



Estudio de Emisiones en el sector Minero

Para Red de Eficiencia Energética y reducción de Emisiones

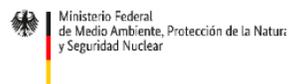
Informe Final Público

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Agosto 2021



Por encargo de:



de la República Federal de Alemania



Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröer/ Rodrigo Vásquez / Javier Hueichapán

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Título:**Estudio de Emisiones en el Sector Minero
para la Red de Eficiencia Energética y reducción de Emisiones****Autor:**

INNERGREEN

Dr. Rubén Pérez-Jeldres

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Eficiencia energética en la minería materias primas y clima" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, 2021

Índice

1	INTRODUCCIÓN	6
1.1	ANTECEDENTES DEL SECTOR MINERO EN TÉRMINOS DE ENERGÉTICOS Y DE EMISIONES	7
2	OBJETIVO.....	12
3	METODOLOGÍA.....	12
3.1	HUELLA DE CARBONO - TÉRMINOS, CLASIFICACIONES Y DEFINICIONES.....	12
3.2	HUELLA DE CARBONO – ESTRUCTURACIÓN DE LA CAPTURA DE DATOS, INFORMACIÓN, CÁLCULO Y REPORTE DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS EMPRESAS	14
3.3	HUELLA DE CARBONO – ESTIMACIÓN DE EMISIONES Y KPI.	15
3.3.1	<i>Emisiones fugitivas por consumo de combustibles.</i>	<i>15</i>
3.3.2	<i>Emisiones fugitivas por consumo de eléctrico.</i>	<i>17</i>
3.3.3	<i>Estimación de los KPI.</i>	<i>17</i>
4	RESULTADOS	19
4.1	ANÁLISIS GLOBAL.	19
5	CONCLUSIONES	24
	AGRADECIMIENTOS.....	24
	REFERENCIAS	25

Índice de Figuras

FIGURA 1. EFECTO POTENCIAL DE UN IMPUESTO EUROPEO A LAS IMPORTACIONES DE COBRE[4].	7
FIGURA 2. CONSUMOS ENERGÉTICOS Y PRODUCCIÓN ANUAL DE COBRE FINO PARA EL PERÍODO 2012-2019 (ELABORACIÓN PROPIA).	8
FIGURA 3. PARTICIPACIÓN DE CADA PROCESO EN EL CONSUMO ENERGÍA DE LA GRAN MINERÍA, 2019 (CONSTRUIDA A PARTIR DE REF. [5]).	8
FIGURA 4. CONSUMO ESPECÍFICOS DE COMBUSTIBLES POR TONELADA DE COBRE FINO (MJ/TMF)[5].	8
FIGURA 5. CONSUMO ESPECÍFICOS ELÉCTRICO POR TONELADA DE COBRE FINO (MJ/TMF)[5].	9
FIGURA 6. TENDENCIA (IZQ.) Y DISTRIBUCIÓN (DER.) DEL CONSUMO ESPECÍFICO DEL SECTOR PRODUCTOR MINERO DE COBRE PARA EL PERÍODO 2012-2019 (ELAB. PROPIA A PARTIR DE DATOS DE COCHILCO).	9
FIGURA 7. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y PRODUCCIÓN ANUAL DE COBRE (RECONSTRUIDA A PARTIR DE REF. [6]).	10
FIGURA 8. INTENSIDAD (IZQ.) Y DISTRIBUCIÓN (DER.) DE EMISIÓN GEI DEL SECTOR MINERO CUPRÍFERO (ELAB. PROPIA A PARTIR DE DATOS DE COCHILCO).	10
FIGURA 9. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y PRODUCCIÓN ANUAL DE COBRE (ELAB. PROPIA CONSTRUIDA USANDO VALORES DE REFERENCIAS [5]–[8]).	11
FIGURA 10. DEFINICIÓN DE ALCANCES SEGÚN ISO 14064-1 Y REQUISITOS [11].	13
FIGURA 11. RESUMEN ESQUEMÁTICO DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS PARA EL CÁLCULO DE HUELLA DE CARBONO.	15
FIGURA 12. PROCESOS IDENTIFICADOS EN CADA EMPRESA PARTICIPANTE.	19
FIGURA 13. CANTIDAD DE EMPRESAS DEL ESTUDIO QUE POSEEN LOS PROCESOS INDICADOS.	20
FIGURA 14. EMPRESAS AGRUPADAS POR TIPO MINERAL PRODUCIDO.	20
FIGURA 15. PRODUCCIÓN EN TONELADAS BRUTAS DE PRODUCTOS METÁLICOS Y NO-METÁLICOS (2020).	21
FIGURA 16. PRODUCCIÓN EN TONELADAS BRUTAS DE PRODUCTOS METÁLICOS Y NO-METÁLICOS DE LAS EMPRESAS PARTICIPANTES EN EL ESTUDIO EN SU CONJUNTO (2020).	21
FIGURA 17. EMISIÓN DE CO ₂ E POR PRODUCTOS METÁLICOS Y NO-METÁLICOS (2020).	22
FIGURA 18. COMPARACIÓN DE TENDENCIAS OBTENIDAS DE LAS EMPRESAS DE LA RED PARA CÁTODOS Y CONCENTRADOS, EN TÉRMINOS DE CONSUMO ESPECÍFICO (IZQ.) E INTENSIDAD DE EMISIÓN (DER.), RESPECTO A VALORES NACIONALES (2010-2019) E INTERNACIONALES.	22

FIGURA 19. CONSUMO ENERGÉTICO Y HUELLA DE CARBONO EN FUNCIÓN DE LA PRODUCCIÓN ANUAL DE CÁTODO Y CONCENTRADO (AÑO 2020)..... 23

Índice de Tablas

TABLA 1. INVERSIÓN Y COSTOS OPERATIVOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN – ESTUDIO BANCO MUNDIAL [1]..... 6

TABLA 2. PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) Y SU POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL (GWP) ,[10], [11]. 12

TABLA 3. FACTORES DE EMISIÓN REPORTADOS POR LA IPCC Y EXPRESADOS COMO TONCO₂E [12], [13]. 16

TABLA 4. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LOS COMBUSTIBLES ENCONTRADOS EN LAS EMPRESAS MINERAS..... 17

1 Introducción

Chile enfrenta su más grande desafío, lograr su meta de descarbonización al 2050. Basado en un estudio del Banco Mundial, el cual analiza los efectos macroeconómicos de la implementación del plan de descarbonización del país[1], indica que alcanzar la meta de descarbonización permitiría al país aumentar el nivel de su PIB potencial en 4,4%, equivalente a adicionar 31 millones de dólares a la economía. Para alcanzar estos índices, el estudio considera necesario implementar 37 políticas de mitigación, asociada a 7 medidas de mitigación (Ver **Tabla 1**). Estas medidas incluyen la eficiencia energética, la electro-movilidad y el hidrógeno, las que poseen un costo de inversión de 35 millones de dólares, y generarían 47,9 millones de dólares adicionales al país. En particular, para el sector minero, se considera la implementación de políticas de mitigación como la ley de eficiencia energética, electrificación motriz, motores MEPS (hasta 100 HP), e Hidrógeno.

Tabla 1. Inversión y costos operativos para la implementación de medidas de mitigación – Estudio Banco Mundial [1].

Sector	CAPEX (Millones USD)	OPEX (Millones USD)	Valor neto (Millones USD)
Eliminaciones combustibles fósiles	-2.100	1.200	-900
Industria Sustentable	-4.800	14.400	9.600
Electromovilidad	-23.100	20.200	-2.900
Hidrógeno	-9.200	18.800	9.600
Construcción sustentable	-5.900	16.900	11.100
Eficiencia Energética	-2.800	8.900	6.100
Mantenimiento Captura de Carbono - Bosques	-700	-300	-1.000
Total	-48.600	80.100	31.500

Una medida no incluida en el estudio del Banco Mundial, es el impuesto verde y su última modificación tributaria [2], [3]. La nueva medida modifica los criterios de gravamen, pasando desde calderas y turbinas, que individualmente o en su conjunto sumen 50 MW térmicos, a fuentes emisoras, que individualmente o en su conjunto, emitan 100 o más toneladas de MP¹ o 25.000 o más toneladas anuales de CO₂. Si bien, esta normativa entrará en vigor el 2023, las fundiciones de cobre podrían estar afectas a pagar impuesto verde, dependiendo de sus niveles de emisiones y no de su potencia, como era previo a la nueva medida.

En una misma línea, a modo de incentivar el cambio tecnológico de tecnologías convencionales a renovables, la Unión Europea analiza poder reclamar reducciones de emisión, incluso cuando

¹ La Ley y su modificación refieren al Decreto Supremo 13 del Ministerio de Medioambiente, que regula sobre las emisiones de MP2.5.

la producción se ubica fuera de los países socios. Esto, materializado a través de impuestos que gravarán sobre la Huella de Carbono de los productos en sus Alcances 1 y 2. Estimaciones realizadas para el sector cuprífero, muestra una actual competitividad de Chile frente a otras naciones. Sin embargo, ante el desarrollo de una economía del hidrógeno y las medidas que están desarrollando los países para reducir sus emisiones, esta brecha competitiva podría variar.

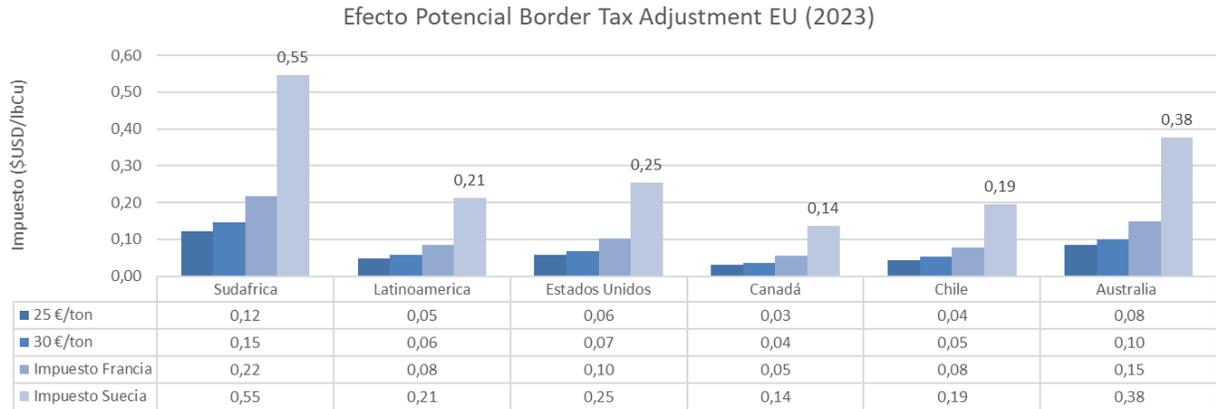


Figura 1. Efecto potencial de un impuesto europeo a las importaciones de cobre[4].

Debido a las nuevas políticas nacionales e internacionales, que aplicarán sobre el sector minero cobra relevancia analizar el sector en términos de emisiones y la eficiencia energética de sus procesos.

1.1 Antecedentes del sector Minero en términos de energéticos y de emisiones

En el 2019, Cochilco analizó 56 operaciones mineras de la gran y mediana minería, como también fundiciones y refinerías, en términos de consumos y emisiones de CO₂e[5]. El análisis reveló que, para el 2019, la minería del cobre consumió 48,65 TWh de energéticos, asociados principalmente a el consumo eléctrico (51,3%) y de combustibles (48,7%) (Ver **Figura 2**). Más aún, el estudio mostró que los tres procesos más intensivos energéticamente del sector son: la mina rajo (20,2 TWh), que representa el 42% del consumo energético total, seguido por el proceso de concentración (28%) y los procesos de extracción de solventes (SX) y electro-obtención (EW) (13%) Ver **Figura 3**.

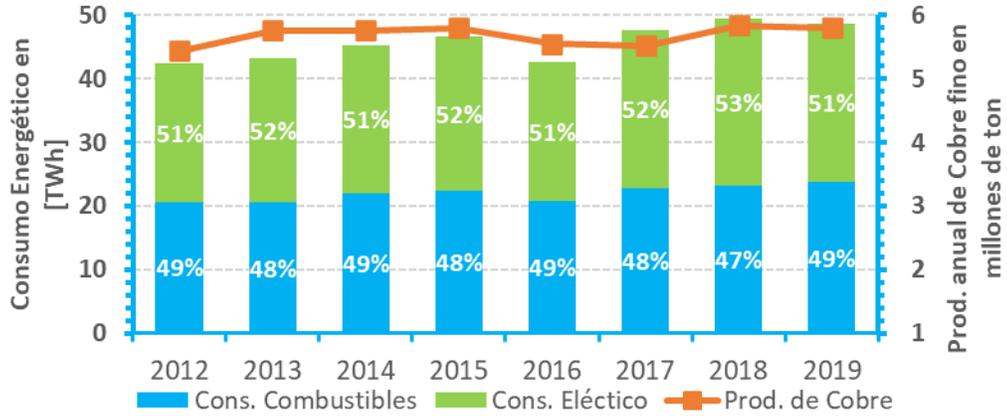


Figura 2. Consumos energéticos y producción anual de cobre fino para el período 2012-2019 (elaboración propia).

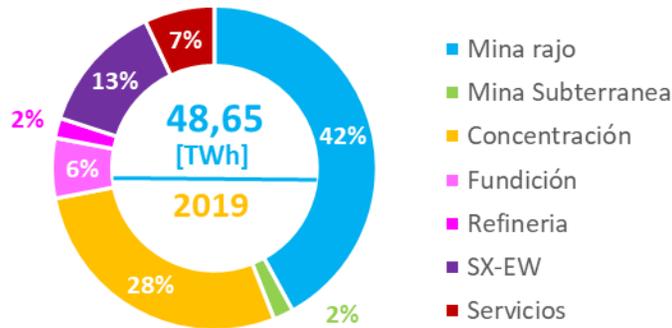


Figura 3. Participación de cada proceso en el consumo energía de la gran minería, 2019 (construida a partir de ref. [5]).

Adicionalmente, el estudio indica que, para el caso de consumo de combustibles, la mina rajo representa el 80% del consumo total de combustibles, seguido por fundiciones con un 7% (Ver **Figura 4**); mientras que, para el consumo eléctrico, los procesos de concentración (53%) y electro-obtención (21%), son los procesos más intensivos eléctricamente (Ver **Figura 5**).

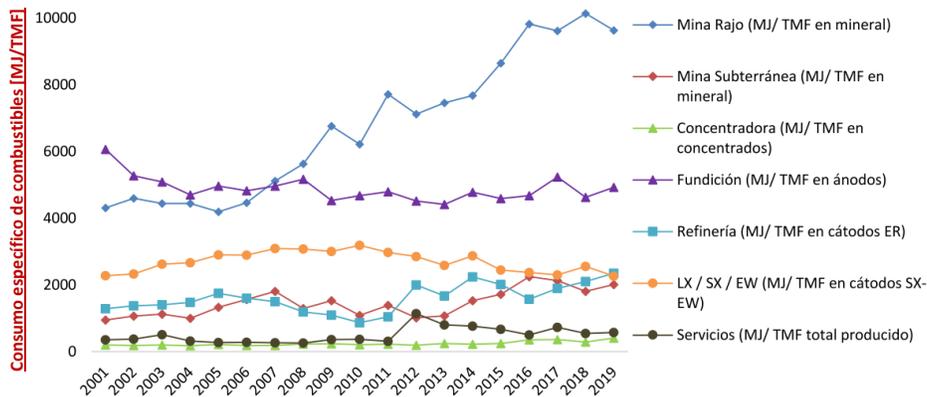


Figura 4. Consumo específicos de combustibles por tonelada de cobre fino (MJ/TMF)[5].

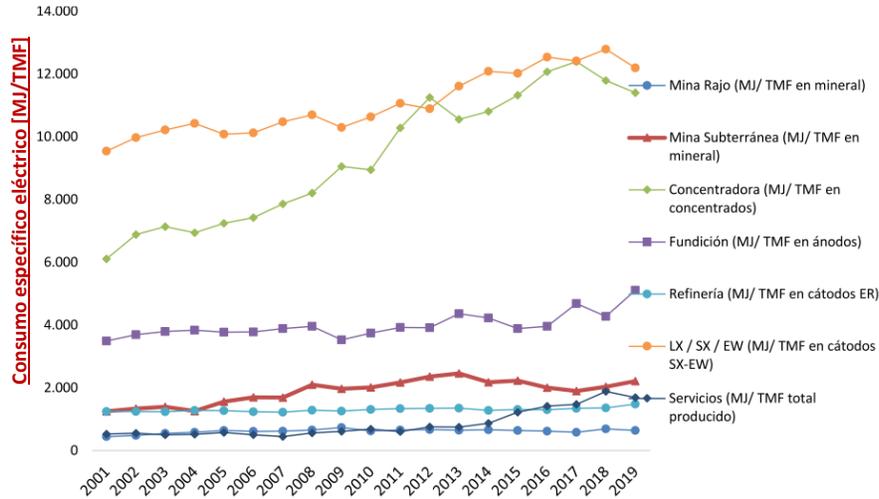


Figura 5. Consumo específicos eléctrico por tonelada de cobre fino (MJ/TMF)[5].

Al analizar los consumos por tonelada de mineral producido (eléctrico y combustibles), se observa que la lixiviación y la concentradora son los procesos más intensivos energéticamente de la gran minería (Ver **Figura 4 y 5**). Además, que el consumo de combustibles para mina de rajo ha aumentado un 123,7% respecto al 2001, asociado a la disminución en la ley de mineral extraído y con ello, un aumento del consumo de combustibles asociado al transporte de mineral; mientras que, los otros procesos han mantenido una tendencia estable en los últimos 18 años. Pese a esto, el consumo específico del sector, comprendido por la mediana y gran minería, ha tenido una tasa de variación acumulada del 0,96% y alcanzando un consumo específico promedio de 8 MWh/ton Cu fino (Ver **Figura 6**). Estos valores permitirán comparar, en términos de consumo específico, las tendencias obtenidas en el estudio con el contexto nacional informado por Cochilco.

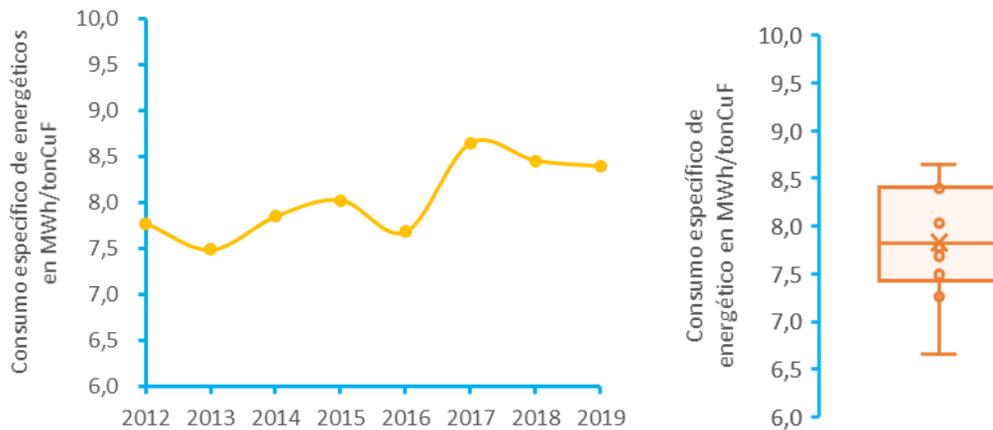


Figura 6. Tendencia (izq.) y distribución (der.) del consumo específico del sector productor minero de cobre para el período 2012-2019 (elab. propia a partir de datos de Cochilco).

Basado en los antecedentes anteriores, Cochilco reportó una emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) del sector por 16,4 millones de toneladas de CO₂e, distribuidas en 6,3 millones de

ton CO₂e directos (38%) y 10,1 millones de toneladas de CO₂e indirectos (62%), para el 2019. Adicionalmente, para el mismo año se observó una reducción del 20% en las emisiones respecto al 2017 y del 4% respecto al 2018 (Ver **Figura 7**). Ello debido a una reducción del factor de emisión del 45,8% del 2019 respecto al 2017 (SING), y un 3,1% respecto al 2018, atribuible a la conexión SING-SIC.

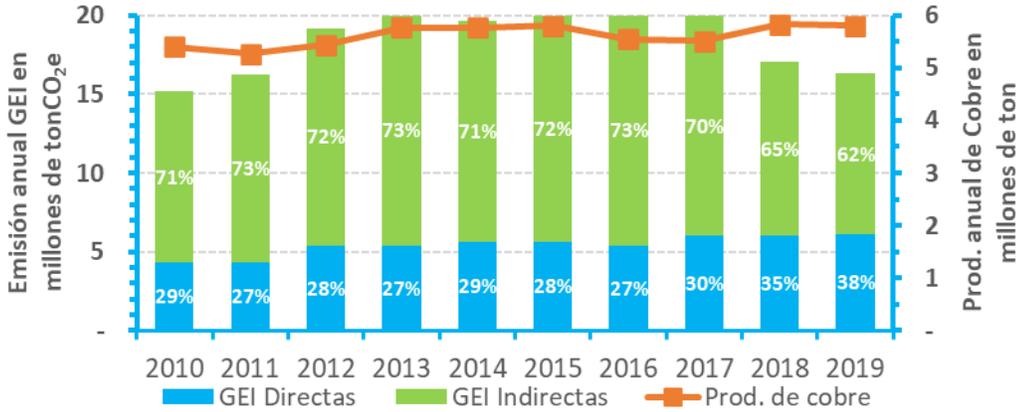


Figura 7. Emisiones de gases de efecto invernadero y producción anual de cobre (reconstruida a partir de ref. [6]).

La interconexión SIC-SING produjo una reducción de emisiones, y un cambio en la participación de GEI Directas e Indirectas en la emisión total del sector, lo que permitió reducir en 20% la intensidad de emisión del sector en el 2019 respecto al 2012 (Ver **Figura 8**). Es así como, para el 2019 el sector tuvo una intensidad de emisión del 2,8 ton CO₂e por ton de cobre fino. Sin embargo, la intensidad emisión promedio del sector para el período 2010-2019 es de 3,3 ton CO₂e/ton Cobre fino.

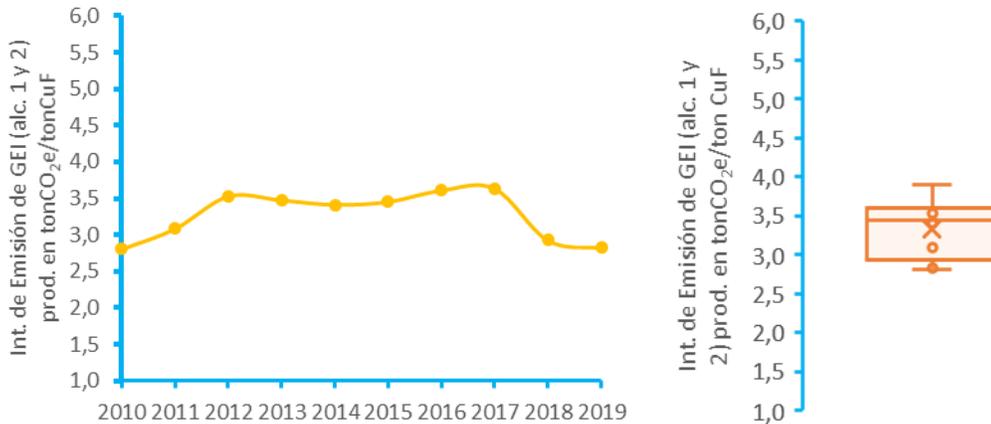


Figura 8. Intensidad (izq.) y distribución (der.) de emisión GEI del sector minero cuprífero (elab. propia a partir de datos de Cochilco).

Al comparar la distribución de emisiones del sector cuprífero nacional respecto a otros países productores se observó, por una parte, China (3%), USA (33%) y Polonia (97%)², poseen una intensidad mayor a la de Chile (3,3 tonCO₂e/ton Cu promedio); mientras que, Sudáfrica produce 2,5 veces más emisiones por cada tonelada de cobre producida en Chile. Por otra parte, Canadá (31%) y Japón (25%)² poseen una intensidad de emisión menor que el sector nacional.

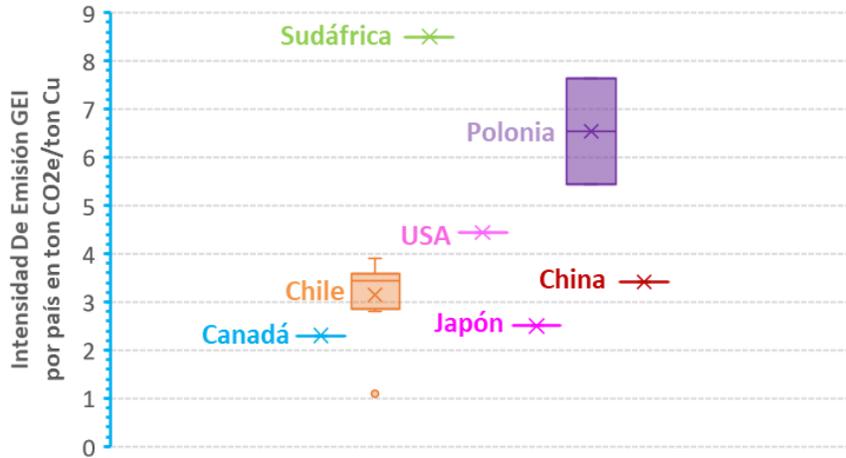


Figura 9. Emisiones de gases de efecto invernadero y producción anual de cobre (elab. propia construida usando valores de referencias [5]–[8]).

Si bien hoy, el sector minero presenta una competitividad en términos de emisiones, y de futuros impuestos, es necesario identificar nuevas medidas que permitan mantener esta brecha competitiva. Por ello, el presente estudio busca establecer una línea base sobre la cuál las empresas participantes del estudio puedan evaluar su competitividad y usar los valores reportados para identificar sus procesos más intensivos en términos de emisiones y consumos energéticos. Es así como, en las siguientes secciones se desarrollan para describir la metodología utilizada, y reportar las emisiones producidas por las empresas que participan en el estudio.

² Los porcentajes representan la variación de la intensidad de emisión de los países mencionados respecto a Chile

2 Objetivo

Determinar la Huella de carbono de las empresas asociadas a la Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones y determinar indicadores de sustentabilidad, que permitan evaluar el efecto de futuras medidas de energía en términos de emisiones para el período 2020.

3 Metodología

3.1 Huella de Carbono - Términos, clasificaciones y definiciones

La Huella de carbono nace como una medida de cuantificar y generar un indicador de impacto que una actividad o proceso tiene sobre el cambio climático, más allá de los grandes emisores.

La Huella de Carbono se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de dióxido de carbono equivalentes (o CO₂e)[9]. Es una herramienta de gestión útil para conocer las conductas o acciones que están contribuyendo a aumentar las emisiones, como mejorarlas y realizar un uso eficiente de los recursos. Es así como, la Huella de Carbono clasifica las emisiones en dos tipos:

- ❑ **Emisiones directas:** Las que corresponde a emisiones de gases de efectos invernadero (GEI) que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por la empresa o institución (Calderas, hornos, vehículos).
- ❑ **Emisiones indirectas:** las que corresponden a las emisiones GEI que son consecuencia de las actividades que desarrolla la empresa.

Tabla 2. Principales gases de efecto invernadero (GEI) y su potencial de calentamiento global (GWP) ^{3,4}[10], [11].

GEI	Fórmula Química	Descripción	Pot. GWP [ton CO ₂ e/ton]
Dióxido de Carbono	CO ₂	Generado principalmente en procesos de combustión de energéticos en base a carbón, en los procesos de descarbonización en la producción de Clinker, y como el cambio del uso de suelo (deforestación).	1
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	Usado comúnmente como aislante en subestaciones eléctricas, desde donde puede ser emitido en forma de emisión fugitiva.	23.900
Metano	CH ₄	Producido en procesos de descomposición anaeróbica de materia orgánica, como en la extracción de combustibles fósiles y emitido en trazas en procesos de combustión.	21
Óxido nitroso	N ₂ O	Generado por el uso de fertilizantes y en procesos de combustión, aunque también es liberado en forma natural desde suelos y océanos.	310

³ Potencial de calentamiento global, considerando un escenario de 100 años.

⁴ Existen otros gases de efecto invernadero, para mayor referencia se recomienda consultar la norma ISO 14064-1.

Los gases de efecto invernadero que considera el cálculo de Huella de Carbono, son cualquier componente gaseoso de la atmósfera, tanto natural como antropogénico, que absorbe y emite radiación a longitudes de onda específicas dentro del espectro de radiación infrarroja emitida por la superficie de la tierra, atmósfera y las nubes. Una breve descripción de estos gases se presenta en la **Tabla 2**.

Dependiendo del origen de estas emisiones estas se clasifican 3 Alcances (Ver **Figura 10**), según si éstas son emisiones producidas por la organización y ésta posee control sobre ellas (Alcance 1); o si son indirectas, por el consumo de electricidad principalmente (Alcance 2); o indirectas por actividades fuera de la organización (Alcance 3).

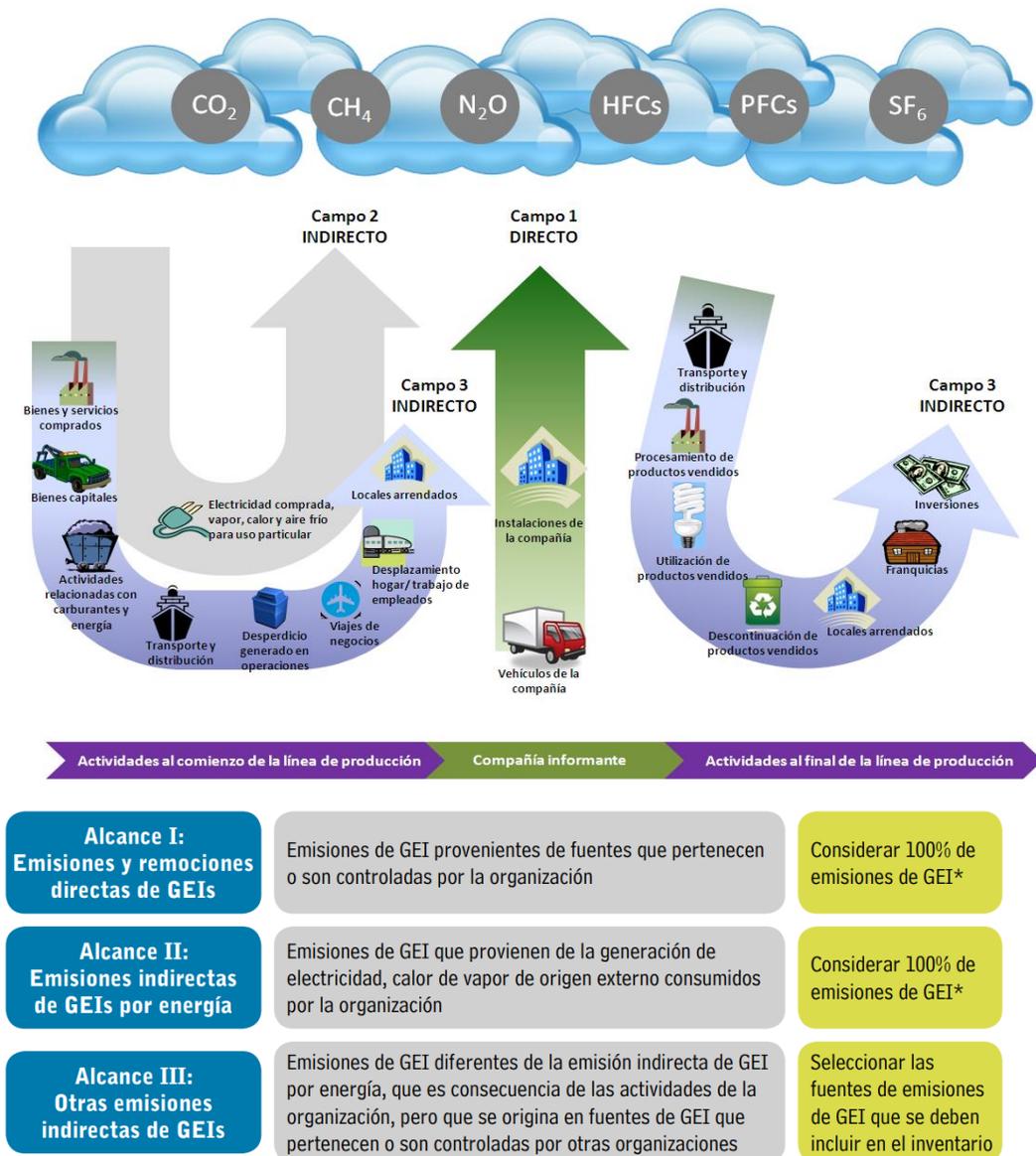


Figura 10. Definición de Alcances según ISO 14064-1 y requisitos [11].

En este estudio se consideran sólo Alcances 1 y 2 para el cálculo de la Huella de Carbono. Estos Alcances quedando definidos como:

- ❑ **Alcance 1:** Se considerarán toda emisión directa que se produce por la utilización de combustibles, en las diferentes etapas de producción. Esto incluye movilidad minera como camiones CAEX, y fuentes fijas como calderas, hornos, u otros.
 - En particular, las emisiones producidas por el uso de explosivos y emulsionantes fueron consideradas dentro del Alcance 1.
- ❑ **Alcance 2:** Se considerarán aquellas emisiones indirectas por acción del consumo eléctrico de equipos en todos los procesos productivos (molienda, flotación, lixiviación, otros). Sólo se considerará el componente fósil para las empresas analizadas.

3.2 Huella de Carbono – Estructuración de la captura de datos, información, cálculo y reporte de la Huella de carbono de las empresas

Para poder elaborar una estructura común para las 13 empresas que participaron en el proceso de Cálculo, se desarrollaron las siguientes actividades:

- ❑ **Reunión General:** Exposición del proceso de cálculo de Huella de Carbono, presentando los Alcances y definiciones. A partir de esta reunión, se solicitaron los diagramas de flujo de los procesos, a fin de delimitar el volumen de control. Dado que algunas empresas poseen su Huella de Carbono calculadas, se consideraron los límites de estas como parte del criterio usado.
- ❑ **Revisión de diagramas y Huella de Carbono:** Durante esta etapa se definió una estructura común de las empresas, según los procesos predominantes en estas. Esta actividad concluye con una planilla de solicitud de información que considera una estructura común, y que incluyó las particulares de cada empresa.
- ❑ **Solicitud y revisión de la información:** Para esta etapa, se generaron reuniones de clarificación de la información solicitada y reportada, a fin de asegurar la correcta reportabilidad de esta.
- ❑ **Cálculo de Huella de Carbono:** Para el proceso de cálculo, se realizó una diferenciación entre factores de emisión de fuentes móviles y fijas para un mismo combustible. Esto asociado a que los procesos fijos y móviles poseen condiciones operativas distintas (ej. temperatura), que afecta en forma directa la producción de gases GEI.

- ❑ **Definición de KPI's:** Se definieron indicadores claves de sustentabilidad (KPI's) para consumo energético y emisión, bajo la necesidad de establecer puntos de semejanza entre las empresas independizando su capacidad productiva, manteniendo la confidencialidad de las huellas entre empresas. Adicionalmente, se toma la decisión de desarrollar los KPI's consumo energético específico e intensidad de emisión. Estos últimos fueron calculados como la emisión asociada a un producto específico (cátodo, ánodo, concentrado de cobre u otro producto metálico o no-metálico).
- ❑ **Reporte de emisiones a la empresa y a la red:** Dado que el presente estudio se enmarca en la Red de Eficiencia Energética y Reducción de Emisiones (en adelante la Red), en donde, los resultados obtenidos son considerados como información confidencial de cada empresa, el presente informe presentará los resultados de una manera global. Pese a esto, a cada empresa se le reportará la información obtenida de este estudio, en la cual se incluye la huella de carbono, las emisiones y consumos energético por proceso, siempre y cuando la empresa haya proporcionado la información solicitada en este nivel de desglose.

El proceso antes mencionado, exceptuando el último, se presenta en forma resumida en la **Figura 11**.

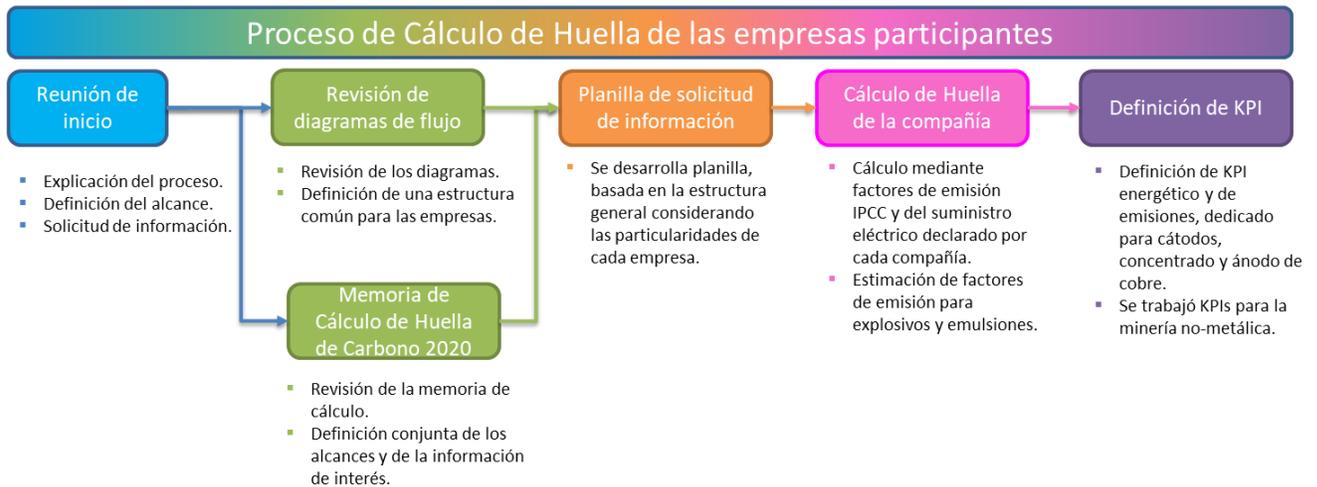


Figura 11. Resumen esquemático de las actividades desarrolladas para el cálculo de Huella de Carbono.

3.3 Huella de Carbono – Estimación de emisiones y KPI.

3.3.1 Emisiones fugitivas por consumo de combustibles.

Para el cálculo de emisiones fugitivas por uso de combustibles, los consumos de combustibles en unidades de MMBtu, Nm³, y litros, fueron llevadas a una base de Tera-Joule. Ello asociado a

que los factores de emisión reportados por la IPCC (Ver **Tabla 3**), se encuentran en esta unidad. Los factores de emisión fueron expresados en toneladas de CO₂equivalentes (o tonCO₂e), al multiplicar el factor de emisión del combustible para cada gas con el potencial de cada gas invernadero según se describió en la **Tabla 2**. Los factores de emisión en tonCO₂e se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Factores de emisión reportados por la IPCC y expresados como tonCO₂e [12], [13].

Sector	Factor de Emisión [kg/TJ]			
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ e.
Fuentes fijas				
Petróleo Diésel	74.100	3	1	74.343
Petróleos Combustibles	73.300	2	1	73.515
Gasolina de motor	69.300	3	1	69.543
Kerosene	71.900	3	1	72.143
Jet kerosene	70.000	3	1	70.243
Gas Licuado	64.200	3	1	64.443
Gas Natural	56.100	1	0	56.155
Gasolina Aviación	70.000	3	10	72.734
Carbón	96.100	10	2	96.778
Gas Corriente	56.100	1	0	56.155
Alquitrán	107.000	10	2	107.678
Fuentes móviles				
Petróleo Diésel	74.100	4	4	75.243
Gas Natural	56.100	92	3	59.471
Fuel Oil	77.400	3	1	77.643
Gasolina	69.300	25	8	72.120

Es así como, las emisiones de CO₂e asociadas al uso de combustibles se calculó usando la siguiente expresión:

$$Emisión\ CO_2e = FE_{CO_2e} \left[\frac{tonCO_2e}{TJ} \right] \cdot Consumo\ Energético \left[\frac{TJ}{año} \right]$$

Para determinar el consumo energético, se calculó usando la expresión siguiente:

$$Consumo\ Energético \left[\frac{TJ}{año} \right] = Consumo\ combustible \left[\frac{m^3}{año} \right] \cdot \rho_{combustible} \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot PCI \left[\frac{TJ}{m^3} \right]$$

Para realizar una comparación a nivel de consumo energético, los consumos de combustibles se expresarán en unidades de MWh⁵. Ello a fin de facilitar la comparación con el futuro uso de distintos energéticos. La **Tabla 4** presenta valores típicos de densidad y Poder Calorífico de gas diésel, gas natural, entre otros combustibles gaseosos y líquidos.

⁵ 1 Tera-Julio es equivalente a 277,78 MWh

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles encontrados en las empresas mineras.

	Densidad [kg/m ³]	PCI	
		[kcal/kg]	[TJ/kg]
Diésel	840	10.900	4,56 x10 ⁻⁵
Fuel Oil 6	945	10.500	4,39 x10 ⁻⁵
GLP	550 ⁶	12.100	5,06 x10 ⁻⁵
Gas Natural	0,717	9.341	3,91 x10 ⁻⁵

3.3.2 Emisiones fugitivas por consumo de eléctrico.

Las empresas que participaron del estudio poseían diferentes fuentes de suministro eléctrico: generación propia por diésel, contratos de energía renovables, contratos de suministro de energía con diferentes fuentes (fósil y renovable) y otras de consumo directo del SEN. En el caso particular de:

- Aquellas que poseían generación eléctrica propia por diésel, estas emisiones fueron consideradas dentro del Alcance 1.
- Empresas que consumían directamente del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) o que no pudieron conseguir el factor de emisión de su proveedor, se utilizó el factor de emisión del SEN.
- En cambio, aquellas empresas que sus procesos eran abastecidos por una línea eléctrica, se consideró los factores de emisión reportado por las empresas suministradoras.

El factor de emisión del SEN para el 2020, fue calculado ponderando los valores de generación mensual y factor de emisión reportados en los sitios Energía Abierta y la Comisión Nacional de Energía [14], [15]. Obteniendo un factor de emisión del SEN igual a:

$$0,383 \text{ [ton CO}_2\text{/MWh]}$$

3.3.3 Estimación de los KPI.

Los consumos energéticos específicos (CEE) fueron calculados al dividir el consumo energético por las toneladas del producto producido, matemáticamente expresado como:

$$CEE \left[\frac{MWh}{ton} \right] = \frac{\text{Consumo energético [MWh]}}{\text{ton producto [ton]}}$$

En donde,

⁶ Valor de densidad en estado licuado, en condiciones de gas la densidad es cercana a los 2,5 kg/m³.

$$\text{Consumo energético} = \text{consumo combustible [MWh]} + \text{consumo eléctrico [MWh]}$$

De igual forma, la Intensidad de Emisión de CO₂e (IE) fue calculada al dividir la emisión de CO₂e por las toneladas de producto producida.

$$IE \left[\frac{\text{tonCO}_2\text{e}}{\text{ton}} \right] = \frac{\text{emisión de CO}_2 \text{ asociada al producción de producto [tonCO}_2\text{e]}}{\text{ton producto [ton]}}$$

4 RESULTADOS

4.1 Análisis global.

En el estudio participaron las siguientes 13 empresas mineras:



Al analizar los diagramas de flujo, se identificaron los principales procesos de cada empresa participante en el estudio (Ver **Figura 12**). Sin embargo, los procesos están condicionados a las plantas que fueron incluidas por cada empresa. En particular, SQM cuyos procesos son distintos a la minería metálica, presentó sólo dos procesos que podrían ser comparables a la minería del cobre/oro.

	AngloAmerican	Candelaria	SQM	ENAMI	CEMIN	Teck	MSP	Pucobre	KGHM Chile	Cerro Negro	Pucobre	Minera Cruz Verde	Minera Rafaela
Ext. y Tronadura	★	★			★	★	★	★	★	★	★	★	★
Chancado	★	★		★	★	★		★	★	★	★	★	
Molienda	★	★		★	★	★	★			★	★		
Espesado/filtrado	★	★	★	★		★	★			★			
Flotación	★	★		★		★	★			★	★		
Extrac. de Solv.	★			★	★			★	★	★			★
Electro-obtención	★			★	★			★	★	★			★
Aglomeración				★	★			★				★	
Fundición	★			★									
Lixiviación	★		★	★	★			★	★	★	★	★	★

Figura 12. Procesos identificados en cada empresa participante.

Al hacer un histograma de los diferentes procesos, se identifica que los procesos de chancado y lixiviación son los que se encuentra con mayor frecuencia en las plantas de las empresas participantes del estudio (Ver **Figura 13**).

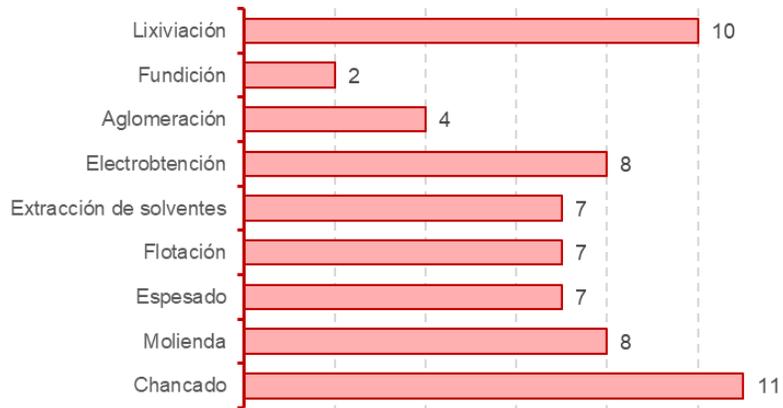


Figura 13. Cantidad de empresas del estudio que poseen los procesos indicados.

Del universo de empresas participantes, 7 empresas producen cátodos de cobre, 8 concentrado de cobre, 2 ánodos de cobre, y 1 barras de oro (Ver **Figura 14**). En particular, SQM produce Cloruro de Potasio, Carbonato de Litio, Hidróxido de Litio, Sulfato de Potasio, Nitrato de Potasio y Yodo.



Figura 14. Empresas agrupadas por tipo mineral producido⁷.

Considerando todas las empresas del estudio, los principales productos por cantidad de mineral procesado son cloruro de potasio (45%), Nitrato de Potasio (24%) y Concentrado de Cobre (19%) (Ver **Figura 15**).

⁷ Minera Rafaela se dedica sólo a la extracción de mineral.

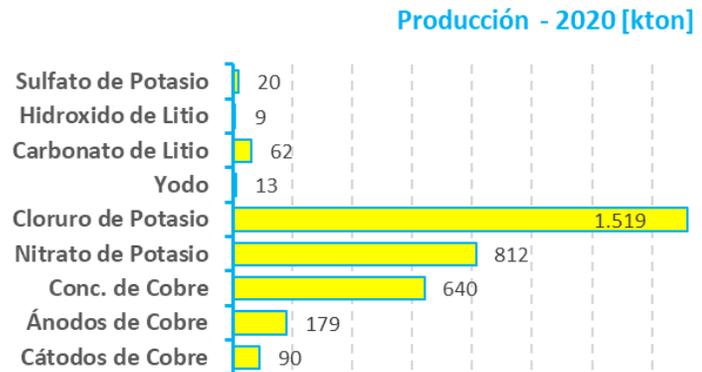


Figura 15. Producción en toneladas brutas de productos metálicos y no-metálicos (2020).

Pese a la alta producción en toneladas de Cloruro y Nitrato de Potasio, en su conjunto representan cerca del 9,8% del consumo energético total. No obstante, la producción de cátodos de cobre (11%) y concentrado de cobre (68%) son los procesos más energéticamente intensivos (Ver **Figura 16**). Es así como, las empresas asociadas al estudio, en su conjunto, posee un consumo energético de 7,79 millones de MWh para el 2020, equivalente a un 31%⁸ del consumo energético de la gran minería del cobre (2019), aproximadamente.

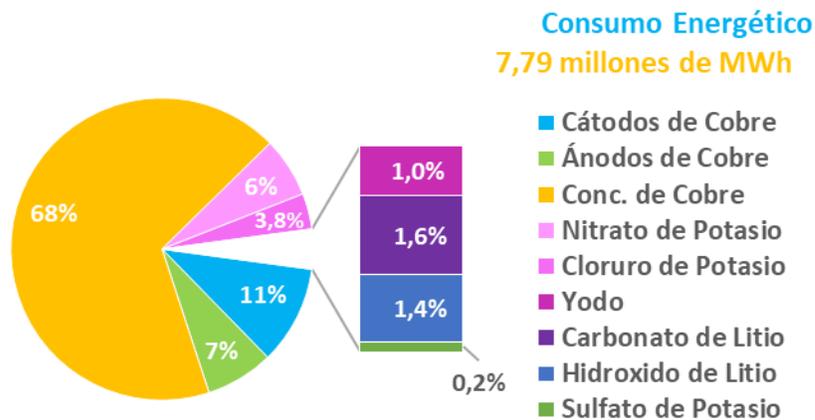


Figura 16. Producción en toneladas brutas de productos metálicos y no-metálicos de las empresas participantes en el estudio en su conjunto (2020).

⁸ Valor incluye el consumo de la minería no metálica.

Huella de la Red (Alc. 1 y 2)
2,86 millones de ton CO_{2e}

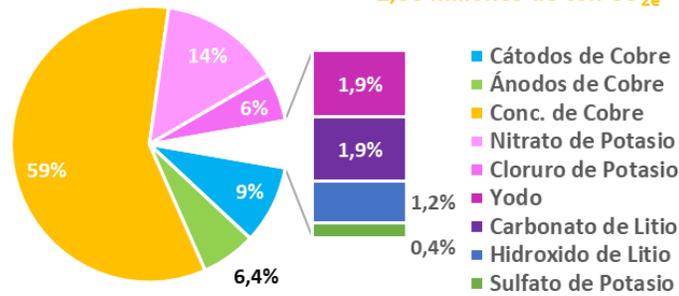


Figura 17. Emisión de CO_{2e} por productos metálicos y no-metálicos (2020).

Al analizar en términos de emisiones, las empresas en su conjunto poseen una Huella de Carbono (Alcance 1 y 2) de 2,86 millones de toneladas de CO_{2e} (Ver **Figura 17**). En donde, el concentrado de cobre (59%), el nitrato de potasio (14%), cátodos de cobre (9%), el Cloruro de Potasio (6%) y el Sulfato de Potasio (6,4%), representan el 94,4% de la emisión total de CO_{2e} de las empresas de la Red.

Dado el interés de la Unión Europea, por gravar las emisiones de los Alcances 1 y 2, establecer las intensidades de emisión del sector minero cobra relevancia para una futura evaluación del impacto sobre la minería nacional (Ver Sección 1). Es así como, la **Figura 18** muestra la variabilidad del consumo específico y de la intensidad de emisión de las empresas estudiadas. Ello permite establecer los rangos de emisión de gases de efecto invernadero por cada tonelada de cobre producida en las empresas consideradas en el estudio. La **Figura 18** además muestra que, la dispersión en las intensidades de emisión de CO_{2e} obtenidas, es atribuible a efecto de los planes de operación durante la pandemia COVID-19 (2020) y su diferenciación en términos de la ley del mineral. Esto último, debido a que disminuciones en la ley del mineral produce aumentos en el consumo energético de los procesos [16].

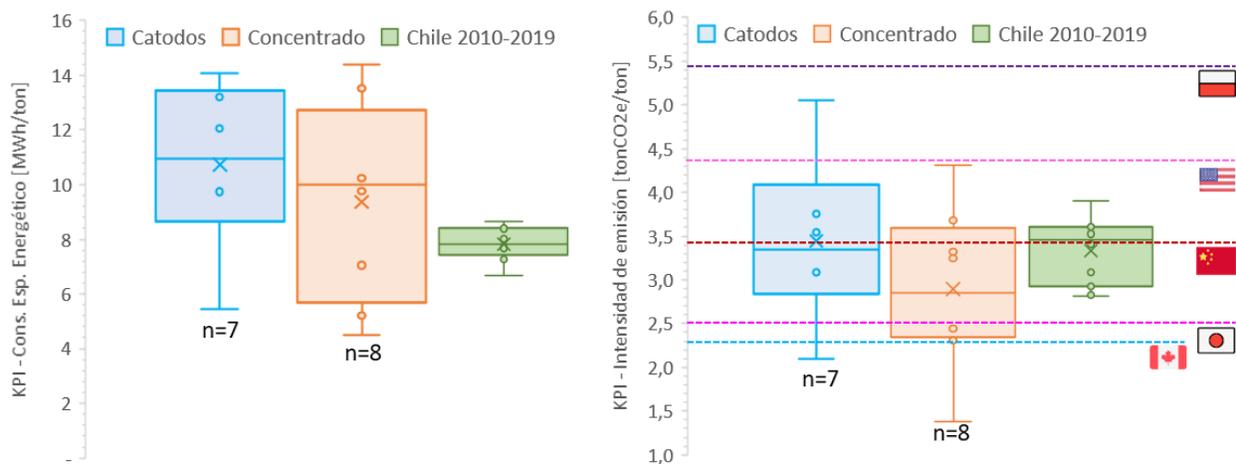


Figura 18. Comparación de tendencias obtenidas de las empresas de la red para cátodos y concentrados, en términos de consumo específico (izq.) e intensidad de emisión (der.), respecto a valores nacionales (2010-2019) e internacionales.

Al comparar las tendencias obtenidas para la red, con las obtenidas para el contexto nacional e internacional (Ver Sección 1.1), se observa una mayor dispersión de los consumos específicos e intensidad de emisión para las empresas de la red. Esto es debido a que el 2020 presenta un escenario COVID-19 que requirió a las empresas implementar medidas de seguridad, que afectaron la eficiencia de los procesos. Pese a lo anterior, estas tendencias establecen un escenario base de comparación para el desarrollo de futuros análisis.

No se presentan diagramas de caja y bigotes para ánodos, y otros productos no-metálicos, debido a que no hay suficientes empresas que participan en el estudio que permitan elaborar una tendencia para los productos considerados (Ver **Figura 14**).

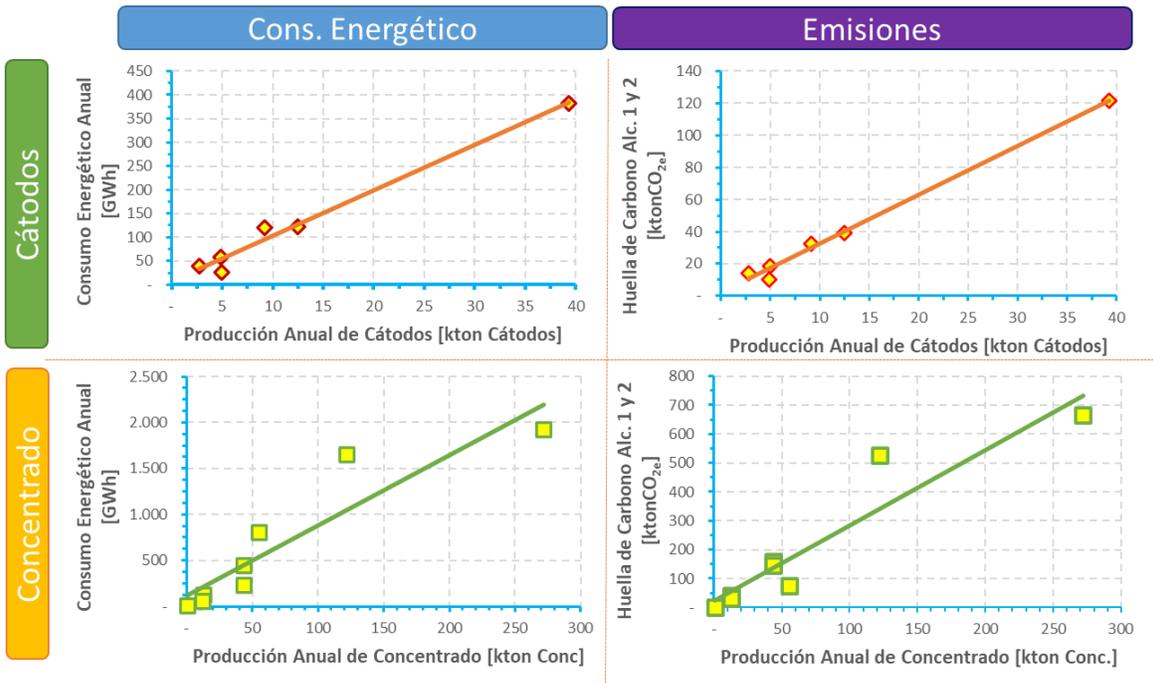


Figura 19. Consumo energético y Huella de carbono en función de la producción anual de cátodo y concentrado (año 2020).

Al analizar los consumos energéticos e intensidad de emisión en función de los niveles de producción, se observa una tendencia lineal entre estos factores (Ver **Figura 19**); como también, una mayor dispersión de la información asociada a la producción de concentrado, el que podría estar asociado a una menor homogeneidad del mineral usado en estas plantas (dureza, ley, otros).

5 CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de emisiones a 13 empresas del sector minero, abarcando desde la pequeña hasta la gran minería metálica y no-metálica. Identificando, que los procesos transversales son el chancado, lixiviación, molienda y electro-obtención. Sin embargo, no todas las empresas incluidas en el estudio tienen el mismo nivel de segregación de consumos por proceso, evidenciando la necesidad de un sistema de reportabilidad de datos e información, estandarizado.

Entre los productos metálicos y no-metálicos, se observó que la producción de cátodos de cobre (10,7 MWh/ton), concentrado de cobre (9,4 MWh/ton), nitrato e hidróxido de litio (11,9 MWh/ton) son los productos que más consumen energía (eléctrico y combustibles). Del consumo total de energéticos (7,43 millones de MWh), el consumo eléctrico representa entre el 20 y el 88% del consumo total; y entre el 60 y 95% de la emisión total (3,18 millones de ton CO₂e). Ello representa un alto potencial de reducción de emisiones para el sector, si se desea cambiar el suministro eléctrico fósil hacia alternativas renovables.

Entre los productos analizados, para la minería del cobre se observó que la producción de cátodos posee los procesos más intensivos en consumo energético y emisiones, mientras que para la minería no-metálica se concluyó que el Yodo es el más intensivo; pese a su menor producción.

Al comparar las tendencias obtenidas en este estudio con valores reportados en la literatura se observó que estos poseen una mayor dispersión a los valores del sector nacional. Ello puede ser atribuido al efecto COVID en la operación minera. No obstante, se recomienda extender y profundizar el estudio, considerando propiedades del mineral (ley, dureza, otros), como también, las características particulares de cada empresa.

Agradecimientos

Agradecemos a todas las empresas que participaron de esta iniciativa, proveyendo información, tiempo y dedicación para alcanzar los objetivos planteados.

REFERENCIAS

- [1] Banco Mundial and Gobierno de Chile, “Oportunidades de crecimiento verde para la meta de descarbonización en Chile.”
- [2] Ministerio de Hacienda, *Ley 20780 - Reforma tributaria que modifica el sistema de tributación de la renta e introduce diversos ajustes en el sistema tributario*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2020.
- [3] Ministerio de Hacienda, *Ley 21210 - MODERNIZA LA LEGISLACIÓN TRIBUTARIA*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2020.
- [4] M. Mena, “Los minerales para la acción climática como catalizadores de la mayor transformación económica e industrial del país.”
- [5] Comisión Chilena del Cobre and Ministerio de Minería, “Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019,” 2019.
- [6] Comisión Chilena del Cobre, “Emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2019,” *Minist. Minería*, 2019.
- [7] D. Dong, L. van Oers, A. Tukker, and E. van der Voet, “Assessing the future environmental impacts of copper production in China: Implications of the energy transition,” *J. Clean. Prod.*, vol. 274, p. 122825, 2020.
- [8] A. Boulamanti and J. A. Moya, “Production costs of the non-ferrous metals in the EU and other countries: Copper and zinc,” *Resour. Policy*, vol. 49, pp. 112–118, 2016.
- [9] Ministerio del Medio Ambiente, “Huella de Carbono.” [Online]. Available: <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>. [Accessed: 01-May-2021].
- [10] ISO, “Parte 1 - Especificación con orientación, a nivel de organizaciones para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero,” in *ISO 14064*, vol. 1, 2006.
- [11] Ihobe and Sociedad Pública de Gestión Ambiental, “Guía metodológica para la aplicación de la norma UNE-ISO 14064-1:2006 para el desarrollo de inventarios de Gases de Efecto Invernadero en organizaciones,” *14064-1:2006*, vol. 1, no. UNE-ISO, p. 106, 2012.
- [12] IPCC, “Combustión Móvil,” in *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, 2006, p. 78.
- [13] IPCC, “Combustión estacionaria,” in *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, 2006, pp. 1–47.
- [14] Comisión Nacional de Energía, “Estadísticas - Generación Bruta SEN,” 2021. [Online]. Available: <https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/>. [Accessed: 12-Apr-2021].
- [15] Comisión Nacional de Energía and Energía Abierta, “Energía Abierta - Factor de Emisión promedio mensual,” 2021. [Online]. Available: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/245974/factor-de-emision-promedio-mensual/>. [Accessed: 12-Apr-2021].
- [16] G. M. Mudd, R. Memary, S. A. Northey, D. Giurco, S. Mohr, and L. Mason, “Future Greenhouse Gas Emissions from Copper Mining: Assessing Clean Energy Scenarios,” *Clust. Res. Rep.*, vol. 1.12, no. 1, pp. 1–32, 2012.