



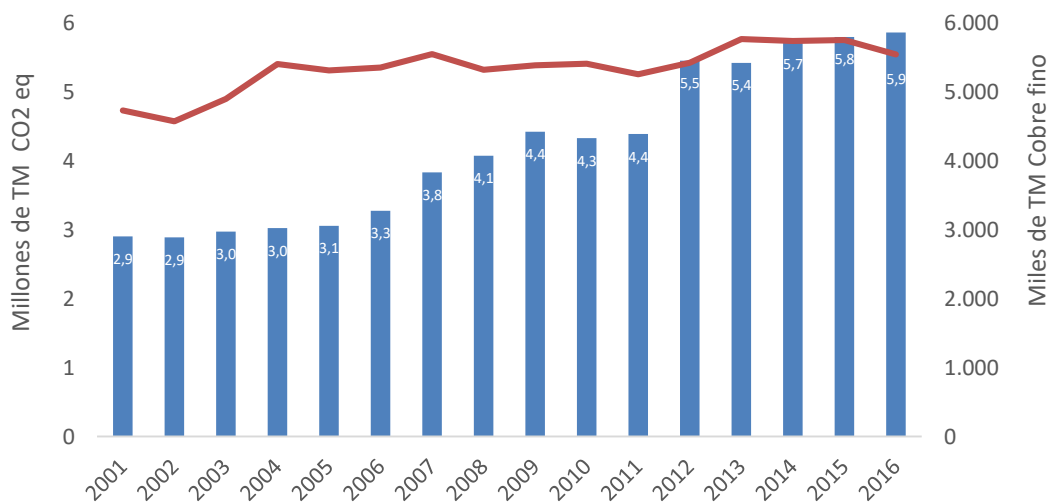
Informe de actualización de emisiones de gases de efecto invernadero directos e indirectos en la minería del cobre al año 2016

DEPP 30 /2017

Resumen Ejecutivo

Durante el año 2016 se registraron emisiones directas de GEI por un total de 5,87 millones de toneladas de CO2 equivalente en la minería del cobre en Chile, un 1,1% más que las emisiones registradas durante el año 2015, variación que implica un aumento de las emisiones en alrededor de 60 mil toneladas de CO2 equivalente.

Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile, 2001 -2016

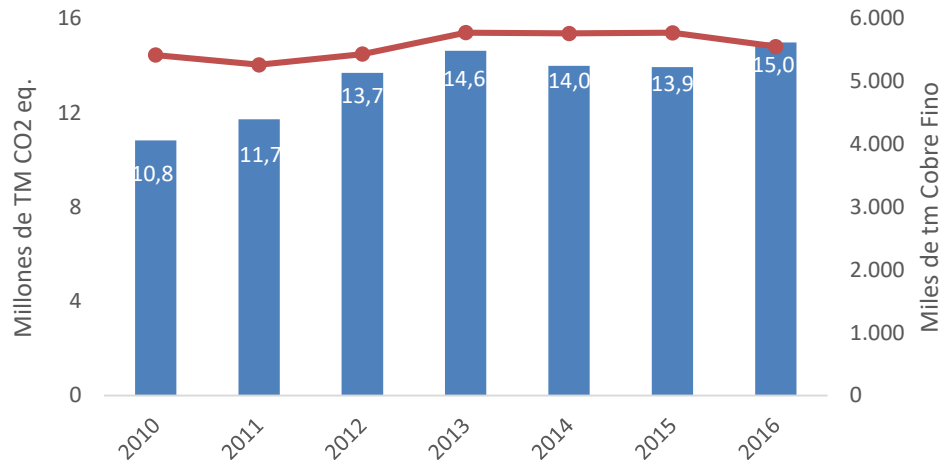


Fuente: Cochilco

Como ha sido la tendencia en los últimos años, el combustible más utilizado en la producción minera de cobre sigue siendo el diésel, el cual concentra más del 88,8% del total de combustibles incorporados en los procesos de producción de cobre en Chile. A distancia, el uso de Gas natural y Enap 6 siguen manteniendo relativa estabilidad su volumen de uso, lo que reduce en 0,6% su posición conjunta en pro de un mayor consumo de diésel.

En cuanto a los procesos, el de mayores emisiones de GEI es la extracción desde la mina rajo, el cual durante el año 2016 registró 4,6 millones de TM de CO2 equivalente, un 1,39% más que lo cuantificado en el año 2015. Sin embargo, el material extraído desde la mina rajo se redujo en un 6,3% entre los años 2015 y 2016, sosteniendo la tesis de que mayores consumos de energía se deben a mayores distancias de acarreo desde el punto de extracción hasta la planta de proceso.

En términos de emisiones indirectas de GEI, la minería del cobre en Chile emitió durante el año 2016 un total de 15,0 millones de toneladas de CO2 equivalente, corresponde a un aumento del 7,4% respecto del año 2015.

Emisiones indirectas de GEI totales y producción de la minería del cobre en Chile

Fuente: Cochilco

El proceso de concentración de mineral el año 2016 registro un total de 7,6 millones de toneladas de CO2 equivalente, lo que corresponde a un aumento del 15,8% respecto del año 2015. En términos de participación, el proceso representa el 50,8% de las emisiones GEI indirectas de la minería del cobre. Por otro lado, el proceso de lixiviación ha disminuido levemente en el último año en 2,4% producto del menor consumo de electricidad proveniente del Sistema Interconectado del Norte Grande.



Índice

Resumen Ejecutivo	I
1. Introducción	5
2. Metodología	6
2.1. Metodología de cálculo de GEI Directos.....	6
2.2. Metodología de cálculo de GEI indirectas	8
3. Emisión de GEI Directos en la Minería del Cobre en Chile	10
3.1. Emisión total de GEI directos en la minería del cobre en Chile.....	10
3.2. Emisión de GEI directos por proceso en la minería del cobre en Chile	13
3.3. Emisión de GEI directos por región en la minería del cobre en Chile.....	15
3.4. Coeficientes unitarios de emisión de GEI en la minería del cobre en Chile	16
4. Emisión de GEI Indirectos en la Minería del Cobre en Chile	18
4.1. Emisión total de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile.....	18
4.2. Emisión por proceso de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile	20
4.3. Emisión por región de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile	21
4.4. Emisiones en los Sistemas SING y SIC de GEI Indirectos de la minería del cobre.....	23
5. Comentarios Finales	25



Índice de figuras

Figura 1 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 - 2016.....	10
Figura 2 Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile, 2001 -2016	11
Figura 3 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustibles, 2016	12
Figura 4 Consumo de combustibles por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016	13
Figura 5 Emisiones de GEI directo de la minería del cobre por procesos, 2001 – 2016	14
Figura 6 Consumo de combustibles y emisiones de GEI por Región, 2016.....	15
Figura 7 Emisiones de GEI por tonelada de cobre fino, 2001 - 2016	16
Figura 8 Emisiones de GEI por Ton. de mineral extraído en mina rajo, 2001 - 2016.....	16
Figura 9 Emisiones de GEI por cobre fino contenido en Fundición y Lixiviación, 2001 -2016	17
Figura 10 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2010 – 2016	18
Figura 11 Emisiones indirectas de GEI totales y producción de la minería del cobre en Chile.....	19
Figura 12 Coeficiente unitario global de emisiones indirectas de GEI de la minería del cobre en Chile .	19
Figura 13 Consumo de electricidad por proceso minero, 2010 – 2015	20
Figura 14 Emisiones y Participación de GEI indirectas por procesos, 2010 – 2016	21
Figura 15 Consumo de electricidad en la minería del cobre por región, 2015	22
Figura 16 Emisiones Indirectas de GEI y su participación por región, 2010 – 2016.....	22
Figura 17 Consumo de Energía eléctrica y emisiones de GEI indirectos en Sistemas SING-SIC, 2016.....	23
Figura 21 Potencia instalada del SING y SIC, 2016.....	24
Figura 19 Emisiones de GEI indirectos por proceso en Sistemas SING-SIC, 2016.....	24

Índice de tablas

Tabla 1 Factores de emisión y fracción de carbono oxidado	7
Tabla 2 Factores de emisión de CH ₄ y N ₂ O	8
Tabla 3 Factores de emisión de GEI según Sistema Interconectado.....	9



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 y resiliencia del cambio climático. En él, los países firmantes se comprometen entre otras cosas a aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Precisamente, en pro del logro de este objetivo, es que se hace fundamental la medición precisa, permanente y estandarizada de los Gases de Efecto Invernadero que se emiten en cada país.

En sintonía con lo expuesto, un cálculo preciso, metodológicamente consistente y permanente por sector productivo en cada país, permite esclarecer si las políticas adoptadas, el recambio tecnológico u otro factor atingente, impacta en la disminución u aumento progresivo del volumen de emisiones de GEI, ya sea a nivel total o unitario por unidad de producto. En esta línea, la Comisión Chilena del Cobre ha entregado desde 2004 información relevante para el desarrollo sustentable del sector minero chileno, y ha sostenido permanentemente una línea de trabajo encausada en la cuantificación de las emisiones de GEI directos e indirectos.

Por lo tanto, la actualización de la cuantificación de emisiones de GEI directas e indirectas al año 2016 de la minería del cobre chilena expuestas en éste informe, continua con un proceso que culmina con el cumplimiento de los compromisos pactados por el país. Para ello, 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. La información base considera los consumos energéticos de 56 operaciones mineras representativas del 99,3% de la producción chilena de cobre fino.

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 se presentan los principales resultados de la medición para las emisiones directas, los cuales consideran la segregación por tipo de proceso minero y región, misma que es presentada en el capítulo cuarto de emisiones indirectas. Finalmente, en la sección 5 se entregan comentarios finales del informe.



2. Metodología

Al igual que las ediciones anteriores del Informe de actualización de emisiones de GEI directos e indirectos en la minería del cobre, 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, las cuales se transforman a sus equivalentes en emisiones de gases de efecto invernadero, dando como resultado las emisiones de GEI por proceso y región.

En consecuencia, el estudio acota su campo de cobertura al registro de emisiones de Alcance 1¹ y 2² 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 las metodologías utilizadas para la contabilización de las emisiones contenidas en el documento.

2.1. Metodología de cálculo de GEI Directos

El cálculo de las emisiones de GEI directos se circunscribe a las emisiones de Dióxido de Carbono CO₂, Metano CH₄ y Óxido Nitroso N₂O, puesto que éstos son los GEI relevantes para el caso de la minería del cobre. En esta sección, la estimación se limita a las emisiones directas o de alcance 1, que corresponden a aquellas generadas por la combustión de combustibles fósiles en el proceso de producción de cobre.

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, concentradora, lixiviación (LXSXEW), fundición, refinería y servicios.

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 Diesel, Kerosene, Petróleo Combustible, Nafta, Gasolina, Gas Licuado, Gas Natural, Carbón y Leña.

Las emisiones se calculan en términos de CO₂ equivalente asociadas a cada tipo de combustible.

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.



$$Gf = Ef \times Eff \times FOC \times \frac{44}{12}$$

Donde:

- Gf = Emisiones de Carbono (ton CO₂ equivalente).
- Ef = Energía calculada para ese consumo de combustible (TJ).
- Eff = Factor de emisión del combustible (ton C/TJ).
- FOC = Fracción de carbono oxidado.
- $44/12$ = Relación entre los pesos moleculares del Dióxido de Carbono (CO₂) y el Carbono (C).

Los valores utilizados para el factor de emisión del combustible (Eff) y la fracción de carbono oxidado (FOC) se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Factores de emisión y fracción de carbono oxidado

Tipo de Combustible	Factor de Emisión Eff (Kg/GJ)	Fracción de carbono oxidado (FOC)
Diesel	20,2	1
Enap 6	21,1	1
Kerosene	19,6	1
Petróleo Combustible	21,1	1
Nafta	20	1
Gasolina	18,9	1
Gas Licuado	17,2	1
Gas Natural	15,3	1
Carbón	25,8	1
Leña	30	1

Fuente: Guía GEI 2006, IPCC

Ahora bien, para determinar las emisiones de los gases CH₄ y N₂O asociadas al uso directo de cada tipo de combustible, se utilizaron las fórmulas de conversión mostradas a continuación.

$$\text{Emisión CH}_4 = Ef \times \text{Factor de Emisión CH}_4 \times \frac{21}{1000}$$

$$\text{Emisión N}_2\text{O} = Ef \times \text{Factor de Emisión N}_2\text{O} \times \frac{310}{1000}$$

Donde:

- Emisión CH_4 = Emisiones de CH₄ expresadas como emisiones de CO₂ equivalente (ton CO₂ equivalente)
- $\text{Emisión N}_2\text{O}$ = Emisiones de N₂O expresadas como emisiones de CO₂ equivalente (ton CO₂ equivalente)

De acuerdo a la guía GEI 2006, IPCC, los factores de emisión son función del tipo de combustible y del tipo de uso que se le ha dado. Generalmente las emisiones de CH₄ y N₂O son menores que las emisiones de CO₂, sin embargo, su potencial de calentamiento global por unidad de masa es mayor. En el caso del metano (CH₄), el potencial de calentamiento global por unidad de masa es 21 veces mayor que en el caso del CO₂ y en el caso del óxido nitroso (N₂O) es 310 veces mayor, es por ello que para expresarlas como emisiones de CO₂ equivalentes se multiplican por esos factores respectivamente.

En la Tabla 2 se indican los factores de emisión para cada gas según tipo de combustible y el uso que se le da.

Tabla 2 Factores de emisión de CH₄ y N₂O

Tipo de Combustible	Uso	Factor de Emisión CH ₄ (Kg/TJ)	Factor de Emisión N ₂ O (Kg/TJ)
Diesel	Vehículos Pesados	4	2
Gasolina	Vehículos Livianos	7,5	43
Enap 6	Secadores / Hornos	1	1,5
Petróleo	Secadores	1	0,6
Diesel	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 de los Sistemas Interconectados del Norte Grande (SING) y del Central (SIC) (Promedio tCO₂eq/MWh). En la fórmula siguiente se muestra el cálculo de las mencionadas emisiones para cada sistema interconectado:

$$GEI2_Mineria_i = fac_emisión_GEI2_i \times \sum_j \sum_k consumo_electrico_{ijk}$$

Donde:

- *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.
- $fac_emisión_GEI2_i$: corresponde al factor de emisión de GEI de la matriz energética del sistema interconectado i publicado por el Ministerio de Energía.
- $consumo_electrico_{ijk}$: corresponde al consumo eléctrico del proceso k , de la faena j , perteneciente al sistema interconectado i .

Se debe notar que para el año 2018 se proyecta la puesta en marcha de un solo gran Sistema Interconectado de suministro de energía a nivel nacional, por lo que la fórmula de estimación será simplificada, dado que los factores de emisión de cada sistema se fusionara y el set de faenas incluidas será dependiente de solo un gran suministrador de energía. En tanto, para la estimación correspondiente al año 2016, se mantiene el suministro en base a los dos sistemas interconectados que proveen de energía eléctrica a las faenas mineras de cobre: el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC).

Las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de electricidad están directamente relacionadas con la composición de la matriz energética de cada sistema interconectado, 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. Desde el año 2010 el Ministerio de Energía publica los factores de emisión promedio para dichos sistemas interconectados, donde varían 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 – 2015.

Tabla 3 Factores de emisión de GEI según Sistema Interconectado

Año	Factor SIC (tCO ₂ eq/MWh)	Factor SING (tCO ₂ eq/MWh)
2010	0,346	0,715
2011	0,379	0,725
2012	0,391	0,806
2013	0,432	0,811
2014	0,36	0,79
2015	0,346	0,764
2016	0,398	0,769

Fuente: Ministerio de Energía

Cabe señalar que comparativamente el menor valor del factor de emisión del SIC respecto del SING, se explica porque el SIC tiene 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 es en gran parte térmica.



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

En el presente acápite se presentan los resultados de la medición de emisiones de Gases de Efecto Invernadero directos de la industria minera chilena para el año 2016 y su variación respecto de periodos previos, en toneladas de CO2 equivalente.

Tal como se comentó en la sección previa, las emisiones directas de GEI en la minería del cobre son calculadas sobre el uso de combustibles fósiles, siendo los principales diésel, gas natural y Enap 6, sin embargo, en la cuantificación también se han registrado las emisiones por consumo de kerosene, carbón, gas licuado, gasolina, leña y propano.

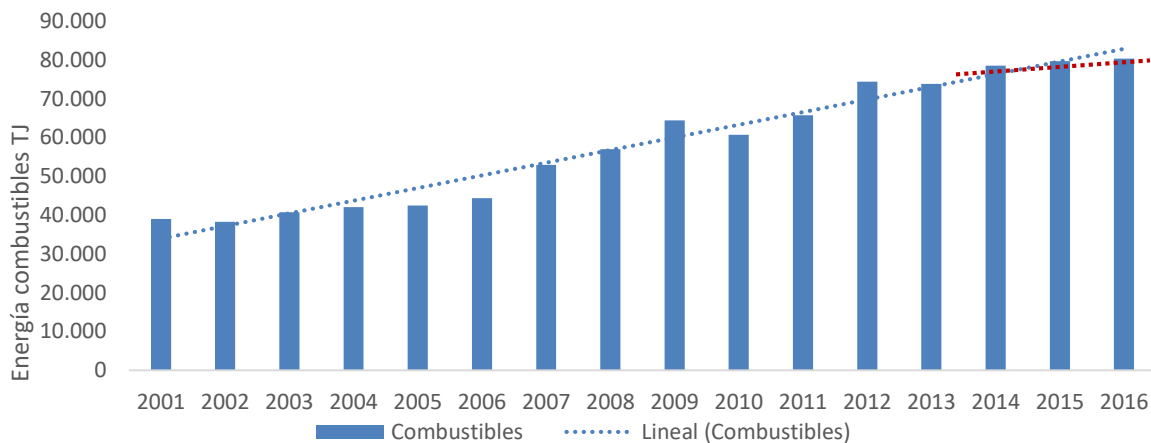
En las secciones 3.1, 3.2 y 3.3 se presentan los consumos de energía en base a combustibles utilizados en terajoules, agregado a nivel nacional como como segregado por tipo de combustible, por proceso minero y región en la que son consumidos. Junto con ello, se presenta la cuantificación de emisiones de GEI directos siguiendo los mismos criterios.

Luego en la sección 0 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

Si bien el consumo de combustibles se ha duplicado en 15 años, luego de crecer a tasas promedio de 5,1% durante dicho periodo, en el último trienio se ha manifestado un estancamiento en crecimiento del nivel de energía en base a combustibles fósiles utilizadas en la minería del cobre. En el año 2016 el consumo total de energía en base a combustibles alcanzó los 80.256 TJ, solo un 0,8% más que el año previo, confirmando este escenario. En la Figura 1 se presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles en el periodo 2001 – 2016, en terajoules.

Figura 1 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 - 2016



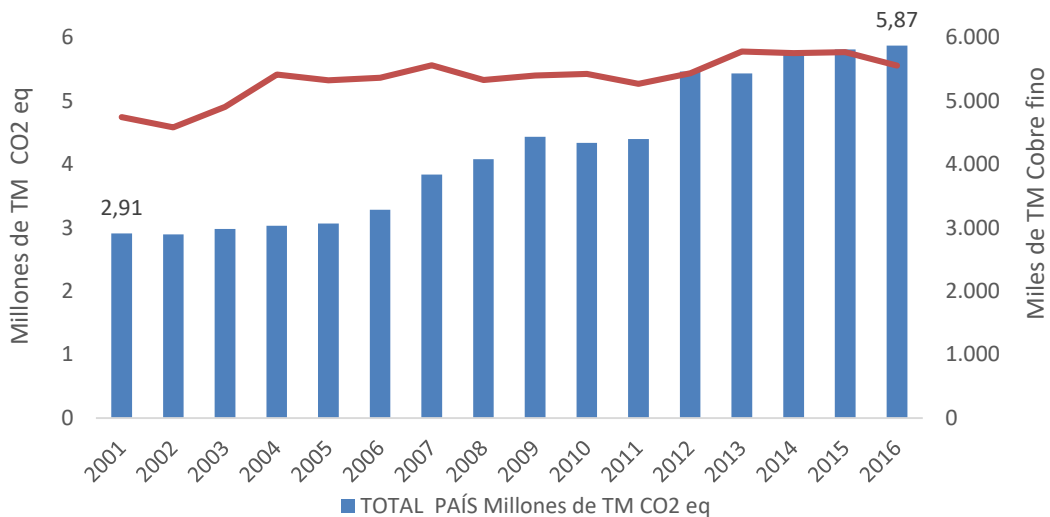
Fuente: Cochilco

Uno de los factores que justifica las menores tasas de crecimiento en el consumo de energía, es el menor nivel de producción agregada de cobre fino del año 2016 y que preserva un periodo de estancamiento productivo del mineral iniciado en 2014. Es por este motivo que en el último trienio las necesidades de energía de combustibles se han desacelerado llegando a promediar un 2,9%, ritmo considerablemente menor al registrado en los últimos 15 años.

A pesar de la menor producción agregada de cobre fino, los resultados de la EMPAE 2016 evidencian aumentos sucesivos en el consumo de combustibles en procesos como la extracción mina y concentración, esto, debido a las mayores distancias de acarreo de mineral desde mina a planta y la disminución de leyes de mineral promedio de las grandes faenas productoras. Además, la tendencia del mercado hacia la producción de concentrados, implica también un mayor consumo residual de combustibles pues este proceso es intensivo en el uso de energía, sobretodo eléctrico.

En consecuencia, durante el año 2016 se registraron emisiones directas de GEI por un total de 5,87 millones de toneladas de CO₂ equivalente en la minería del cobre en Chile, un 1,1% más que las emisiones registradas durante el año 2015, variación que implica un aumento de las emisiones en alrededor de 60 mil toneladas de CO₂ equivalente.

Figura 2 Emisiones de GEI y producción de la minería del cobre en Chile, 2001 -2016

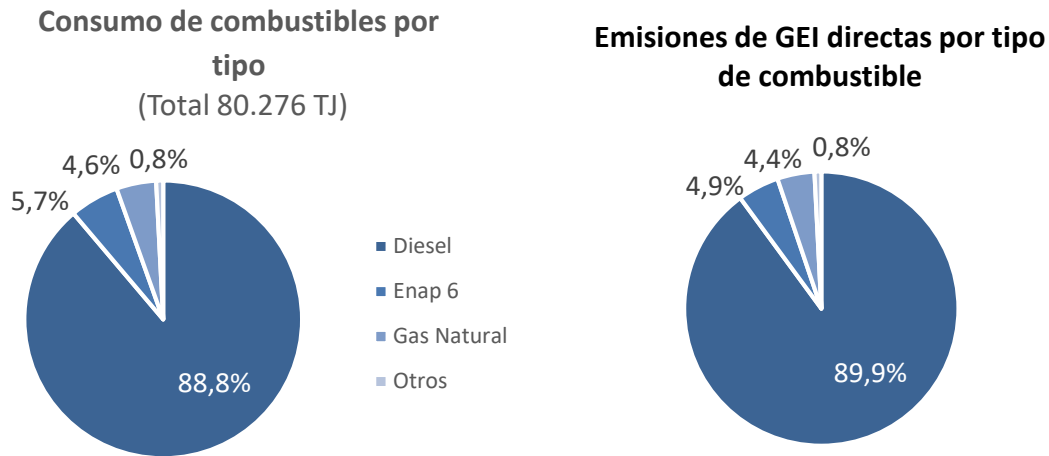


Fuente: Cochilco

Como ha sido la tendencia en los últimos años, el combustible más utilizado en la producción minera de cobre sigue siendo el diésel, el cual concentra más del 88,8% del total de combustibles incorporados en los procesos de producción de cobre en Chile. A distancia, el uso de Gas natural y Enap 6 siguen manteniendo relativa estabilidad su volumen de uso, lo que reduce en 0,6% su posición conjunta en pro de un mayor consumo de diésel.

En la Figura 2 se presenta el consumo por combustible por tipo, en terajoules para el año 2016 y su consecuente estimación de emisiones de GEI. El cambio en los porcentajes de uso y emisiones observados obedece a los mayores factores de emisiones de GEI del Enap 6 y el diésel por sobre el gas natural expuestos en Tabla 1 y Tabla 2.

Figura 3 Consumo y emisiones de GEI directas por tipo de combustibles, 2016



Fuente: Cochilco

El segundo combustible más utilizado en 2016 continuó siendo el Enap 6, el cual prácticamente no registró variaciones respecto al periodo anterior, hecho consistente con la acotada variación del mineral tratado en plantas de fundición y refinerías, las cuales aumentaron en 0,41% y 4,15% respecto del periodo anterior respectivamente.

El uso de Enap 6, o Fuel Oil n°6, ha reducido consistentemente su participación en set de combustibles en la minería en el último quinquenio, producto de un descenso sostenido en el volumen del energético utilizado. Si bien el año 2016 se registró una disminución del consumo en 2,1% respecto de 2015, en los últimos 5 años la tasa de variación promedia un -9%.

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 fueloil destilados son extraídos a través de la destilación. En términos concretos, las emisiones de GEI en 2016 producto del menor uso de Enap 6 disminuyeron en 80 mil toneladas de CO2 equivalente respecto de 2015.

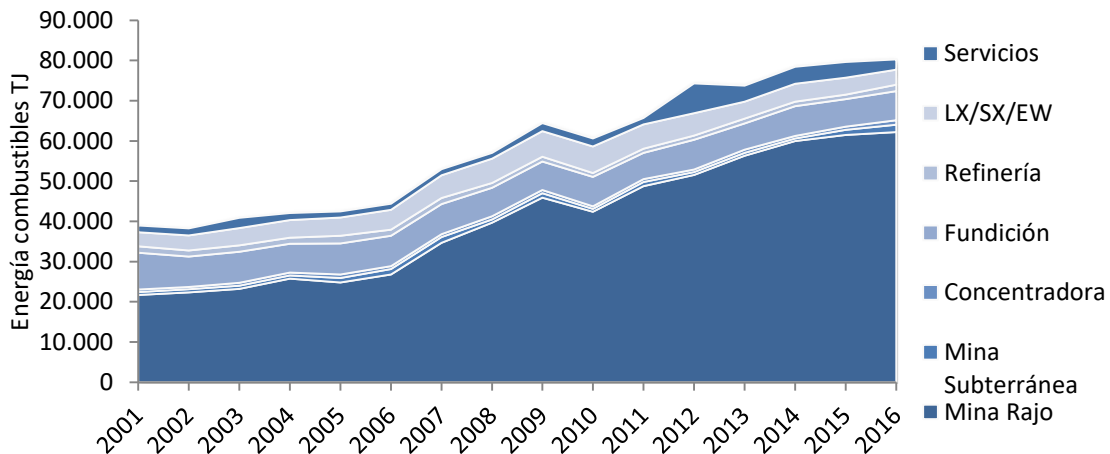
La normativa ambiental vigente desde 2013 establece nuevas metas de captura de material particulado al ambiente, específicamente de arsénico y azufre, lo cual ha impulsado a las empresas a mejorar sus sistemas de control de emisiones en plantas de fundición y refinería, a través de la implementación de unidades de tratamiento de gases para las unidades de hornos de refinó y hornos de limpieza de gases, el recambio de equipos, por ejemplo de secado, y el reemplazo de insumos energéticos como el Enap 6 o diésel por otros menos contaminantes como el gas natural o la electricidad.

3.2. 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 el consumo de combustibles en unidades de energía. En la Figura 4, se presenta el consumo agregado de energía en base a combustibles por proceso minero entre los años 2001 y 2016, en ella **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el estancamiento generalizado del uso de combustibles en los últimos años, en especial para la explotación de mina rajo.

El proceso de extracción de mina rajo, que representó cerca del 77,5% de los requerimientos de energía en 2016, aumentó solo un 1,2% respecto del periodo anterior, tasa considerablemente menor al ritmo promedio de 8,1% del periodo 2001 – 2015. El combustible más utilizado en este proceso es el diésel, principal insumo de los camiones extractores de mineral, demandando el 87% del diésel utilizado por toda la minería chilena el año 2016. Sin embargo, la producción de hidrógeno en el país a partir de la energía solar en el norte de Chile, abre un set de opciones a la gran minería en materia económica y ambiental. En esta línea Corfo continúa con un programa de desarrollo tecnológico que permita adaptar, desarrollar e industrializar el nuevo sistema dual de combustión hidrogeno-diesel. Lo que permitiría alcanzar niveles de sustitución de diésel de hasta un 80%³.

Figura 4 Consumo de combustibles por proceso minero, nivel nacional 2001 – 2016

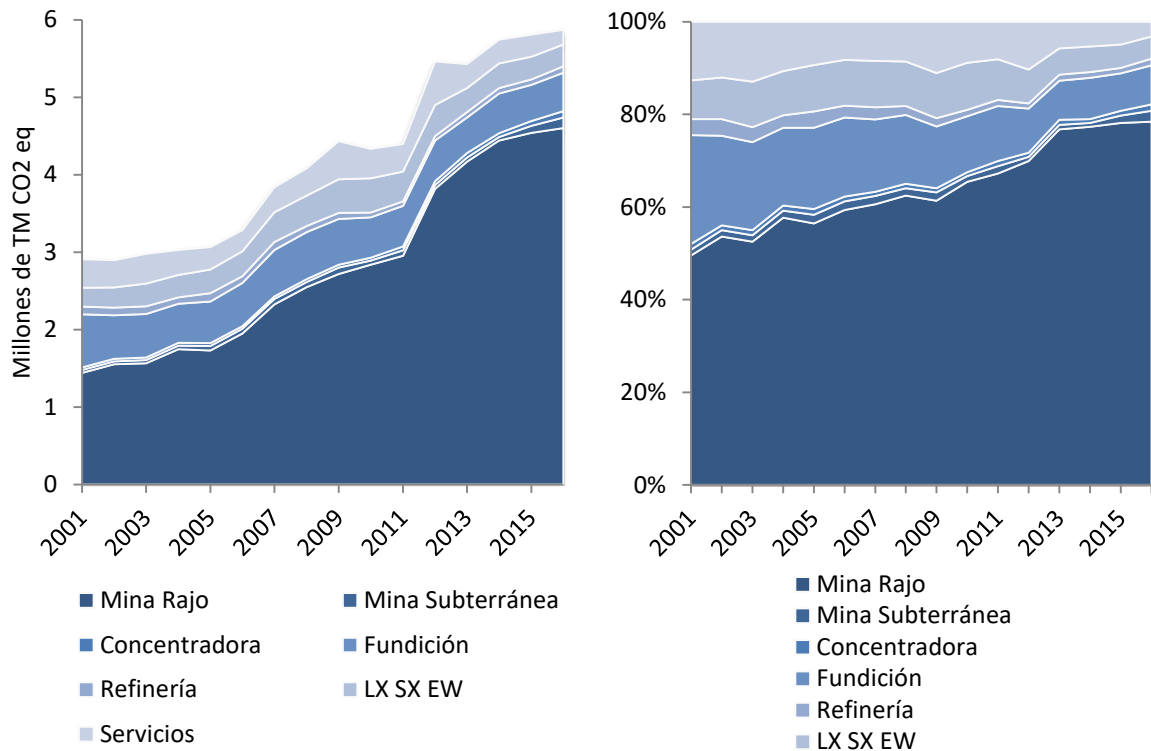


Fuente: Cochilco

En cuanto al proceso de Fundición, que en el año 2016 registró el segundo mayor consumo de energía con 7.286 TJ, no presenta mayores variaciones respecto de niveles de energía requeridos para su ejecución en años previos. Esto, debido 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. Sin ir más lejos, el registro nominal de energía requerida en 2016 no dista del promedio del periodo 2001 – 2016, equivalente a 7.375 TJ.

³ Eduardo Bitran, Vicepresidente ejecutivo de Corfo, 2017



Figura 5 Emisiones de GEI directo de la minería del cobre por procesos, 2001 – 2016

Fuente: Cochilco

En consecuencia, el proceso con mayores emisiones de GEI es la extracción desde la mina rajo, el cual el año 2016 se expulsaron 4,6 millones de TM de CO2 equivalente, un 1,39% más que lo cuantificado en el año 2015. Sin embargo, el material extraído desde la mina rajo se redujo en un 6,3% entre los años 2015 y 2016, sosteniendo la tesis de que mayores consumos de energía se deben a mayores distancias de acarreo desde el punto de extracción hasta la planta de proceso.

Las emisiones provenientes de este proceso representan el 78,4% del total de GEI de la industria minera del cobre chilena y dado lo planteado en el párrafo previo, se estima siga incrementando su pesos relativo, de no incorporarse medidas como la sustitución del diésel como insumo primario o mejoras tecnológicas.

Luego, en el proceso de fundición de cobre se cuantifican 0,49 millones de toneladas de CO2 equivalente durante el 2016, un 5,2% más que lo registrado en el año 2015 y equivalente al 8,4% del total de emisiones de GEI de la minería del cobre en Chile. El aumento registrado corresponde a al aumento del mineral procesado en tostadora de Ministro Hales, había planificado su capacidad de diseño para el año 2016, además, marginalmente afectaron las 42 mil toneladas adicionales de concentrado fundido en el periodo.

Finalmente el tercer proceso que sigue en importancia de emisiones de GEI directos es el proceso de LX-SX-EW con 0,28 millones de toneladas de CO2 equivalentes emitidas en 2016. Este proceso ha registrado sucesivas bajas en los niveles de emisiones en el último quinquenio a pesar de que el

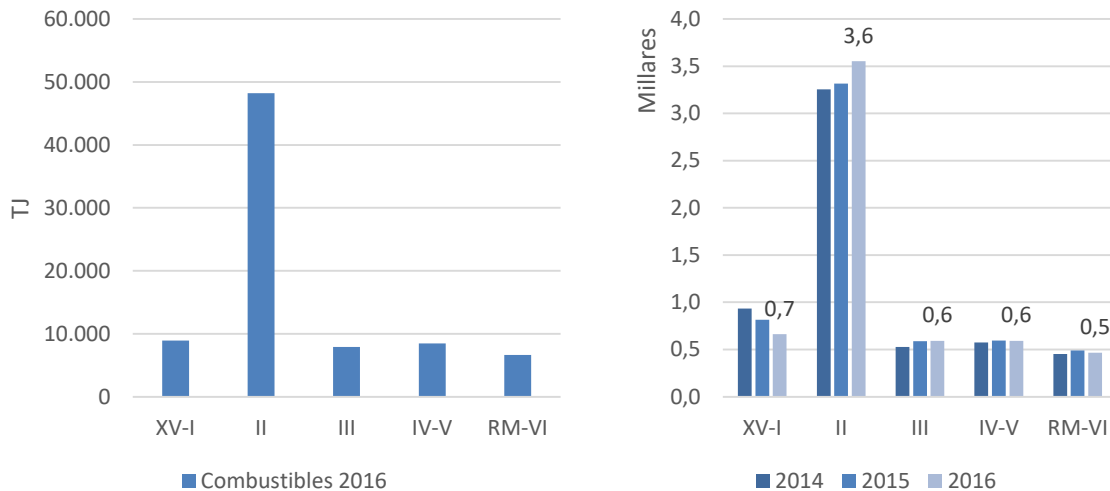


mineral tratado en plantas de lixiviación ha aumentado, debido a las menores leyes. La razón, se debe a un reemplazo del diésel utilizado por otras fuentes de energía, como la electricidad.

3.3. Emisión de GEI directos por región en la minería del cobre en Chile

En la Figura 6 se presenta el consumo total de combustibles y el nivel de emisiones de GEI en el año 2016. En la figura izquierda se observa el mayor consumo de combustible requerido en la región de Antofagasta, el cual alcanzó los 48.253 TJ, registrando un 7,5% más que en 2015 y abarcando el 60% del total de combustibles consumidos en Chile por la minería del cobre.

Figura 6 Consumo de combustibles 2016 y emisiones de GEI por región 2014-2016



Fuente: Cochilco

Consecuencia del alto consumo de combustibles es que en Antofagasta se emitieron 3,6 millones de toneladas de CO₂ equivalentes durante el año 2016, un 7,1% más que el año anterior y totalizando un 60,6% del total de emisiones a nivel nacional. Esto debido a que en la región se concentran las mayores operaciones de minas a rajo abierto del país, como Escondida, Chuquicamata o Sierra Gorda, lo que implica que el 64,6% de la producción de mina rajo sea desde la segunda región.

En el panel de la derecha de la Figura 6 se puede ver que solo en la región de Antofagasta aumentó significativamente el nivel de emisiones de GEI durante el año 2016, en oposición a lo evidenciado en las otras regiones mineras de Chile en las que el nivel de emisiones se redujo un 5,8%, es decir, el conjunto de regiones conformado por la XV y I disminuyeron su nivel de emisiones en 18,7%, la metropolitana y VI un 4,5%, mientras la III, IV y V se mantuvieron estables.

3.4. Coeficientes unitarios de emisión de GEI en la minería del cobre en Chile

Un buen indicador es el coeficiente unitario de emisiones de GEI en la minería del cobre en Chile, el cual presenta un nivel de emisiones de GEI directos por tonelada de cobre fino producido en el país. La Figura 7 presenta la evolución del indicador entre los años 2000 y 2016, el cual ha ido en constante crecimiento en los últimos 16 años producto del mayor consumo de combustibles, tanto por una mayor producción de cobre, como a cambios estructurales que han afectado a la minería chilena, siendo el envejecimiento de las minas el principal.

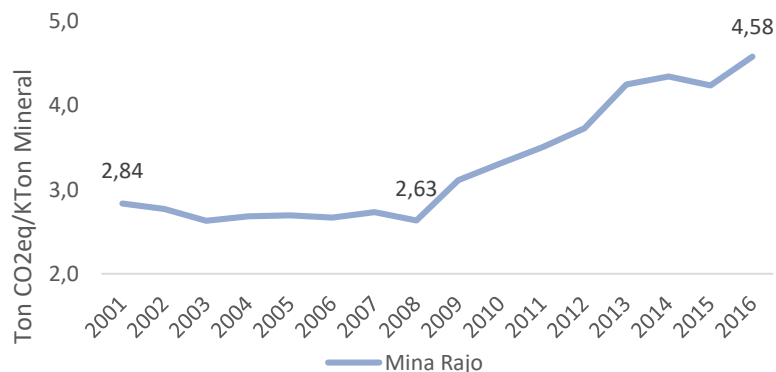


Fuente: Cochilco

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

En la Figura 8 se presenta la evolución del proceso con mayor emisión de GEI directos, el de mina rajo. A nivel unitario este proceso en el año 2016 alcanza las 4,60 toneladas de CO₂ equivalente por cada mil toneladas de mineral extraído. Este indicador omite las implicancias de una menor ley de mineral, por lo que el incremento se asocia al aumento del consumo de combustibles producto de las mayores distancias de acarreo y profundidad relativa de extracción.

Figura 8 Emisiones de GEI por Ton. de mineral extraído en mina rajo, 2001 - 2016

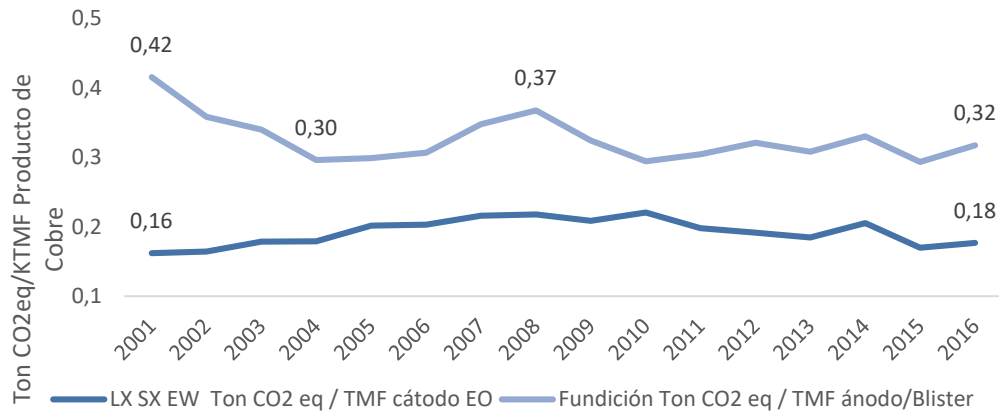


Fuente: Cochilco

Los procesos que siguen en relevancia de emisiones de GEI directos son los de Fundición y LX-SX-EW, los cuales se mantienen estables, en línea con los volúmenes de tratamiento de mineral en cada proceso.

En relación a las Fundiciones, el coeficiente unitario de emisiones directas de GEI por kilo tonelada de cobre fino contenido en Blíster/Ánodos alcanza las 0,32 toneladas de CO₂ equivalente en el año 2016, indicador similar al promedio sostenido de los últimos 16 años de 0,33. A su vez, el proceso de LX-SX-EW, presenta un coeficiente de 0,18 toneladas de CO₂ equivalente por cada tonelada de cátodo electro obtenido.

Figura 9 Emisiones de GEI por cobre fino contenido en Fundición y Lixiviación, 2001 -2016



Fuente: Cochilco



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

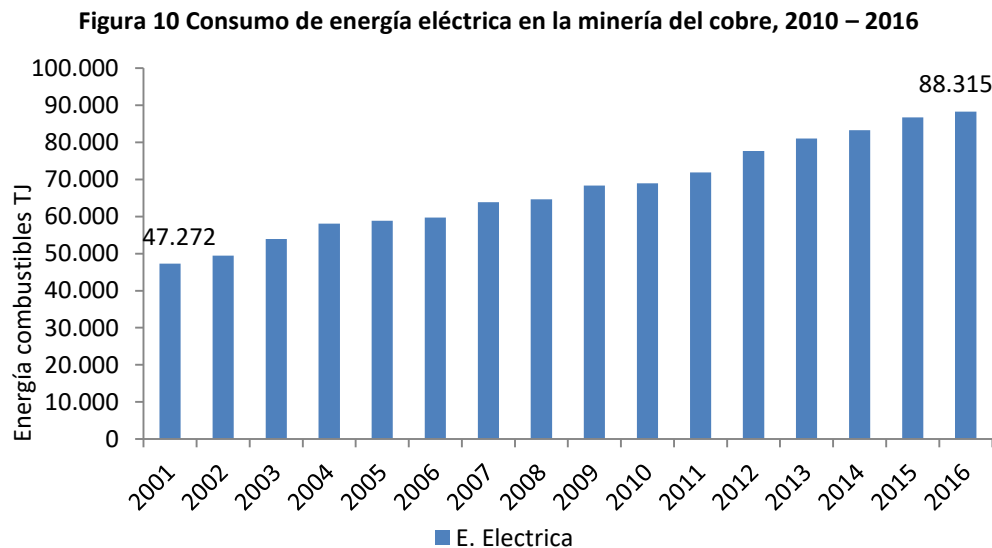
En esta sección, se muestran los principales resultados del consumo de energía eléctrica en Terajoules de la minería del cobre en Chile y su respectiva emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) Indirectos en toneladas de CO₂ equivalente.

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 2000 – 2016. 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 regional y por red de suministro eléctrico.

4.1. 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 resultado del consumo total de electricidad y de la composición de la matriz de generación eléctrica a la cual está conectado, la cual se compone de fuentes altas en emisiones como las termoeléctricas a carbón o diésel, así como también de energías renovables no convencionales con nula o bajos niveles de expulsión de GEI.

En la Figura 10 se presenta el consumo de energía eléctrica para la minería del cobre en Chile entre los años 2001 – 2016. En ella es visible el incremento sostenido que promedió en el periodo un 4,3% anual. Sin embargo, en el año 2016, se registró un aumento de 1,8% respecto del año anterior, alcanzando los 88.315 Terajoules.



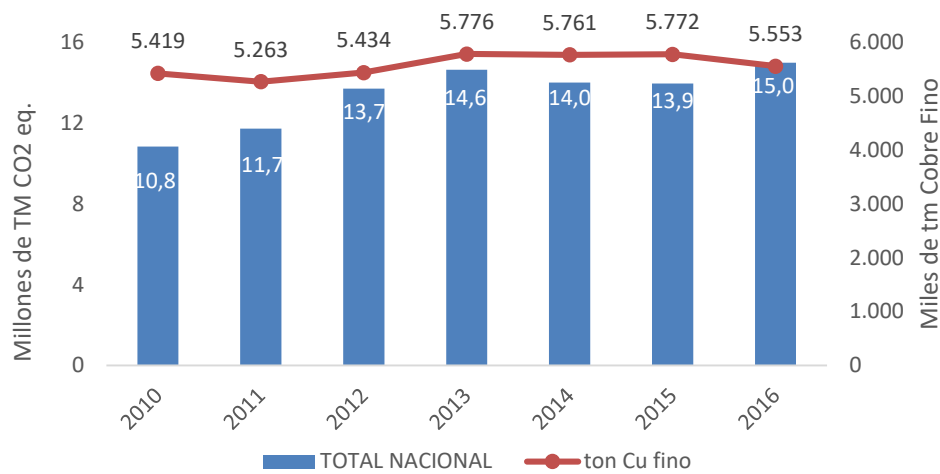
Fuente: Elaborado por Cochilco

En términos de emisiones indirectas de GEI, la minería del cobre en Chile emitió durante el año 2016 un total de 15,0 millones de toneladas de CO₂ equivalente, corresponde a un aumento del 7,4% respecto del año 2015.



El incremento de las emisiones indirectas de GEI no va de la mano necesariamente por un mayor nivel de producción de cobre fino, por el contrario, en 2016 se registraron 1,1 millones de toneladas de CO₂ indirectos equivalentes adicionales, mientras que la producción disminuyó en más de 200 mil toneladas de cobre fino. Una de las causas del aumento en la emisión de GEI indirectos, se debe a progresivo aumento del consumo eléctrico del sector servicios en los últimos años, que si bien al año 2016 representa un 7,9% de total de energía requerida, sigue un ritmo de crecimiento superior a los otros procesos, debido principalmente consumo eléctrico en sistemas de impulsión y desalación de agua de mar. Así también inciden en el aumento de emisiones indirectas de GEI el consistente aumento de la producción de concentrados de cobre.

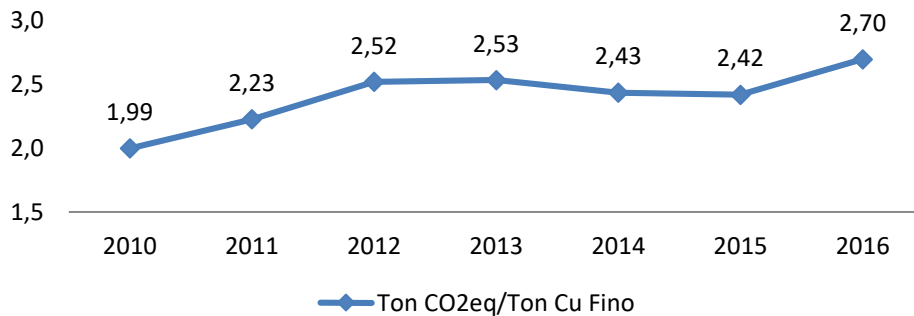
Figura 11 Emisiones indirectas de GEI totales y producción de la minería del cobre en Chile



Fuente: Cochilco

Un indicador global de las emisiones de GEI de la minería del cobre a nivel nacional es el coeficiente unitario de emisiones indirectas de GEI en toneladas de CO₂ equivalente por unidad de tonelada de cobre fino producido. Este indicador alcanza un valor de 2,7 toneladas de CO₂ eq. por tonelada de cobre fino el año 2016, un 11,5% más que lo registrado en 2015.

Figura 12 Coeficiente unitario global de emisiones indirectas de GEI de la minería del cobre en Chile



Fuente: Cochilco

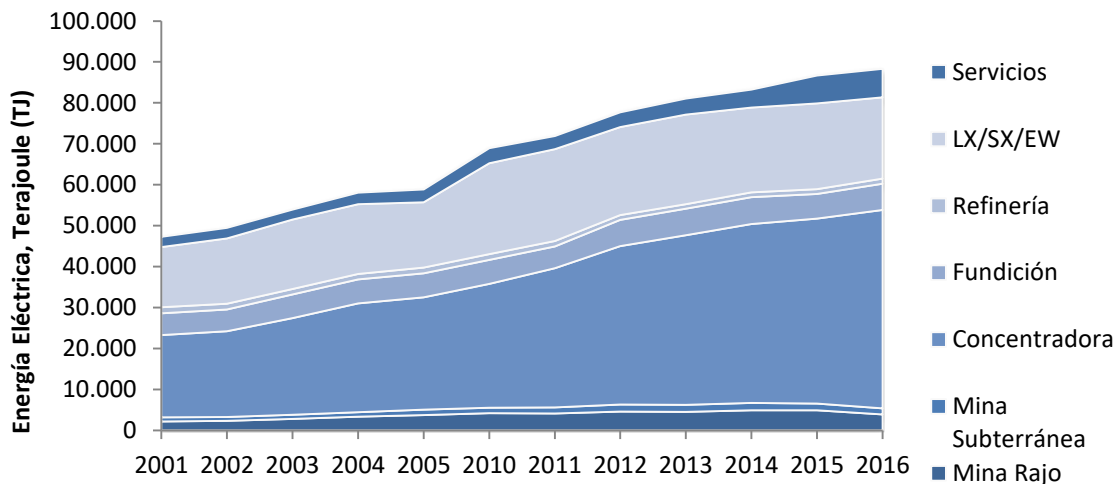


Los motivos de esta alza son variados, en primer lugar, el uso de energía eléctrica en la industria minera está ganando terreno a medida que mejoran las tecnologías de generación y bajan los precios, esto ha motivado el reemplazo de ésta por sobre otra fuente de energía. En segundo lugar, la industria minería sigue incorporando agua de mar a su cadena productiva, esto implica usos intensivos de energía eléctrica para desalar en los casos que amerite e impulsar de costa a faena. Finalmente, la mayor venta de concentrado de cobre como producto final requiere de un importante uso de energía eléctrica en su procesamiento.

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

En la Figura 13 se presenta la evolución del consumo eléctrico por proceso en la minería del cobre, en el cual el proceso de concentración ha sido el más demandante y el con mayor crecimiento de la demanda en los últimos 16 años. En el año 2016, el proceso requirió de 48.416 TJ de energía eléctrica para operar, un 7,2% más, lo que está relacionado al incremento en la electricidad usada en el chancado y molienda dada la mayor dureza de la roca, mayor volumen de mineral procesado en plantas concentradoras y el incremento sostenido de la producción de concentrados.

Figura 13 Consumo de electricidad por proceso minero, 2010 – 2015



Fuente: Elaborado por Cochilco

A diferencia del proceso de concentración, el consumo de energía en el proceso de lixiviación se ha mantenido constante durante el último quindenio, en línea con las reducidas variaciones del mineral oxidado disponibles para tratamiento. Por esta razón, durante el año 2016 se contabilizaron 12.327 TJ de energía, aproximadamente 600 TJ más que 2015.

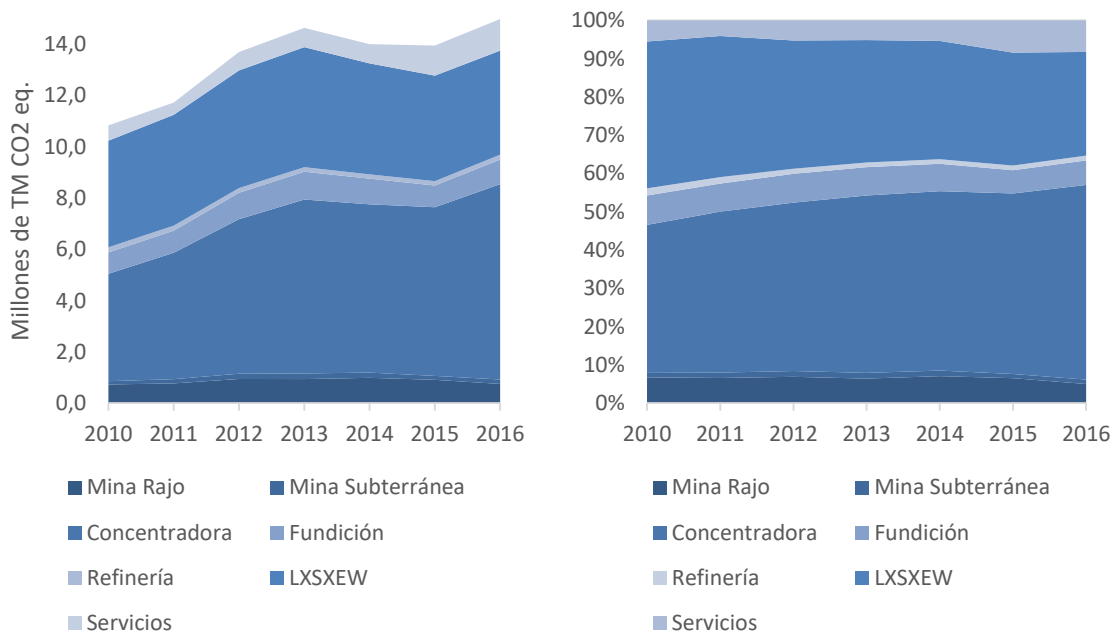
Por otro lado, el progresivo aumento del consumo eléctrico del sector servicios en los últimos años, que si bien hoy representa un 7,9% de total, sigue un ritmo de crecimiento superior a los otros procesos, debido en gran medida a la demanda eléctrica de sistemas de impulsión y desalación de agua de mar, el cual crece a tasa del 20% anual desde 2013.



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 son presentados en la Figura 14.

La concentración de mineral al año 2016 registro un total de 7,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que corresponde a un aumento del 15,8% respecto del año 2015. En términos de participación, el proceso representa el 50,8% de las emisiones GEI indirectas de la minería del cobre. Por otro lado, el proceso de Lixiviación ha disminuido levemente en el último año en 2,4% producto del menor consumo de electricidad proveniente del Sistema Interconectado del Norte Grande, el cual dispone de un factor de emisión más alto dada la composición de su matriz.

Figura 14 Emisiones y Participación de GEI indirectas por procesos, 2010 – 2016



Fuente: Cochilco, 2017

En cuanto al ítem Servicios, durante el 2016 ha aumentado el nivel de emisiones en un 5,1% respecto de 2015, con lo que alcanzó un total de 1,23 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 8,2% de las emisiones GEI totales del país. En este punto es necesario mencionar que este ítem 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. Pues el aumento de producción de concentrados de cobre y la escasez hídrica en el norte chileno ha motivado el uso de agua de mar como solución viable para dar sustentabilidad al negocio minero.

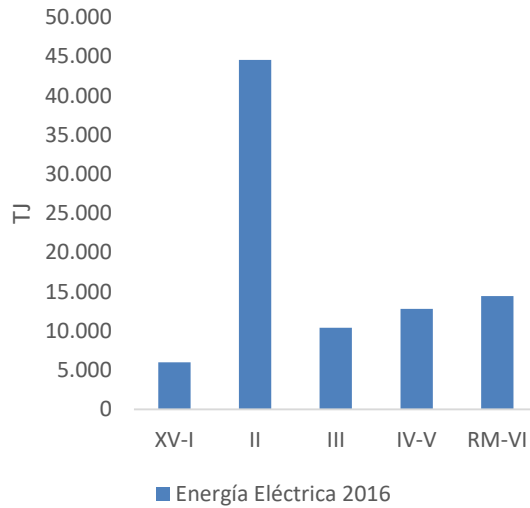
4.3. Emisión por región de GEI Indirectos en la minería del cobre en Chile

En la Figura 15 se presenta el consumo total de energía eléctrica de la minería del cobre por región, donde la región de Antofagasta concentra el 50,5% del total consumido a nivel nacional, con 44.585



TJ. Luego, las faenas ubicadas entre la región Metropolitana y la del Libertador General Bernardo O'Higgins registran un consumo total de 14.437 TJ, representando un 16,7%. Sin embargo, el mayor crecimiento regional en el consumo de electricidad se registró en la tercera región de Atacama, con un incremento del 22,1%.

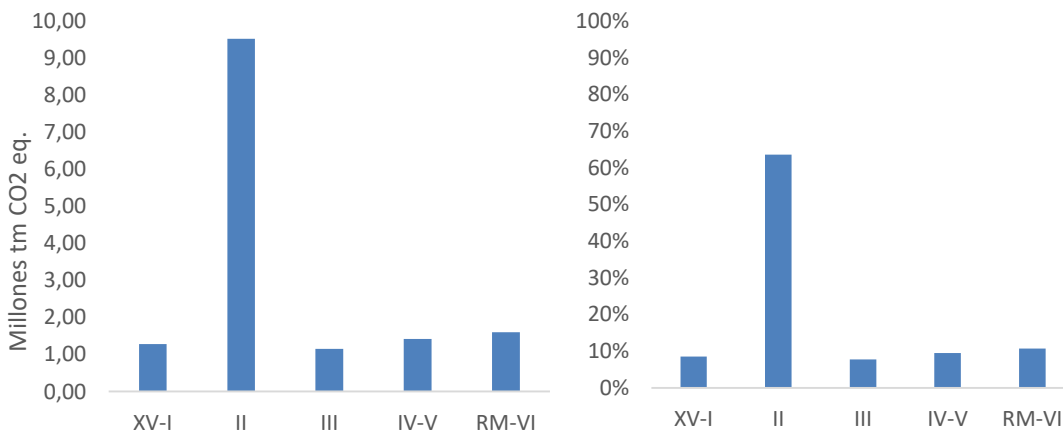
Figura 15 Consumo de electricidad en la minería del cobre por región, 2015



Fuente: Elaborado por Cochilco

El consumo eléctrico regional presentado se traduce en que la región de Antofagasta registra emisiones de GEI indirectos en 2016 por un total de 9,52 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa un 63,6% del total de emisiones de GEI de la minería del cobre. En tanto las regiones Metropolitana y del Libertador General Bernardo O'Higgins emitieron en conjunto 1,6 millones de toneladas de CO₂ equivalente, distanciándose de las regiones XV-I y IV-V que se mantienen en torno a las 1,35 millones de toneladas de CO₂ equivalente.

Figura 16 Emisiones Indirectas de GEI y su participación por región, 2010 – 2016



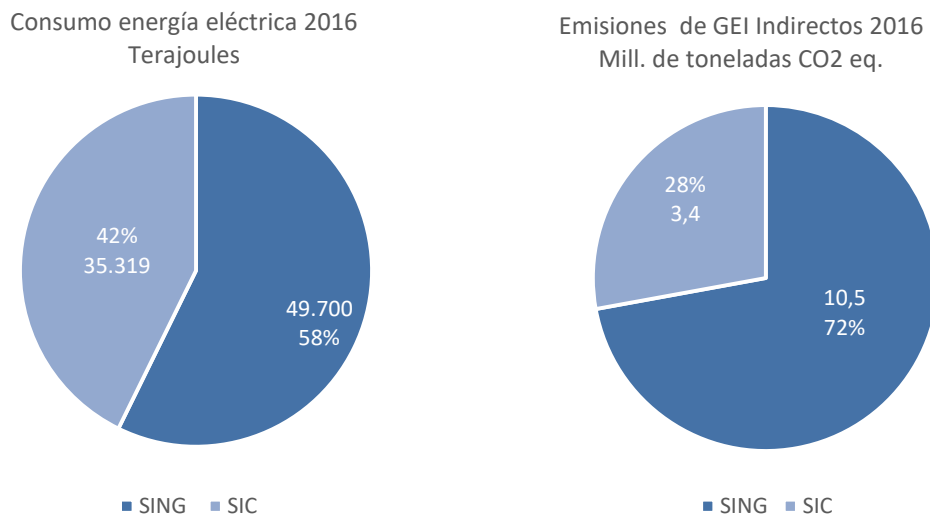
Fuente: Cochilco



4.4. Emisiones en los Sistemas SING y SIC de GEI Indirectos de la minería del cobre

En el año 2016 el consumo de electricidad de la minería del cobre en el Sistema Interconectado del Norte Grande fue de 50.578 TJ, un 1,8% más que 2015, representando un 58% del consumo total de energía eléctrica consumido por la minería del cobre, mientras que en el Sistema Interconectado Central fue de 37.694 TJ. Lo anterior, conduce a un total de emisiones de 15 millones de toneladas de CO2 equivalente entre ambos sistemas, de los cuales el 72% corresponde a los emitidos en faenas conectadas al Sistema Interconectado del Norte Grande, mientras que el 28% restante, equivalente a 3,4 millones de toneladas de CO2 equivalente fueron emitidos por operaciones conectadas al SIC.

Figura 17 Consumo de Energía eléctrica y emisiones de GEI indirectos en Sistemas SING-SIC, 2016



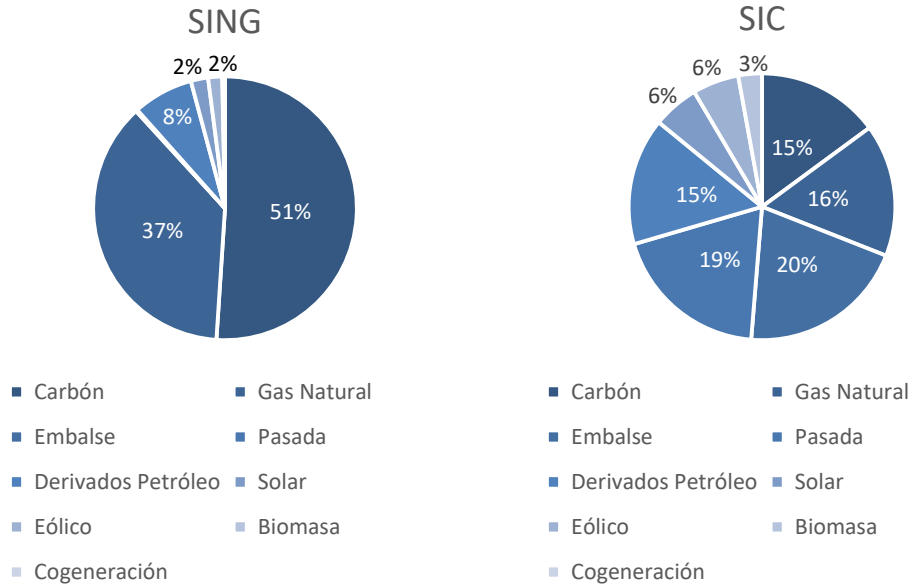
Fuente: Cochilco, 2017

La mayor cantidad de emisiones de GEI indirectas que se registran en el conjunto de faenas conectadas al SING se debe a que este sistema concentra la mayor producción de operaciones mineras con 26, las cuales representan el 60,5% del cobre fino producido. Además, el factor de emisión utilizado para convertir la cantidad de MWh consumidos a unidades de CO2 equivalente es considerablemente mayor al del SIC, dada la matriz utilizada en el primero. En la Figura 18 se presenta la matriz de generación de ambos sistemas proveedores de electricidad a la industria minera.

Para el año 2016 el Ministerio de Energía de Chile cifro en 0,7668 las toneladas de CO2 equivalente emitidas por cada MWh generado en el SING. Este indicador refleja la alta carbonización de su matriz (51%) y la escasa presencia de las ERNC, las cuales representan poco más del 4%. En cambio, el factor de emisión del SIC es de 0,3971 tCO2eq/MWh, dada la presencia de energía de fuentes hidráulicas como las centrales de pasada y embalses, además de la mayor presencia de ERNC, fundamentalmente, solar.



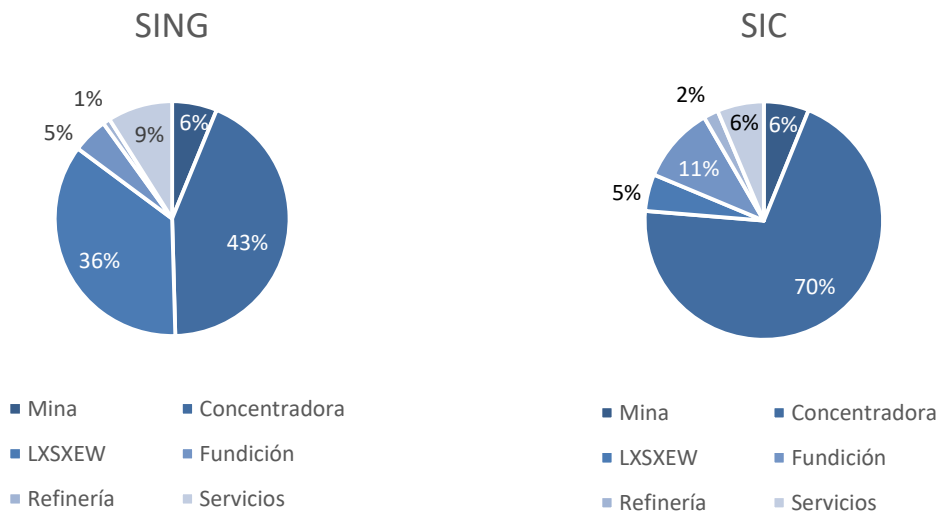
Figura 18 Potencia instalada del SING y SIC, 2016.



Fuente: Generadoras de Chile A.G.

Al analizar el nivel de emisiones en cada sistema interconectado, se observa que en el SING, los procesos con mayor emisión son la concentración, lixiviación y servicios, con 7,6, 4,0 y 0,3 millones de toneladas de CO2 equivalente respectivamente, mientras que las emisiones de GEI indirectos de operaciones conectadas al SIC se focalizan en plantas concentradoras que en año 2016 abarco el 70,2% del total de emisiones del sistema.

Figura 19 Emisiones de GEI indirectos por proceso en Sistemas SING-SIC, 2016



Fuente: Cochilco, 2017



5. Comentarios Finales

- El nivel de emisiones de gases de efecto invernadero directas ha aumentado sostenidamente desde 2001, alcanzando las 5,87 millones de toneladas de CO₂ equivalente, cifra superior en 1,1% a las emisiones directas registradas en 2015, esto a pesar de que la producción de cobre fino se redujo en 3,7%, consecuencia de las mayores distancias de acarreo en la extracción de mineral desde la mina rajo y a la menor ley de mineral promedio del periodo.
- En línea con lo anterior, en la mina rajo se cuantifica la mayor emisión de GEI directos, producto del uso intensivo de diésel por parte de los camiones transportadores. En este proceso se utiliza cerca del 87% de todo el diésel utilizado por la minería del cobre en Chile, sin embargo, existen programas de innovación tecnológica que permitirían el reemplazo parcial del combustible por otros más económicos y menos contaminantes como el hidrogeno, lo que contribuiría a la reducción sostenida de emisiones de GEI directos.
- El incremento de las emisiones indirectas de GEI no va de la mano necesariamente por un mayor nivel de producción de cobre fino, por el contrario, en 2016 se registraron 1.1 millones de toneladas de CO₂ indirectos equivalentes adicionales, mientras que la producción disminuyó en más de 200 mil toneladas de cobre fino. Una de las causas del aumento en la emisión de GEI indirectos, se debe a progresivo aumento del consumo eléctrico del sector servicios en los últimos años.
- La tendencia del mercado hacia la producción de cobre en concentrado, implica necesariamente una mayor cantidad de emisiones de GEI indirectas, pues además de ser la planta concentradora un proceso intensivo en el uso de energía eléctrica, también lo es en agua, la cual proviene de un 15,2% del mar, proyectándose un ritmo de crecimiento que implica un incremento en la demanda de electricidad necesaria para desalación e impulsión a la faena.
- Para el último trimestre del año 2017 se proyecta el termino de las obras que permiten la interconexión de los Sistemas Interconectados del Norte Grande y Central, lo cual tendría influencia en la determinación de los coeficientes de emisión utilizados hasta la fecha para el cálculo de emisiones indirectas de GEI. Por lo tanto, será necesario una actualización en la metodología utilizada en la forma en que el Ministerio de Energía determine modificaciones a los coeficientes.



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

Javier Hernández Meza

Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Agosto/ 2017

