia nacional hacia la producción de concentrados (+28,1% en el período), que son 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 los requerimientos de energía eléctrica y consecuentemente involucran la generación de emisiones del tipo indirectas.
- El segundo proceso con mayor emisión total de GEI en el 2018 es el de Mina Rajo, con 5.376 mil ton de CO₂ eq. lo que representa un 32,9% de las emisiones totales de la minería del cobre (un 91,0% proviene de emisiones directas y un 9,0% de indirectas). En tanto entre el 2010 y 2020 las emisiones de este proceso aumentaron un 50,5% básicamente debido a temas estructurales que enfrenta la minería como lo es el envejecimiento de las minas.

- En término de emisiones GEI directas, el proceso que mayor emisión tiene en el 2020 es el de mina rajo con 4.893 mil ton de CO₂ eq., lo que representa el 79,7% 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. En este proceso utiliza cerca del 87% 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 5.4376 mil ton de CO₂ eq., lo que representa el 53,2% de las emisiones indirectas de la minería del cobre.
- En la medida que se integren energías renovables no convencionales tanto directamente en procesos mineros, así como en la matriz energética del país, las emisiones indirectas de la minería del cobre irán disminuyendo en un futuro.
- En relación al coeficiente unitario global de las emisiones totales de GEI de la minería del cobre a nivel nacional, para el 2019 es de 2,9 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 1,07 toneladas de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido y el de emisiones indirectas es de 1,78 ton de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino producido.
- En el Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (BUR) 2020, que es el último informe a nivel país elaborado de emisiones GEI, se muestran las cifras del “Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2018”. Este documento expone que las emisiones totales de Chile en el 2018 son de 113.640,2 mil toneladas de CO₂ eq., señala que las emisiones de la minería del cobre son 5.826 mil toneladas de CO₂ eq, lo que representa un 5,1% del total nacional en el 2018. 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 2018 calculadas por COCHILCO en relación a los 113.640,2 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 5,4% del total en tanto las emisiones indirectas o de alcance 2 de la minería del cobre representarían el 9,6% del total nacional de emisiones GEI al año 2018. Es así como las

emisiones totales de la minería del cobre serían un 15,0% de las emisiones GEI totales a nivel país en el 2018.

- 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 en un futuro basado en que la electricidad requerida por el sector minero del cobre provenga de fuentes renovables en un futuro. Por un lado, hasta ahora 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, es así como el factor emisión SEN disminuye año a año y posibilita una minería con menores emisiones de alcance 2. Estos incentivos generan un círculo virtuoso entre la minería y el sector energético. El sector minero, importante cliente energético ha realizado esfuerzos por concretar nuevos contratos con generadoras por energías 100% renovables y a costos de suministro cada vez más competitivos, ello es y será importante para el impulso de las energías renovables en la matriz energética chilena. Estos esfuerzos tanto del país como del sector minero por un suministro eléctrico con energías limpias de carbono se verán reflejados en un futuro cercano en una industria minera que puede liderar la mitigación al cambio climático logrando la carbono neutralidad por concepto de consumo de electricidad del sector.

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

Rosana Brantes Abarca

Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Diciembre / 2021