



Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2019

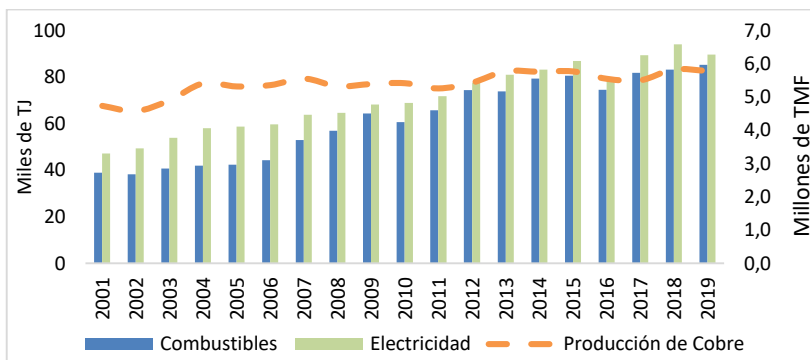
DEPP 16/2020

Resumen Ejecutivo

El presente estudio se basa en los resultados de la Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE), aplicada anualmente por Cochilco a las operaciones mineras de cobre del país. Considerando un total de 56 operaciones mineras, entre las que se encuentran gran y mediana minería, fundiciones y refineras, en el año 2019 llegó al 98% de la producción de cobre nacional, específicamente 94,8% de la producción de cátodos electro obtenidos y 99,2% de la producción de concentrados

Lo anterior corresponde a un porcentaje notablemente alto de cobertura, demostrando el esfuerzo minero en responder este año debido a circunstancias derivadas del Covid 19, evidenciando aún más el compromiso consolidado de la gran minería y a la profundización de los vínculos con la mediana minería del cobre

Consumo energético y producción cuprífera, 2001-2019



Fuente: Cochilco

Al 2019 la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 175.134 TJ, lo que representa alrededor del 14% del consumo agregado del país. De este total, 89.769 TJ son de la energía eléctrica y 85.365 TJ por consumo de combustibles. La Figura ilustra el consumo energético de electricidad (51,3% del total) y combustibles (48,7%) y la producción de cobre fino desde el 2001 al 2019.

Si bien a nivel general los consumos de electricidad y combustibles son relativamente similares, a nivel de procesos varían significativamente. Los tres más intensos en demanda energética son la mina rajo con 72.878 TJ que representa el 42% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 49.552 TJ (28%) y el proceso de Lixiviación con 22.390 TJ (13%). Para el caso del consumo de combustibles, la mina rajo se lleva el 80% del total, seguido por fundiciones con un 7%. Para el consumo eléctrico en cambio, el proceso de concentradora es la fuerza dominante con un 53%, seguido de la electro-obtención con un 21%.

A nivel regional, Antofagasta es por lejos la región con mayor consumo energético tanto en combustibles (50 mil TJ, equivalente al 58,9% del total durante 2019) como en electricidad (49 mil TJ, equivalente al 54,6% del total). La región de Atacama por su parte cuenta con una participación del 11,2% del consumo energético total, las regiones de Coquimbo y Valparaíso en conjunto con el 12,4%, las regiones de O'Higgins y Metropolitana con el 10,5% y la región de Arica y Parinacota con un 9,1%.

En relación al consumo por tamaño, la gran minería privada del cobre fue responsable de alrededor dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2019, mientras que la gran minería estatal, representada por Codelco, representa el 27% de combustibles y electricidad respectivamente. La mediana minería privada por su parte es responsable del 3% de combustibles y electricidad respectivamente, en tanto la mediana minería estatal es responsable del 1% de combustibles y electricidad respectivamente.

Por último, en relación a los gastos por energía, vemos que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con USD 2.339 millones frente a los USD 1.031 millones del costo asociado al consumo de combustible durante 2019, es decir, prácticamente 2 veces más. En suma, se estima que el consumo energético representa

entre un 14% (electricidad 9% y combustibles 5%) de los costos de la minería del cobre en Chile. Los resultados de este trabajo evidencian que la minería del cobre continua enfrentando requerimientos energéticos crecientes, por temas estructurales como el envejecimiento de las minas, el endurecimiento de la roca, la caída de las leyes de cobre, como por temas productivos y la tendencia hacia la producción de concentrados y la mayor necesidad de agua lo que implica la construcción de plantas desalinizadoras y la impulsión de agua de mar (desalinizada o directa).



Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo	I
1. Introducción	4
2. Metodología	4
2.1. Información general y encuesta	4
2.2. Análisis de los datos.....	6
2.2.1. Combustibles:	7
2.2.2. Energía Eléctrica:.....	8
3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional.....	9
3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre	9
3.2. Consumos por procesos productivos.....	10
3.3. Participación del consumo de la energía de la minería del cobre en el consumo nacional de energía 12	
3.4. Consumos de Energía por Región	12
3.5. Consumos por tamaño de minería	13
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre	14
4. Consumo de combustibles	16
4.1 Consumo agregado	16
4.2 Consumo por procesos	17
4.3 Consumos unitarios	18
5. Consumo eléctrico.....	20
5.1. Consumo agregado	20
5.2. Consumo por procesos	20
5.3. Consumos unitarios	22
6. Gasto energético	25
7. Comentarios finales.....	27
8. Anexo: Operaciones consideradas	29



1. Introducción

Para el período que cubre el estudio, tanto los datos anuales de producción como los de uso de combustibles y electricidad la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) los ha obtenido de las respectivas faenas mineras de cobre del país a través de una encuesta segmentada y específica, hoy llamada Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAE) que considera las áreas, etapas y procesos característicos para la producción de concentrados, cátodos, fundición y refinería. A través de este insumo, Cochilco calcula el consumo agregado e unitario de combustibles y energía eléctrica así como su evolución en el tiempo, desagregando además por tipo de procesos y zona geográfica, entre otros elementos. Esta información se publica en las *Estadísticas de consumo de energía del cobre*, disponibles en la página web <http://www.cochilco.cl/estadisticas/energia.asp>, y también se presenta a través del presente informe, cuyo objetivo consiste en analizar el consumo global de combustibles y electricidad incurridos por la minería del cobre, así como también revisar la evolución de sus consumos unitarios.

Para atender a estos objetivos, el informe en su sección 2 presenta la metodología usada, exponiendo el alcance de la encuesta y el tratamiento de los datos. Luego, en la sección 3, se muestran los datos agregados de consumo de energía a nivel nacional de la minería del cobre a nivel global y unitario. Así mismo, en la sección 4, se presentará un análisis de consumo de energía en base a combustibles por proceso y a nivel unitario, para luego en el capítulo siguiente, revisar de forma similar el comportamiento del consumo eléctrico. En la sección 6 se presentan estimaciones de los costos energéticos incurridos y finalmente en la sección 7 se entregan comentarios finales del informe.

2. Metodología

La metodología se puede sintetizar en tres partes:

- a) A través de la EMPAE, se consultan los niveles de producción, consumo de energía y agua por proceso minero.
- b) Se revisa la información recibida y se solicitan ajustes a las empresas en caso de existir discrepancias con otras fuentes de información o valores atípicos respecto de la información histórica.
- c) En base a la información suministrada por las operaciones mineras se calculan los consumos globales y unitarios de energía de electricidad y combustibles por procesos a nivel nacional. Los consumos totales se presentan en terajoules (TJ) y los consumos unitarios en megajoules por tonelada métrica (MJ/TM).

2.1. Información general y encuesta

Se identifican dos líneas de producción de cobre de acuerdo al mineral procesado. Primero, el procesamiento de minerales sulfurados, los cuales siguen una línea de producción de flotación y concentración. Por otro lado, los minerales oxidados, y sulfuros de baja ley, que siguen una línea de lixiviación o de hidrometalurgia para la obtención de cobre. Los principales procesos productivos de



los minerales sulfurados son los de extracción mina, concentración, fundición y refinería. Por otro lado, las principales procesos involucrados en la extracción de cobre desde minerales oxidados son: extracción mina, lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención. En la Figura 1, se muestran en cada una de las casillas el producto, y sus respectivas unidades, de cada uno de los procesos.

Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre

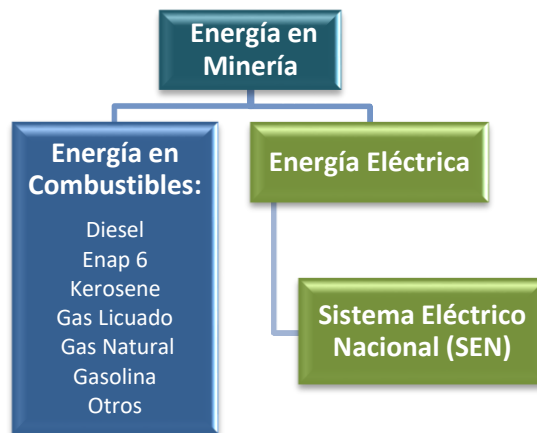


* Pregnant Leach Solution (PLS)

Fuente: Cochilco.

Aunque no se ilustra en la Figura 1, se reconoce el proceso de Servicios, que como se indica en la terminología, corresponde a la suma de aquellas actividades que no se encuentran incluidas dentro de los procesos de la cadena de valor principal, pero que son necesarias para llevar a cabo la producción minera, tales como el consumo asociado a campamentos y talleres e impulsión y desalación de agua, entre otros. Las principales fuentes de abastecimiento energético de la minería son los combustibles y la electricidad. Cabe señalar, que el suministro de electricidad proviene ya 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) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). En el presente informe se reconoce la energía utilizada en combustibles a través del uso de: Carbón, Gasolina, Diesel, Enap 6, Kerosene, Gas Licuado, Gas Natural, Leña, Butano y Escaid 110.

Figura 2: Tipo de energía utilizada en minería del cobre



Fuente: Cochilco.

La información para determinar los consumos de energía se efectúan a través de EMPAE, encuesta que recoge información de producción de los principales procesos productivos, identificando los insumos minerales, así como también sus productos y sus principales características. Por ejemplo, en el caso de extracción mina, se reportan las cantidades de mineral y lastre extraído y sus respectivas leyes minerales; así también, en el caso de la concentración de mineral se consulta el mineral procesado y la cantidad de concentrado producido y sus respectivas leyes. Los diferentes procesos productivos se asocian a preguntas referentes a las cantidades de energía eléctrica consumida, cantidades de combustibles (en unidades físicas, por ejemplo m³ de diésel) y el agua total consumida y reciclada por procesos.

El año 2019 respondieron la encuesta un total de 48 operaciones mineras, entre las que se encuentran minas, fundiciones y refinerías, las que representan 98% de la producción de cobre nacional de 2019, específicamente 94,8% de la producción de cátodos electro obtenidos y 99,2% de la producción de concentrados (véase el anexo para el listado completo de las operaciones). Lo anterior corresponde a un porcentaje notablemente alto de cobertura alcanzado desde la creación de la EMPAE, además se agradece el esfuerzo minero en responder este año debido a circunstancias derivadas del covid 19. Ello evidencia el compromiso consolidado de la gran minería y a la profundización de los vínculos con la mediana minería del cobre.

Las tablas con información detallada que son base para los cálculos, gráficos y análisis para este informe se encuentran disponibles en la página web de Cochilco (<http://www.cochilco.cl>) en la sección Estadísticas, Energía y GEI.

2.2. Análisis de los datos

En el caso de los combustibles, primero se deben transformar las unidades físicas consumidas reportadas en la encuesta a unidades energéticas; en este caso, megajoule. Cada combustible reportado en las encuestas sobre el su consumo en las faenas mineras es transformado a unidades equivalentes energéticas considerando el estado del arte de la tecnología dentro de la industria minera y factor energético de los combustibles. Las conversiones se ilustran en la Tabla 1.

Tabla 1 Coeficientes de conversión de unidades físicas de combustibles a energía

Combustible	Unidad	Cantidad	Energía Útil en Megajoule (MJ)
Carbón	Kg	1	29
Gasolina	M3	1	34.208
Diesel	M3	1	38.309
Enap 6	t	1	43.932
Kerosene	M3	1	37.618
Gas Licuado	Kg	1	51
Gas Natural	M3	1	39
Leña	Kg	1	15
Butano	Lts	1	29
Nafta	M3	1	34
Propano	M3	1	26
Escaid 110	t	1	36.028

Fuente: Cochilco



A continuación se presentan los principales indicadores usados para el caso de consumos de energía a través de combustibles y de electricidad.

2.2.1. Combustibles:

La energía de combustibles a nivel nacional corresponde al total del consumo de las diferentes faenas consideradas en este informe, como se muestran en (3.1).

$$\text{Energía Combustibles} = \sum_i \text{Energía Combustibles consumida}_i \text{ (Petajoules)} \quad (3.1)$$

Donde i corresponde a la faena minera.

El consumo unitario de combustible medido como la energía usada en el procesamiento de una tonelada de cobre fino contenido por procesos por faena se calcula como: el consumo de combustibles transformado a unidades energéticas dividido por el cobre fino contenido en el producto de dicho proceso, como se muestra en (3.2). Para los cálculos de los consumos unitarios de combustible por tonelada de cobre fino a nivel nacional por proceso, se considera que los consumos unitarios por faena sean ponderados de acuerdo a su aporte de cobre fino al total nacional según el proceso en cuestión como se muestra en (3.3).

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino}_{ij} = \frac{\text{Energía Combustible consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Cobre fino contenido en producto, proceso}_{ij} \text{ (TMF)}} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.2)$$

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Comb. x Cu Fino}_{ij} \times \frac{\text{Cu Fino en Producto}_{ij}}{\text{Cu Fino en Producto}_j} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.3)$$

Donde i corresponde a faena minera, mientras que j corresponde a los diferentes procesos productivos.

Para el caso de los consumos unitarios de energía en combustibles según el material procesado se efectúa primero el cálculo del consumo unitario por faena, tomando la energía en combustibles utilizada en los procesos dividido por el material total procesado, como se muestra en (3.4). Para efectuar el cálculo del consumo unitario de combustibles por material procesado a nivel nacional, los valores unitarios son ponderados de acuerdo a la participación del material procesado por faena sobre el total nacional procesado en un proceso específico como se muestra en (3.5).

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Material}_{ij} = \frac{\text{Energía Combustible consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Material procesado, proceso}_{ij} \text{ (Ton.métricas de material)}} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.4)$$

$$\text{Cons. Unit. de Comb. x Material} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Comb. x Material}_{ij} \times \frac{\text{Material procesado}_{ij}}{\text{Material procesado}_j} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.5)$$

Donde i corresponde a faena minera, mientras que j corresponde a los diferentes procesos productivos.



2.2.2. Energía Eléctrica:

La metodología utilizada para efectuar el cálculo de los indicadores de consumo de electricidad a nivel global y unitario se presentan en (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) y (3.10), siguiendo la misma nomenclatura presentada anteriormente.

$$\text{Energía Electricidad} = \sum_i \text{Energía Eléctrica consumida}_i \text{ (Petajoules)} \quad (3.6)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino}_{ij} = \frac{\text{Energía Eléctrica consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Cobre fino contenido}_{ij} \text{ (TMF)}} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.7)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Elec. x Cu Fino}_{ij} \times \frac{\text{Cu Fino en Producto}_{ij}}{\text{Cu Fino en Producto}_j} \text{ (MJ/TMF)} \quad (3.8)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Material}_{ij} = \frac{\text{Energía Electricidad consumida}_{ij} \text{ (MJ)}}{\text{Material procesado, proceso}_{ij} \text{ (Ton.métricas de material)}} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.9)$$

$$\text{Cons. Unit. de Elec. x Material} = \sum_{ij} \text{Cons. Unit. de Elec. x Material}_{ij} \times \frac{\text{Material procesado}_{ij}}{\text{Material procesado}_j} \text{ (MJ/TM)} \quad (3.10)$$



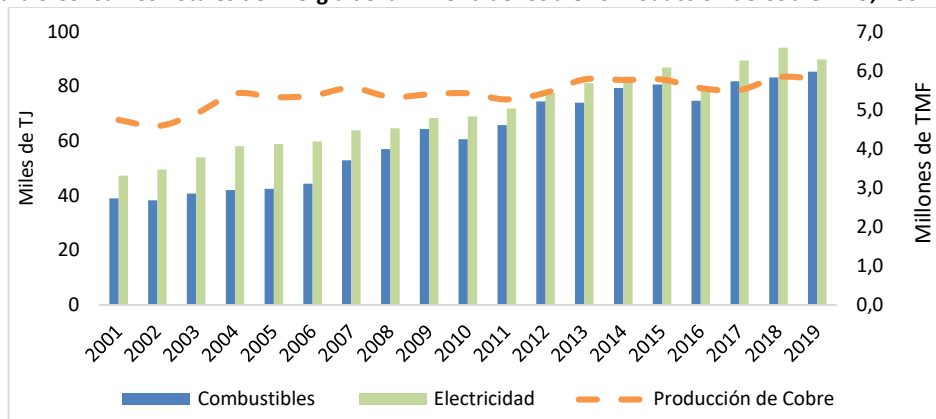
3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional

En el presente capítulo se indican los resultados de los consumos energéticos estimados para la minería del cobre en Chile.

3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre

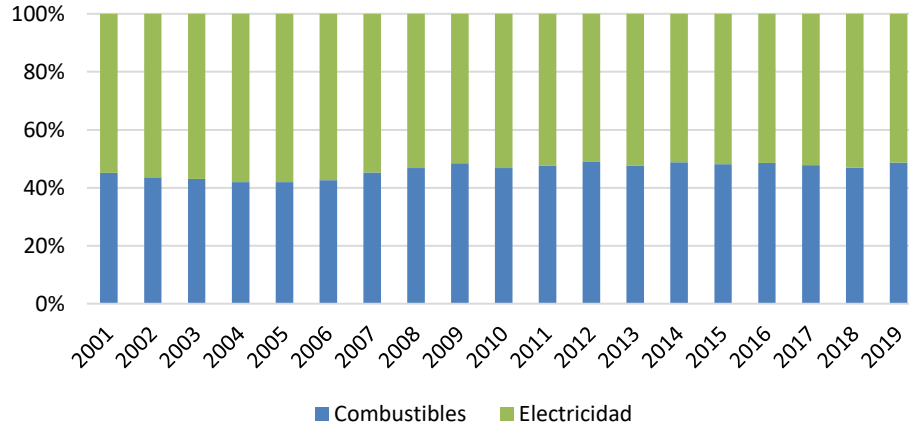
Si bien la producción de cobre y el consumo energético son variables históricamente correlacionadas positivamente, en los últimos años se hace visible el desacople entre las mismas. Entre el 2001-2019 la producción nacional de cobre mina se presenta más bien estable, creciendo a una tasa promedio anual del 1,2%, llegando en el año 2019 a 5,78 millones de TM, lo que representa un aumento del 22,1% en el período analizado. En tanto el consumo energético de la minería, ha aumentado un 103,1% a una tasa promedio anual del 4,1%, llegando así a 175.134 TJ en el 2019 (Ver Figura 3). Comparando con el 2018, el consumo energético disminuyó un 1,2 %, a su vez, la producción nacional de cobre mina disminuyó en 44 mil toneladas de cobre fino, lo que representa un 0,8% menos al 2019.

Figura 3 Consumos Totales de Energía de la Minería del Cobre vs Producción de Cobre Fino, 2001-2019



Fuente: Cochilco

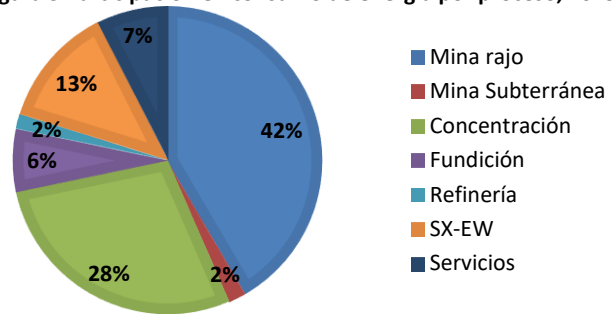
Al desglosar por tipo de energía entre el 2001-2019, como se muestra en Figura 4, el consumo de combustible aumenta en un 119,1% y el de la electricidad en un 89,9%, teniendo a nivel general participaciones similares respecto del consumo energético total de la minería del cobre. La participación promedio en el período analizado para combustibles es del 46,3 % y 53,7 % en electricidad, en tanto para el año 2019 el consumo de combustibles logra una participación del 48,7% y la electricidad un 51,3 %.

Figura 4 Participación según tipo de energía en el consumo total de energía de la minería del cobre, 2001-2019

Fuente: Cochilco.

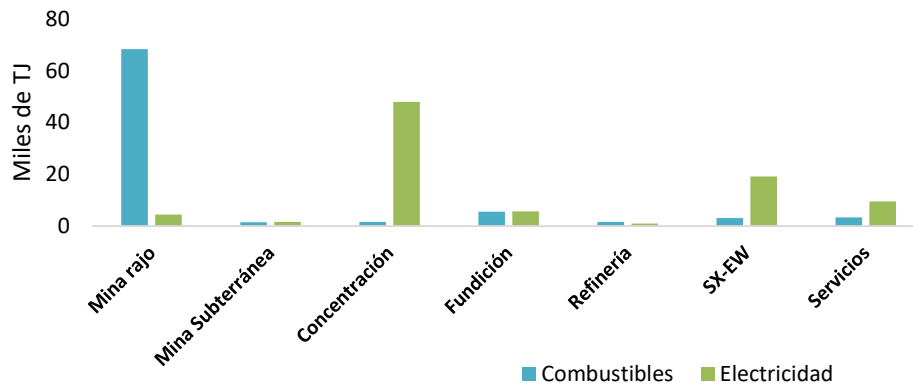
3.2. Consumos por procesos productivos

A nivel de consumo energético por procesos, los tres más intensos son la mina rajo con 72.878 TJ que representa el 42% del consumo energético total, le sigue el proceso de concentración con 49.552 TJ (28%) y el proceso de Lixiviación con 22.390 TJ (13%).

Figura 5 Participación en consumo de energía por proceso, 2019

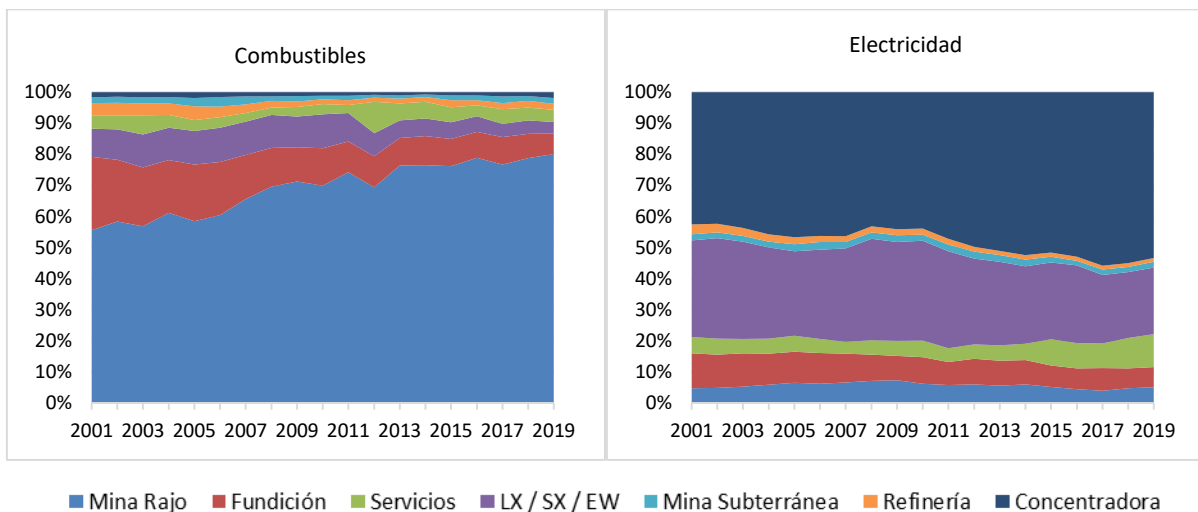
Fuente: Cochilco

Desglosando por tipo de energía utilizada en cada proceso, el consumo de combustibles en la mina rajo se lleva el 80% del total de combustibles usados en minería, en cambio en el proceso de concentración y lixiviación la fuerza dominante es el consumo eléctrico el cual representa un 53% y 21% respectivamente del consumo total eléctrico minero en el 2019. La Figura 6 a continuación resume los consumos por proceso y tipo de energía para el año 2019.

Figura 6 Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre, 2019

Fuente: Cochilco

Analizando la evolución entre el 2001 al 2019, visible en Figura 7 que ilustra la participación en el tiempo de los consumos de combustibles y electricidad por proceso, se advierte que ambos procesos dominantes en consumo, mina rajo en combustibles y concentradora en electricidad, se han vuelto progresivamente más intensivos en su uso, aún en relación a los otros procesos. Así, la participación del consumo de combustibles de mina rajo se incrementó desde un 55,6% del consumo agregado de combustibles en 2001 al 80,1% en 2019. Por el lado de la electricidad, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando del 42,6% del total en 2001 al 53,4% en 2019.

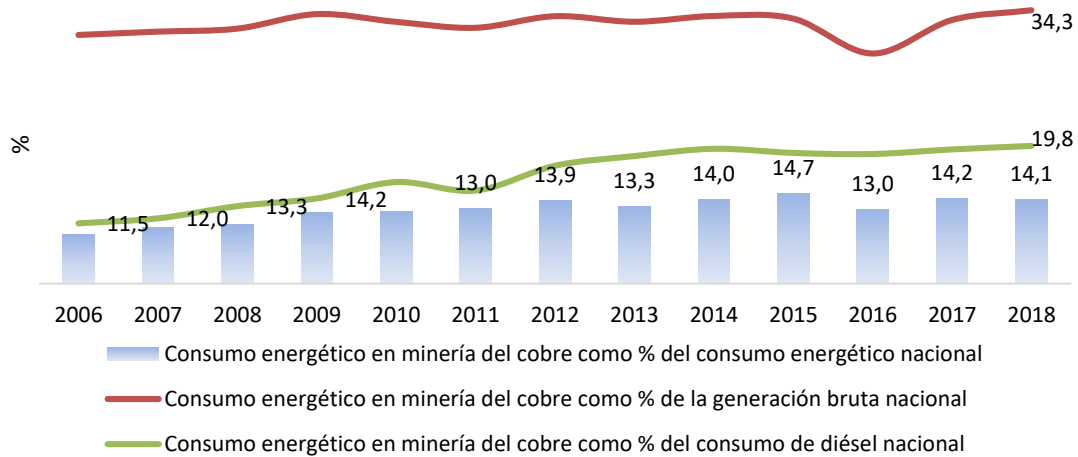
Figura 7 Evolución en la participación (%) por proceso en el consumo de combustibles y electricidad, 2001-2019

Fuente: Cochilco

3.3. Participación del consumo de la energía de la minería del cobre en el consumo nacional de energía

La minería es uno de los principales consumidores de energía del país. En efecto, de acuerdo a los datos nacionales de consumo energético provistos por la Comisión Nacional de Energía, Cochilco estima que el sector minero es responsable directo del 14,1% del consumo energético del país, cifra que en general ha experimentado progresivas alzas marginales desde el 2006 en adelante (Ver Figura 8).

Figura 8 Participación del consumo sectorial de energía en el consumo nacional, 2006-2018



Fuente: Cochilco en base a datos propios y el Anuario Estadístico de Energía 2019 (Comisión Nacional de Energía, 2020)

Desagregando los datos, vemos que en el mismo periodo el consumo de electricidad se ha mantenido relativamente estable en torno al 33% del total nacional mientras que consumo de diésel, el principal combustible minero, ha ido aumentando su participación de un 11,5% en 2006 a un 19,8% del consumo nacional en el año 2018.

3.4. Consumos de Energía por Región

Como se aprecia en la Tabla 2, Antofagasta (II) es por lejos la región con mayor consumo energético tanto en combustibles (50 mil TJ, equivalente al 58,9% del total combustibles durante 2019) como en electricidad (49 mil TJ, equivalente al 54,6% del total electricidad). El mayor consumo energético de Antofagasta viene dado por su alta producción de cobre (52,2% del total) pero también –como se señaló previamente- por las restricciones geográficas que enfrenta, en particular las restricciones de agua continental en el norte del país ha incentivado a muchas operaciones a ocupar agua de mar, cuyo proceso de impulsión y desalación es altamente intensivo en energía eléctrica.

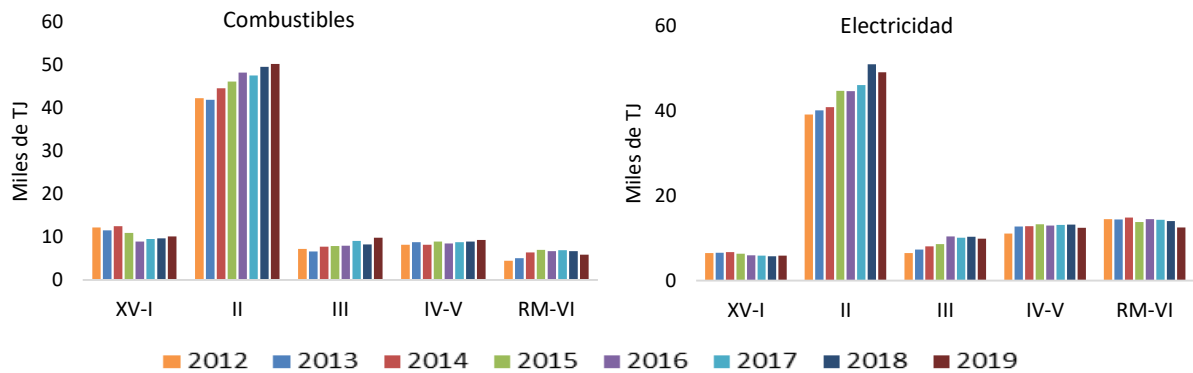
Tabla 2: Participación (%) del consumo de energía y producción de cobre por región, 2019

	XV-I	II	III	IV-V	RM-VI
Consumo electricidad	6,6	54,6	11,0	13,9	14,0
Consumo combustibles	11,8	58,9	11,5	10,9	6,9
Consumo total energía	9,1	56,7	11,2	12,4	10,5
Producción cobre	11,5	52,2	8,0	14,4	13,9

Fuente: Cochilco

En este contexto, el consumo energético total de Antofagasta ha estado en alza durante los últimos años, pasando de 81,4 mil TJ en 2012 a 99,3 mil TJ en 2019 (+22,0%). Atacama (III) también ha experimentado un alza en el mismo periodo, pasando de 13,7 mil TJ a 19,7 mil (+43,2%). Por otra parte, las regiones de Coquimbo y Valparaíso (IV y V) tuvieron un alza de 19,3 mil TJ a 21,8 mil TJ (+13,0%), mientras que las regiones Metropolitana y del Libertador Bernardo O'Higgins (RM y VI) se ha mantenido prácticamente de 18,9 mil TJ a 18,4 mil TJ (-2,8%) en el mismo periodo. Al mismo tiempo, las regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota (I y XV) decrecieron, bajando de 18,7 mil TJ a 16,0 mil TJ (-14,8%).

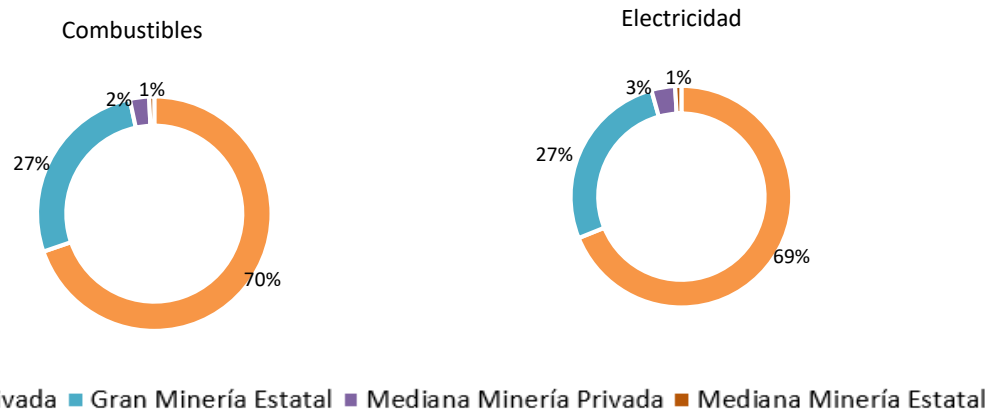
Figura 9 Consumo de energía en la minería del cobre por región, 2012-2019



Fuente: Cochilco.

3.5. Consumos por tamaño de minería

Como se aprecia en la Figura 10, la gran minería privada del cobre fue responsable de alrededor de dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2019. La gran minería estatal por su parte, representada por Codelco, concentró el 27% de combustibles y el 27% de electricidad, respectivamente. La mediana minería privada es responsable del 2% de combustibles y 3% de electricidad. Por último, la mediana minería estatal, representada por las plantas de Enami, consume cerca del 1% en cada fuente energética.

Figura 10 Consumo de energía en la minería del cobre por tamaño, 2019

Fuente: Cochilco.

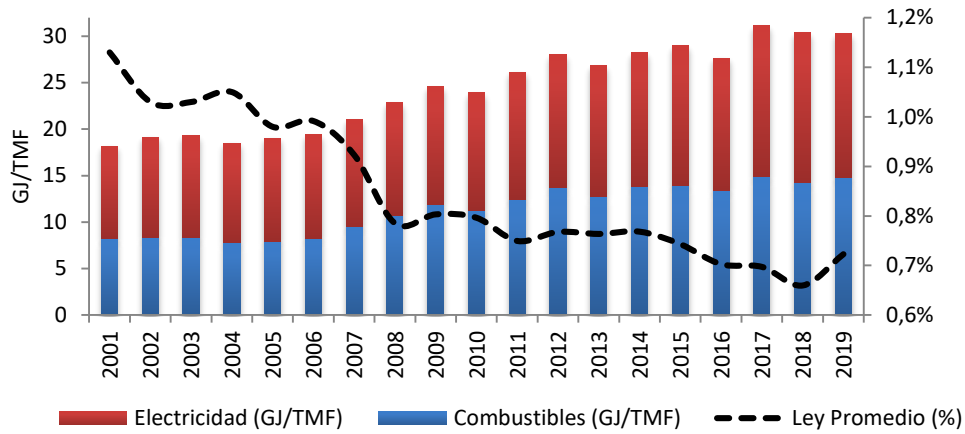
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre

El consumo unitario de energía es una medida útil para cuantificar la energía consumida para producir una unidad de producto (1 tonelada de cobre fino contenido) y permite analizar así la tendencia del consumo de energía en la producción minera. Es así como, para el año 2019 se necesitaron en promedio 30,3 GJ para producir una tonelada de cobre fino, un 66,3% más de lo que se necesitaba en 2001.

El consumo de combustibles es el mayor responsable de este incremento, pasando de 8,2 GJ/TMF en 2001 a 14,8 GJ/TMF en 2019 (+79,4%), mientras que el consumo de electricidad aumentó de 10,0 GJ/TMF a 15,5 GJ/TMF (+55,5%) durante el mismo periodo. El consumo de combustibles para producir una tonelada de cobre fino ha tenido un mayor crecimiento principalmente a causa del consumo de combustibles en el transporte de mineral desde la mina rajo en minas de mayor antigüedad y profundidad y con cada vez mayores distancias de acarreo. El aumento sostenido del consumo eléctrico por su parte ha estado fundamentalmente determinado por cambios en la cartera de productos comerciales (de cátodos a concentrados) y cambios tecnológicos (como uso de agua de mar), que están indicando que el sector minería del cobre, en la segunda parte de esta década, está experimentando un aumento en la intensidad de uso de electricidad.

Al mismo tiempo, las leyes de mineral son indudablemente una variable crucial en la determinación de los requerimientos de energía dado que una importante parte de los aumentos de consumo son destinados a suplir menor productividad por bajas de ley sostenidas en el tiempo. La Figura 11 ilustra la relación inversa entre la evolución del consumo unitario de energía y la ley promedio anual del mineral desde el 2001 al 2019.

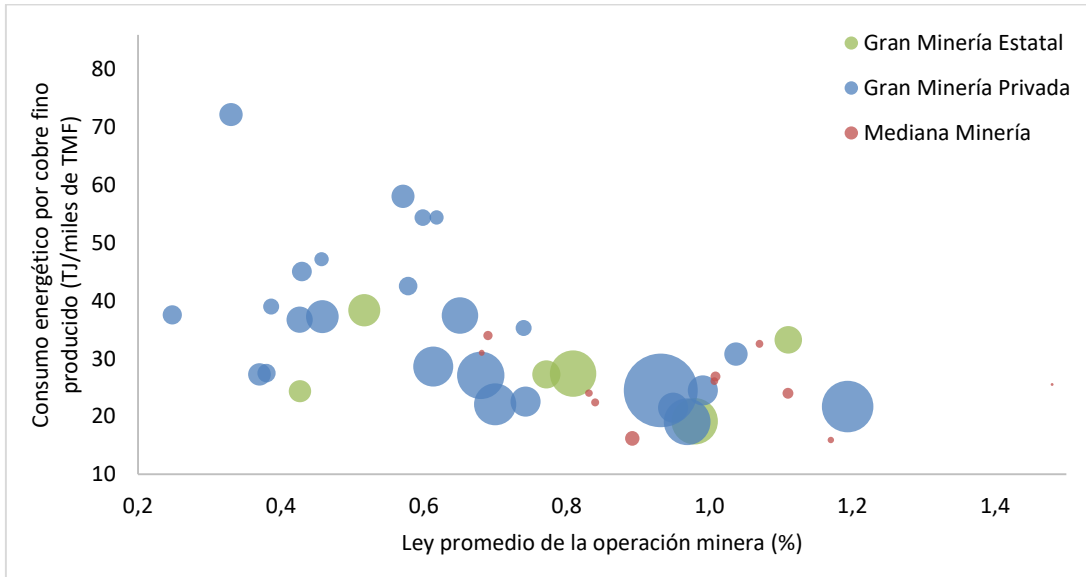
Figura 11 Evolución del consumo unitario de energía y leyes a nivel nacional, 2001-2019



Fuente: Cochilco.

Otra forma de describir esta relación inversa es a través de los coeficientes de consumo energético por cobre fino producido versus las leyes promedio por operación minera al año 2019, como se ilustra en la Figura 12. Como se puede apreciar, las operaciones mineras con mejores leyes de explotación de mineral en general tienen menores niveles de consumo energético por producción de cobre, lo que respalda la incidencia de la ley del mineral en los requerimientos de energía.

Figura 12 Consumo energético por cobre fino producido versus ley promedio del mineral por operación minera, 2019



Nota: Los tamaños de las circunferencias se grafican según el nivel de producción de cobre fino equivalente durante 2019

Fuente: Cochilco.

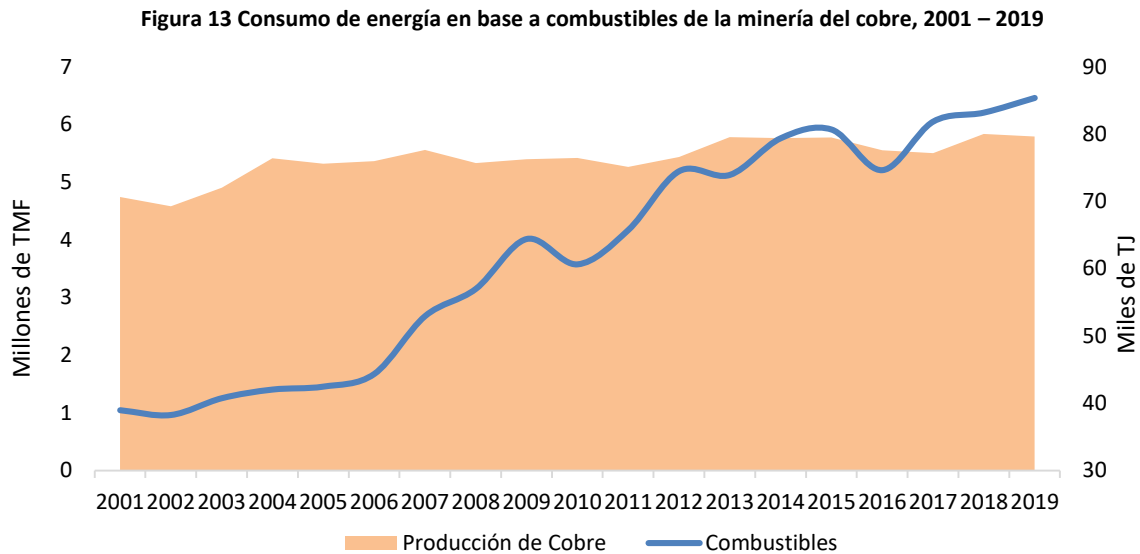
4. Consumo de combustibles

En esta sección se muestra información referente a la evolución interanual de energía en base a combustibles, el total de energía en combustibles por procesos y el consumo unitario de combustibles por cobre fino y por material procesado.

4.1 Consumo agregado

La Figura 13 presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el período 2001-2019. Durante el año 2019 alcanzó los 85.365 TJ, registrando así un aumento de 2180 TJ respecto al 2018, equivalente a una variación de 2,6 % y comparado con el 2001 se registró un aumento del 119,1%.

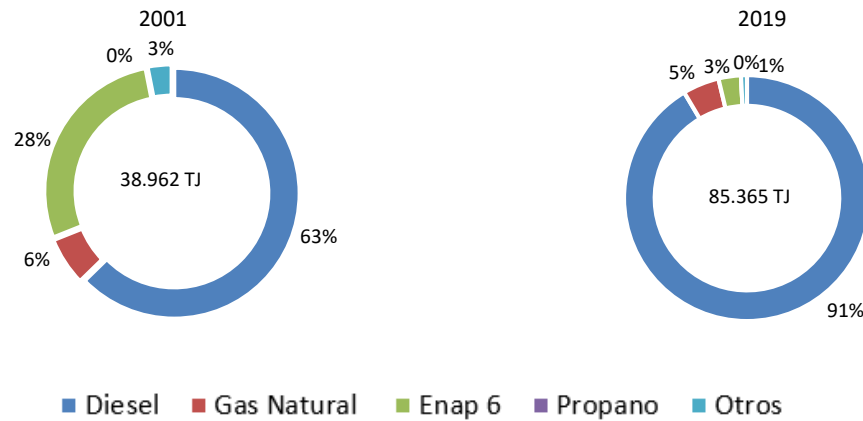
Este crecimiento sostenido en el consumo de combustibles obedece a una producción que en general tiende al alza junto a cambios estructurales que enfrenta la minería del cobre en particular en la fase de explotación, en mina rajo.



Fuente: Cochilco.

La Figura 14, presenta los cambios de la matriz de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (91,5% del total durante 2019 versus un 62,7% en 2001) ha ganado conforme evolucionan las operaciones mineras.

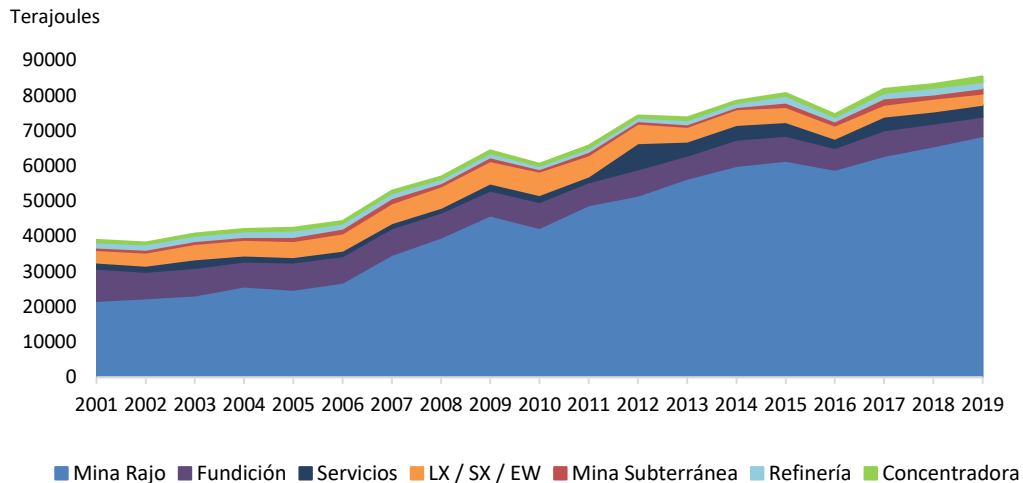
En paralelo, otros combustibles han ido perdiendo progresivamente su usabilidad, destacando el caso del Enap 6. Dicho combustible en el año 2001 representaba un 27,9% de la cartera de combustibles consumidos, pero para el año 2019 sólo representó un 3,0% del total sectorial. Lo anterior se debe en gran medida a la normativa ambiental en calidad del aire existente a nivel nacional, la cual impone límites de emisiones de material particulado y humos visibles en los hornos de refinado, lo que ha conducido a reemplazar Enap 6 por gas natural, como también la sustitución de quemadores convencionales por otros de alta eficiencia que consumen menos combustibles.

Figura 14 Participación de combustibles en el consumo total de combustibles, 2001 y 2019

Fuente: Cochilco.

4.2 Consumo por procesos

Como se observa en Figura 15, el proceso que mayor combustible demanda es la mina rajo (80,1% 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 68.370 TJ en 2019. Esto se explica por una lado por el incremento del 22,1 % de la producción de cobre entre 2001-2019 lo que conlleva un mayor procesamiento de mineral y por otro lado debido a temas estructurales que enfrenta la minería como el decrecimiento en las leyes de las minas 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.

Figura 15 Evolución en el consumo de combustibles por proceso, 2001 – 2019

Fuente: Cochilco

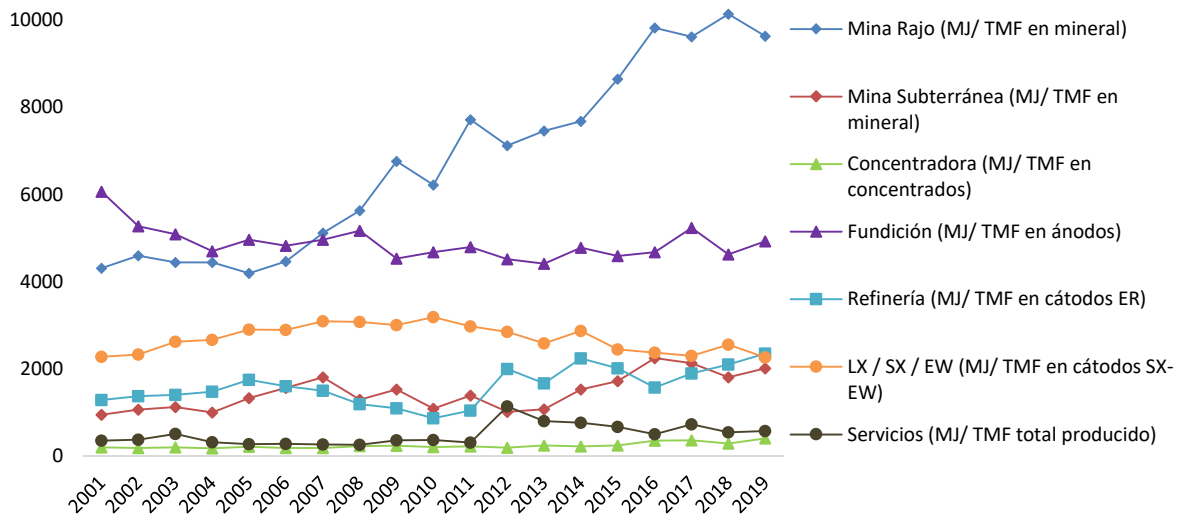
A su vez, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles, disminuyó en un 39,2% en el mismo periodo aun cuando su nivel de procesamiento se ha mantenido en el período analizado.

Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha mantenido con participaciones anuales inferiores al 4% en cada proceso.

4.3 Consumos unitarios

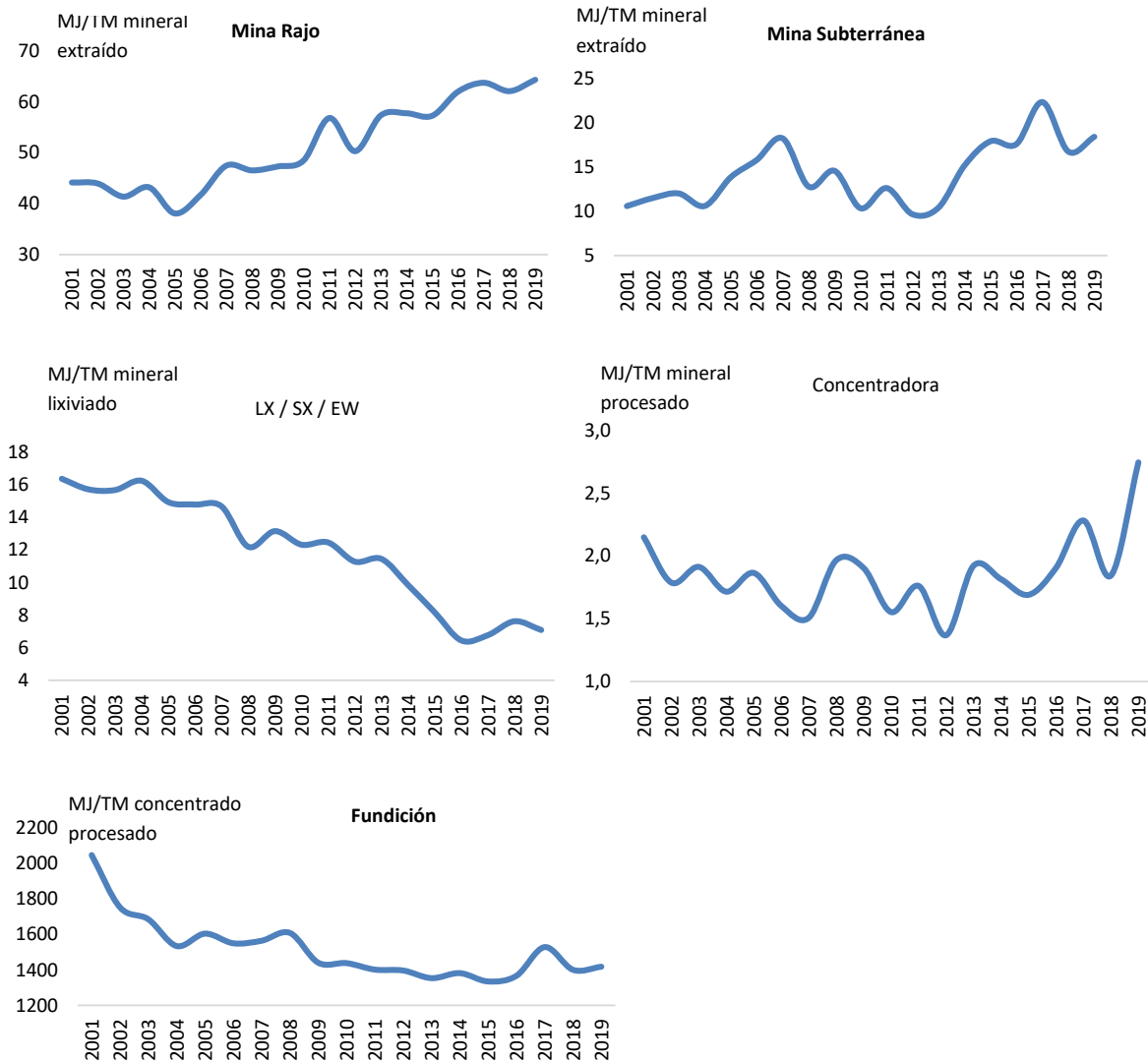
Por otra parte, la Figura 16 ilustra los consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido. Se destaca el proceso de mina rajo, proceso ha crecido en prácticamente todos los años, pasando de 4.308 MJ/TMF en 2001 a 9.635 en 2019 (+123,7%), evidenciando el impacto de las disminuciones en las leyes de mineral. En los demás procesos, los consumos unitarios de combustibles se han mantenido más bien estables durante los últimos 18 años, observándose si al proceso de Fundición que ha disminuido un poco de 6.064 a 4.929 MJ/TMF (- 18,7%) entre 2001-2019.

Figura 16 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF). 2001-2019



Fuente: Cochilco

Al analizar el uso de combustible en la mina rajo respecto del mineral extraído (Figura 17), el promedio ponderado país se incrementa en 45,7% entre el 2001 al 2019 de 44,2 MJ a 64,4 MJ por tonelada de mineral extraído. Esto se debe, por una parte, a que las leyes promedio de los minerales extraídos han disminuido con los años, lo que hace que para obtener la misma cantidad de fino sea necesario extraer más mineral. Por otro lado, si se toma 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, lo mismo que las más antiguas, sus distancias y pendientes de acarreo, tanto de los minerales como de los materiales estériles van aumentando, con el consiguiente aumento de consumo de combustibles.

Figura 17 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de material procesado, 2001-2019

En Figura 17 también destaca, en la Fundición que tiene consumos unitarios de combustible por tonelada de concentrado procesado bastante altos, estos han ido decreciendo en el tiempo, producto de los cambios tecnológicos (detención de hornos reverbero y la utilización de equipos de fusión autógenos (que queman el azufre)) que las fundiciones han debido instalar para dar cumplimiento a las normas ambientales de calidad del aire, teniendo así una disminución entre el 2001 al 2019 del 30,7%, de 2.046 a 1.418 MJ/TM concentrado procesado, por otro lado en el proceso de Lixiviación ha disminuido de 16 a 7 MJ/ TM mineral lixiviado (-56,6%), lo que es indicativo de mejoras operacionales o de gestión.

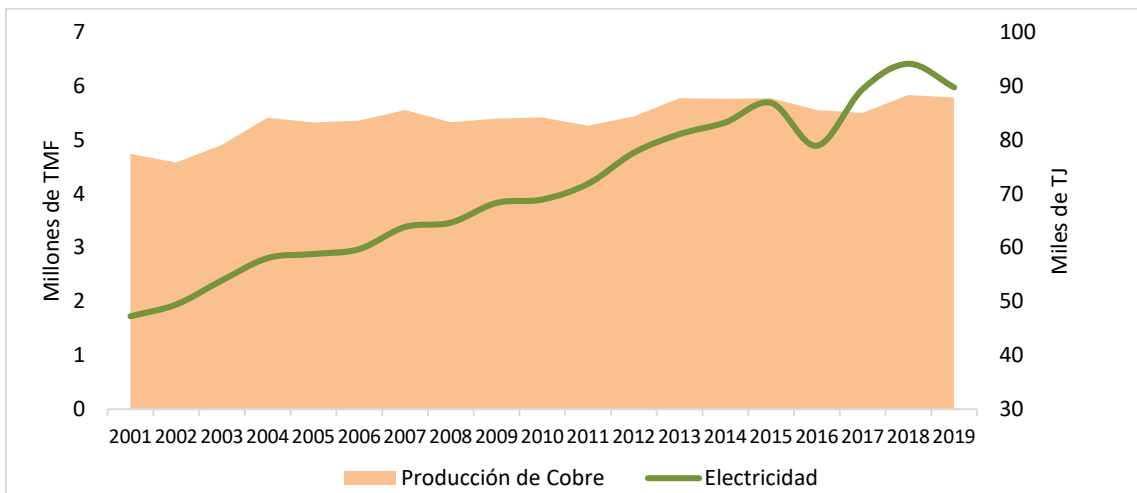
5. Consumo eléctrico

En esta sección se analizan el consumo y variación anual de la energía eléctrica en la minería del cobre a nivel global, por procesos, consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre y el consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral tratado según proceso.

5.1. Consumo agregado

El año 2019 la minería del cobre consumió un total de 89.769 TJ en energía eléctrica. Este consumo corresponde a un aumento del 89,9% respecto del 2001, como se puede observar en la Figura 18, desde el año 2001 este consumo eléctrico ha aumentado progresivamente duplicándose prácticamente al 2019. El aumento del consumo eléctrico, viene dado principalmente por el aumento de capacidad de procesamiento de concentración a nivel nacional y del aumento del consumo eléctrico de los sistemas de impulsión y desalación de agua de mar a las faenas.

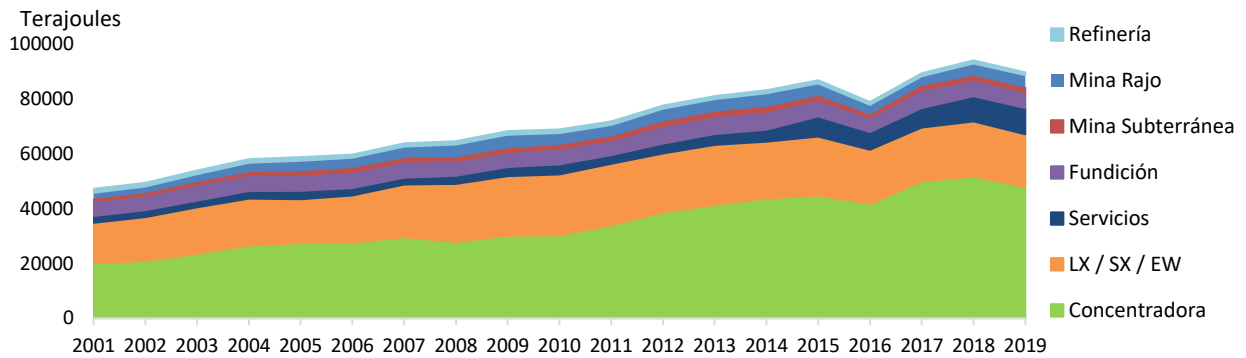
Figura 18 Consumo de energía eléctrica en la minería del cobre, 2001-2019



Fuente: Cochilco.

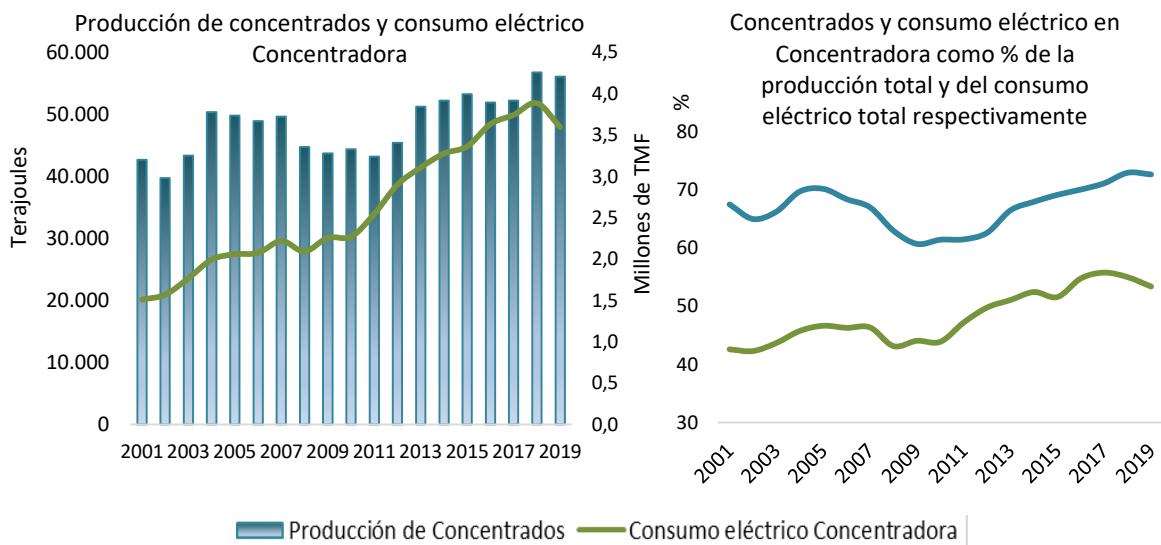
5.2. Consumo por procesos

Como se puede advertir de la Figura 19, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando de 20.141 TJ (42,6% del total de consumo electricidad de la minería) en 2001 a 47.943 TJ (53,4% del total) en 2019. Por otra parte, el consumo eléctrico en lixiviación, la segunda mayor fuente de consumo eléctrico, si bien ha aumentado su consumo eléctricos en términos absolutos de 14.679 TJ en 2001 a 19.182 TJ en 2019, decreció en su participación desde el 31,0% al 21,4% en igual período.

Figura 19 Evolución en el consumo de electricidad por proceso, 2001 - 2019

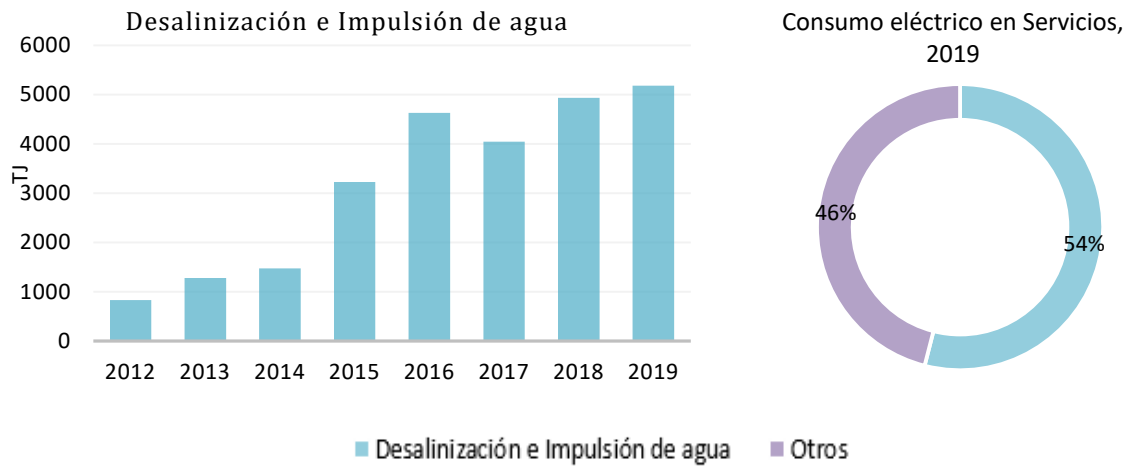
Fuente: Cochilco

En Figura 20 se puede observar el aumento en un 31,4% en la producción de concentrados entre el 2001-2019 pasando del 67,5% de la producción cuprífera nacional al 72,7% el mismo periodo, lo cual incide directamente en un mayor consumo de electricidad señalado anteriormente.

Figura 20 Producción de concentrados y consumo eléctrico en Concentradora en la minería del cobre, 2001 - 2019

Fuente: Cochilco.

El otro proceso que ha ido intensificando su demanda de electricidad es el de Servicios y que ha crecido un 286% entre el 2001 al 2019, cabe señalar que en esta etapa está incluido desalación e impulsión de agua (desalinizada o directa de mar). Es así como, dada las restricciones de agua continental en el norte del país, el proceso que ha crecido rápidamente en su uso de electricidad es la desalación e impulsión de agua a las faenas mineras. En efecto, como se advierte en la Figura 21, este crecimiento del consumo de energía eléctrica para transporte y desalación de agua en la minería del cobre prácticamente se ha multiplicado 6,5 veces en los últimos 6 años, desde 829 Tj en 2012 a 5.179 Tj en 2019, lo que equivale al 54% del consumo eléctrico en Servicios y al 5,8% del consumo eléctrico total de la minería.

Figura 21 Desalinización e impulsión de agua, 2012-2018

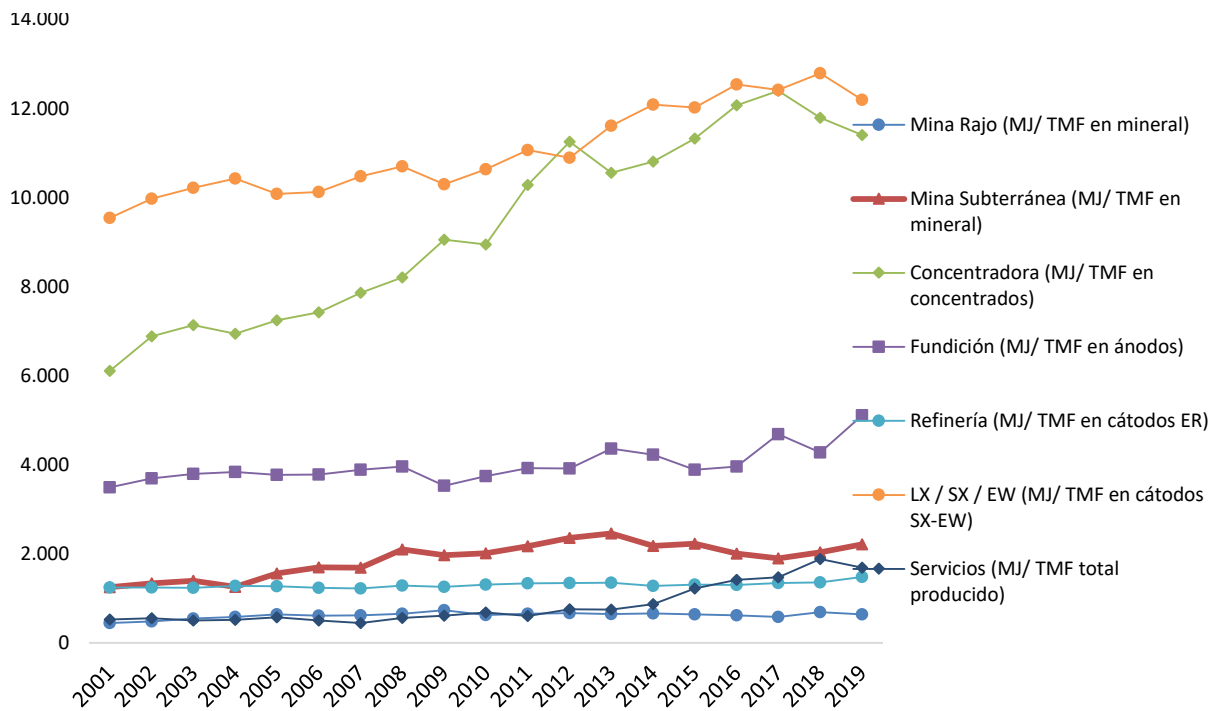
Fuente: Cochilco

El crecimiento reciente evidencia una solución ante las cada vez mayores restricciones de agua continental que afecta a gran parte del territorio minero nacional. Lo anterior hace necesario un análisis más profundo por parte de la autoridad en materia de políticas públicas y planes de desarrollo de estos sistemas, pues se deben alinear e incluir elementos como el suministro eléctrico, la disposición de terrenos interiores para los ductos de impulsión y borde costero para las plantas de desalación.

5.3. Consumos unitarios

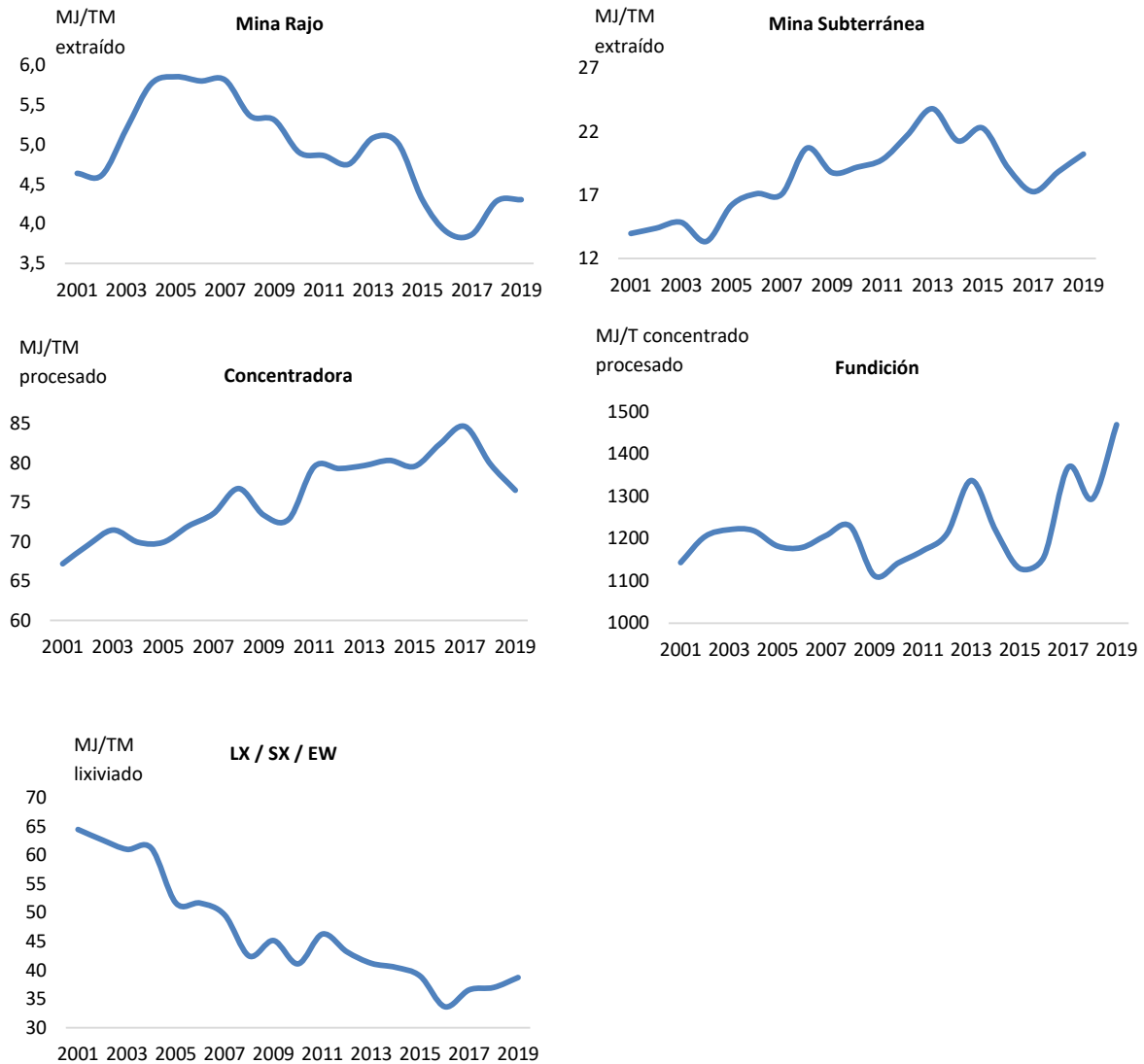
La Figura 22 presenta los consumos unitarios de electricidad por tonelada de cobre fino contenido. Destaca en primer lugar el progresivo incremento del consumo unitario de energía eléctrica en el proceso de Concentradora, que ha crecido de 6.112 a 11.406 TJ/cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 86,6% en el periodo 2001 – 2019. La concentradora es una etapa del proceso de producción de cobre altamente consumidora de energía eléctrica, la que se destina especialmente a las operaciones de chancado y molienda del mineral. Con el envejecimiento de las minas, los yacimientos se hacen más profundos y la roca se endurece, lo cual incide directamente en

Figura 22 Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF), 2001-2019



Fuente: Cochilco

Otro proceso que ha experimentado alzas constantes en su consumo unitario de electricidad ha sido el de LX-SX-EW, de 9.542 a 12.193 TJ/ cobre fino contenido, lo que representa un aumento del 27,8% desde el 2001. El proceso Servicios creció un 221,2%, este aumento se debe principalmente al uso de plantas desalinizadoras e impulsión del agua de mar (directa o desalinizada) Ver Figura 22, en tanto Fundición creció un 46,2 % debido fundamentalmente a la implementación de normativa de calidad del aire lo que ha significado que las fundiciones deban instalar sistemas de captación y manejo de gases, así como plantas de ácido sulfúrico, con el consiguiente incremento en el consumo de energía eléctrica. Además, varias fundiciones llevaron a cabo proyectos de modernización en el período analizado, que han involucrado la instalación de sistemas de transporte e inyección de concentrado seco, como también la instalación de hornos eléctricos para el tratamiento pirometalúrgico de las escorias.

Figura 23 Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral extraído/procesado (MJ/TM), 2001-2019

Fuente: Cochilco.

Al analizar el proceso de concentración en su consumo de electricidad por tonelada de mineral procesado, como se observa en Figura 23 este proceso destaca por incrementos en la mayoría de los años, aunque con mayor moderación que en su consumo unitario por cobre fino contenido, acumulando al 2019 un alza de 13,9%. Otro proceso que ha crecido entre el 2001 al 2019 es la mina subterránea en un 44,8 % llegando a 20 MJ/Tonelada de mineral extraído, este consumo unitarios de electricidad es por lo menos 4 veces más que la mina rajo, ello se debe fundamentalmente a que la minería subterránea requiere más electricidad para el uso intensivo de aire comprimido y servicios de ventilación. En paralelo, el consumo unitario del proceso de LX-SX-EW, ha caído un 40,0 % en el período 2001-2019 principalmente a causa de una extracción de mineral que crece a una tasa más rápida que el consumo eléctrico asociado a lixiviación y electro-obtención de cátodos, cuya producción se ha mantenido relativamente estable en el tiempo.

Los valores de los demás procesos se mantienen en general estables en el tiempo, lo que demuestra que en el período no se han producido mayores cambios en fundiciones y en las refineras electrolíticas

que operan en el país, todas las cuales utilizan tecnología convencional y las diferencias entre ellas se deben a las distintas densidades de corriente que utilizan y al tamaño de los cátodos.

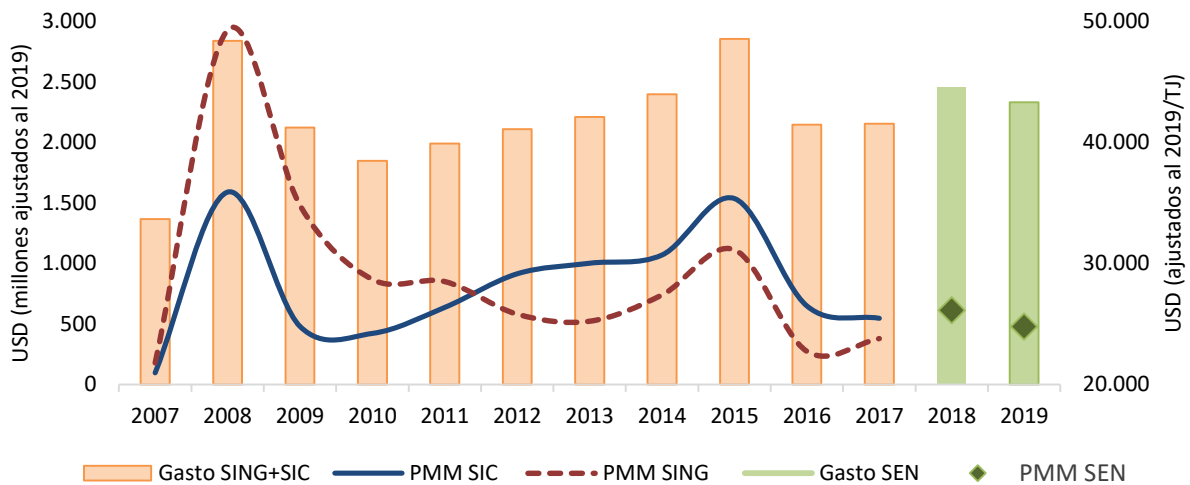
6. Gasto energético

Una vez determinados los consumos energéticos en electricidad y combustibles, podemos estimar los costos incurridos en base a los precios de mercado. Para el caso del consumo eléctrico, empleamos los Precios Medios de Mercado (PMM) del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) a partir de su funcionamiento a fines del 2017. Para el caso del consumo de combustibles, ocupamos los precios internacionales de los hidrocarburos. Cabe señalar que todos los costos y precios han sido ajustados por el Índice de Precios de Producción (IPP) minera al año 2019 a fin de hacer comparables los valores en el tiempo.

El Precio Medio de Mercado (PMM) se determina considerando los precios medios de los contratos de clientes libres y suministro de largo plazo de las empresas distribuidoras, según corresponda, informados a la Comisión Nacional de Energía por las empresas generadoras del Sistema Eléctrico Nacional, respectivamente. El PMM año 2019 es de 24.790 USD al 2019/TJ.

De esta manera, al revisar el gasto por concepto de electricidad en minería del cobre en el año 2019 se observa que este es de 2.225 millones USD ajustados al 2019 (Ver Figura 24).

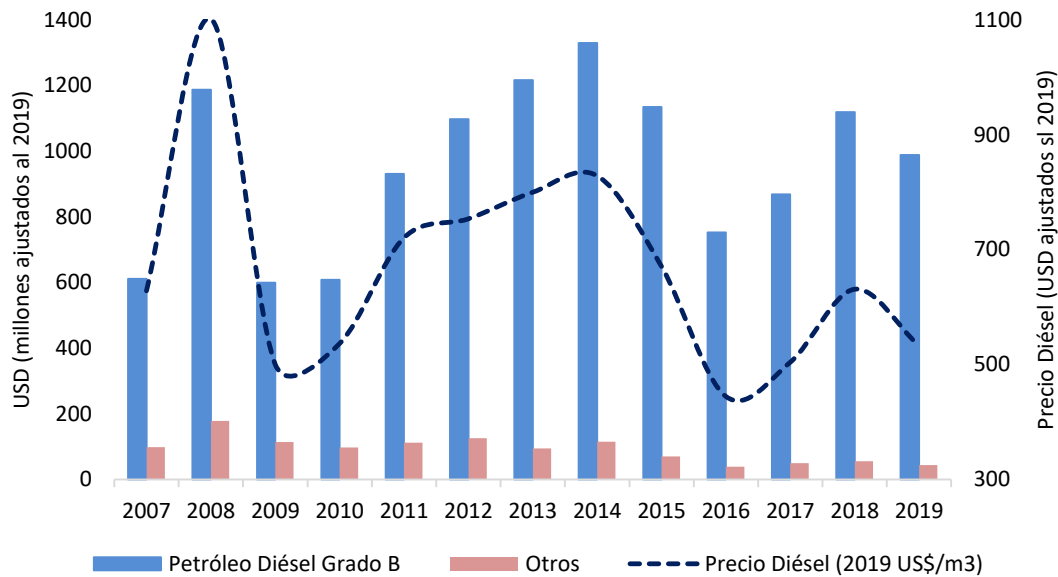
Figura 24 Gasto agregado en electricidad de la minería del cobre, 2007-2019



Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía

Por otra parte, en relación al gasto en combustibles, vemos de la Figura 25 que, en concordancia con un uso creciente del diésel en la minería cuprífera nacional, su gasto como proporción del consumo total de combustibles también ha aumentado, pasando de un 86,1% en 2007 a un 95,8% en 2019. Es decir, prácticamente la totalidad del gasto energético en combustibles reside específicamente en diésel, situación que provoca que los costos energéticos sean altamente dependientes de los precios internacionales del hidrocarburo.

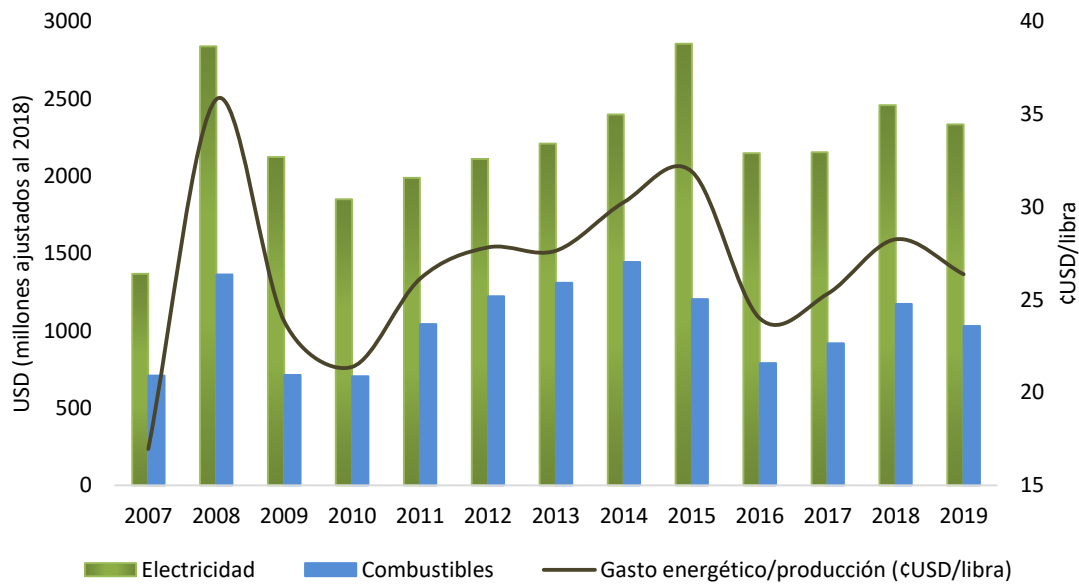
Figura 25 Gasto agregado en combustibles de la minería del cobre, 2007-2019



Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía.

Ahora bien, integrando las dos fuentes de gasto energético, electricidad y combustibles, vemos de la Figura 26 que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con USD 2.339 millones frente a los USD 1031 millones del costo asociado al consumo de combustible durante el año 2019. Es decir, prácticamente 2,3 veces más. Al mismo tiempo, el gasto energético por libra de cobre producida llegó a las ¢USD 26,4 un 17,3% menos en relación a los ¢USD 31,9 de 2015, principalmente debido a la reducción de los costos de electricidad.

Figura 26 Gasto energético agregado de la minería del cobre, 2007-2019



Fuente: Cochilco en base a datos propios y de la Comisión Nacional de Energía.

De lo anterior se puede desprender además el gasto en electricidad por TJ es sustantivamente mayor que en combustibles. En efecto, dado que los consumos agregados de combustibles y energía medidos en TJ son relativamente similares, tenemos que el gasto promedio por TJ en combustibles alcanza los \$8,49 millones, mientras que el gasto promedio por TJ en electricidad llegó a los \$18,27 millones. En suma, se estima que el consumo energético representa cerca del 14% (electricidad 9% y combustibles 5%) de los costos de la minería del cobre en Chile.

7. Comentarios finales

El aumento progresivo en el consumo energético superior a los aumentos en la producción de cobre se atribuye a causas estructurales y de producción en la industria del cobre nacional. Por el lado de las causas estructurales, se encuentra el envejecimiento de las minas, lo que a su vez se relaciona con menores leyes del mineral, a una roca más endurecida y a mayores distancias de acarreo, situación que en su conjunto aumenta los requerimientos energéticos, especialmente de combustibles. En paralelo, se cuenta las restricciones a la extracción de agua continental, que ha impulsado a varias faenas a instalar plantas de desalación e impulsión de agua marítima hacia las faenas, proceso que es altamente intensivo en electricidad. Atendiendo a las causas productivas, destaca la sucesiva mayor producción de concentrados de cobre, lo que incrementa la necesidad de energía, sobre todo eléctrica, por dos vías. La directa, mediante el proceso mismo de concentración de mineral intensivo en energía eléctrica. La indirecta, por el mayor uso de agua en este proceso, lo que a su vez refuerza la tendencia al uso de agua de mar, intensivo en energía eléctrica.

A pesar de estos desafíos, actualmente el escenario de suministro energético en el país se presenta más favorable para el desarrollo de la minería del cobre que en años anteriores, en términos de que

los precios de combustible y energía eléctrica se han mantenido relativamente estables y lejos de los altos niveles alcanzados diez años atrás. Además el 2018 se concretó la integración de los Sistemas Interconectados Central y del Norte Grande, lo que ha permitido avanzar hacia una mayor seguridad en el abastecimiento.

Al mismo tiempo, la unión de los sistemas SIC y SING ha permitido la integración de energías renovables y renovables no convencionales, lo que permitirá disminuir los costos energéticos, reducir los niveles de contaminación asociados al uso de combustibles y reducir los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero por uso electricidad.

En esta materia es fundamental el compromiso y colaboración entre las propias empresas mineras y el Estado con la eficiencia energética, ya que ello permite la transferencia de mejores prácticas en este ámbito, fortaleciendo la sustentabilidad del negocio minero.

En consecuencia, la visión de largo plazo que se le da al negocio minero va de la mano con el desarrollo que tiene el sector energético, el cual en el último tiempo ha presentado varios avances en materia de costos y seguridad del sistema que son indudablemente un impulso para la industria. Sin embargo es necesario ir más allá para dar respuesta a los desafíos específicos que una minería madura le presenta al país.



8. Anexo: Operaciones consideradas

Tabla 3 Operaciones consideradas en la edición 2019 de la EMPAE

Nombre	Región	Tamaño
Pampa Camarones	XV	Med Min Cu
Cerro Colorado	I	Gran Min Cu
Collahuasi	I	Gran Min Cu
Quebrada Blanca	I	Gran Min Cu
Altonorte	II	Gran Min Cu
Antucoya	II	Gran Min Cu
Cenizas Taltal	II	Med Min Cu
Centinela	II	Gran Min Cu
Chuquicamata	II	Estatal
El Abra	II	Gran Min Cu
Escondida	II	Gran Min Cu
Franke	II	Med Min Cu
Gaby	II	Estatal
Lomas Bayas	II	Gran Min Cu
Mantos Blancos	II	Gran Min Cu
Mantos de la Luna	II	Med Min Cu
Ministro Hales	II	Estatal
Planta Salado	II	Med Min Est
Planta Taltal	II	Med Min Est
Radomiro Tomic	II	Estatal
Sierra Gorda	II	Gran Min Cu
Spence	II	Gran Min Cu
Zaldivar	II	Gran Min Cu
Atacama Kozan	III	Med Min Cu
Candelaria	III	Gran Min Cu
Caserones	III	Gran Min Cu
Mantoverde	III	Gran Min Cu
Ojos del Salado	III	Med Min Cu
Paipote	III	Med Min Est
Planta Matta	III	Med Min Est
Planta Vallenar	III	Med Min Est
Pucobre	III	Med Min Cu
Salvador	III	Estatal
Carola	III	Med Min Cu
Andacollo	IV	Gran Min Cu
Los Pelambres	IV	Gran Min Cu
Planta Delta	IV	Med Min Est
San Gerónimo	IV	Med Min Cu
Amalia Catemu	V	Med Min Cu
Andina	V	Estatal
Cenizas Cabildo	V	Med Min Cu
Chagres	V	Gran Min Cu
Don Alberto	V	Med Min Cu
El Soldado	V	Gran Min Cu
La Patagua	V	Med Min Cu
Ventanas	V	Estatal
Los Bronces	RM	Gran Min Cu
El Teniente	VI	Estatal

Fuente: Cochilco.



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

Rosana Brantes Abarca

Analista de Dirección de Estudios y Políticas Públicas

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Octubre / 2020



