



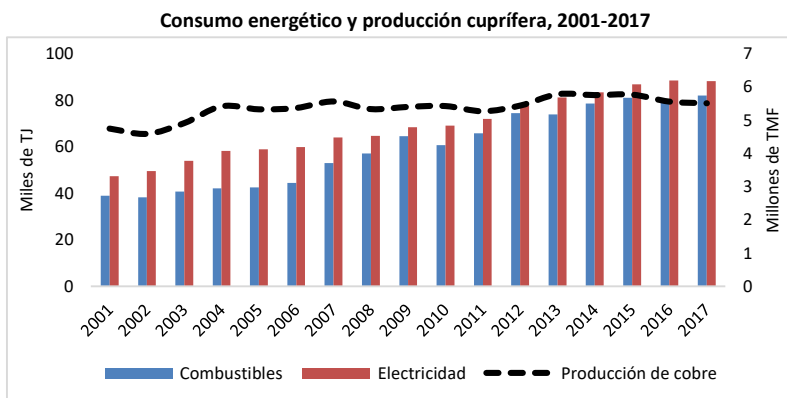
Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2017

DEPP 03/2018

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 desde el año 2001. Considerando las plantas de Enami, para el año 2017 llegó al 100% de la población, guardando así las características de un censo.

Al 2017 la industria minera del cobre tuvo un consumo total de energía de 169.923 TJ, lo que representa alrededor del 14% del consumo agregado del país. De este total, la energía eléctrica comprende el 51,8%. La figura a la derecha ilustra el consumo energético de electricidad (51,8% del total) y combustibles (48,2%) y la producción de cobre fino desde el 2001 al 2017.



Fuente: Cochilco.

Si bien a nivel general los consumos de electricidad y combustibles son relativamente similares, a nivel de procesos varían significativamente. En efecto, para el caso del consumo de combustibles, la mina rajo se lleva el 77% del total, seguido por fundiciones con un 9%. Para el consumo eléctrico en cambio, el proceso de concentradora es la fuerza dominante con un 57%, seguido de la electro-obtención con un 22%.

A nivel regional, Antofagasta es por lejos la región con mayor consumo energético en minería del cobre tanto en combustibles (46 mil TJ, equivalente al 58,2% del total durante 2017) como en electricidad (47,6 mil TJ, equivalente al 52,2% del total). Le sigue la región de Atacama por su parte cuenta con una participación del 11,4% del consumo energético total, las regiones de Coquimbo y Valparaíso en conjunto con el 12,9%, las regiones de O'Higgins y Metropolitana con el 11,6% y la región de Arica y Parinacota con el 9,1%.

En relación al consumo por tamaño, la gran minería privada del cobre fue responsable de dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2017, mientras que la gran minería estatal, representada por Codelco, representa el 30% y el 28% de combustibles y electricidad, respectivamente. La mediana minería privada por su parte es responsable del 3% de combustibles y 4% de electricidad.

Por último, en relación a los costos, vemos que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con \$1.417 miles de millones frente a los \$596 miles de millones del costo asociado al consumo de combustible durante 2017. Es decir, casi 2,5 veces más. En suma, se estima que el consumo energético representa entre un 11% y un 12% 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. El envejecimiento de las minas, el endurecimiento de la roca, la caída de las leyes de cobre, la construcción de plantas desalinizadoras por osmosis inversa y la tendencia hacia la producción de concentrados, provocó un nuevo aumento del consumo de energía de 0,9% con respecto al 2016, a pesar de que la producción nacional de cobre mina disminuyó en un 0,9%. Esta situación de producción decreciente y consumo creciente ha ocurrido en los últimos cuatro años. En efecto, desde el 2013 la producción cuprífera ha caído un 4,7% mientras que el consumo energético ha crecido en un 9,7% en el mismo periodo.

Tabla de Contenidos

Resumen Ejecutivo	I
1. Introducción	3
2. Metodología	3
2.1. Información general y encuesta	3
2.2. Análisis de los datos.....	5
2.2.1. Combustibles:	6
2.2.2. Energía Eléctrica:.....	7
3. Consumo de energía de la minería del cobre a nivel nacional.....	8
3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre	8
3.2. Consumos por procesos productivos.....	8
3.3. Participación del consumo de la energía de la minería del cobre en el consumo nacional de energía	10
3.4. Consumos de Energía por Región	11
3.5. Consumos por tamaño de minería	12
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre	13
4. Consumo de combustibles	15
4.1 Consumo agregado.....	15
4.2 Consumo por procesos.....	16
4.3 Consumos unitarios	16
5. Consumo eléctrico.....	19
5.1. Consumo agregado	19
5.2. Consumos energía eléctrica por SIC y SING	19
5.3. Consumo por procesos	20
5.4. Eficiencia energética	21
5.5. Consumos unitarios	22
6. Gasto energético	24
7. Comentarios finales.....	26
8. Anexo: Operaciones consideradas	27



1. Introducción

Desde el 2001 la Comisión Chilena del Cobre (Cochilco) lleva a cabo la Encuesta Minera de Producción, Agua y Energía (EMPAAE) dirigida a las empresas mineras de cobre del país. 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 por último en la sección 7 se entregan comentarios finales del informe.

2. Metodología

La metodología se puede sintetizar en tres partes:

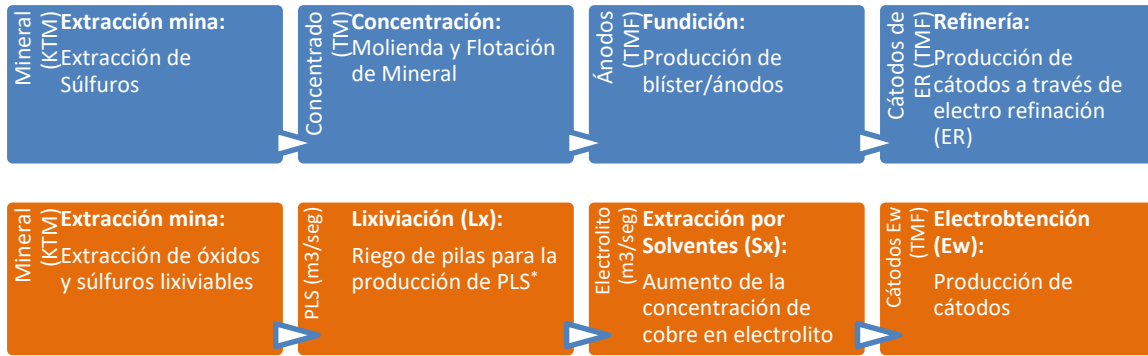
- a) A través de la EMPAAE, se consultan los niveles de producción, consumo de energía y agua por proceso minero.
- b) Se revisa la información recibida y se solicitan ajustes a las empresas en caso de existir discrepancias con otras fuentes de información o valores atípicos respecto de la información 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 refinación. 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, se muestran en cada una de las casillas el producto, y sus respectivas unidades, de cada uno de los procesos.



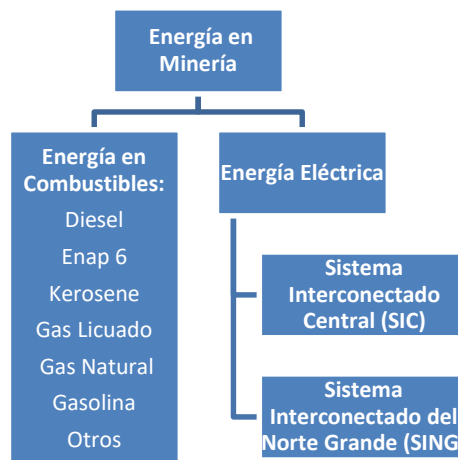
Figura 1: Procesos productivo de la minería del cobre

* 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 la electricidad de los sistemas interconectados y los combustibles. Se identifican los Sistemas Interconectados del Norte Grande (SING) y Central (SIC). 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 2016 se encuestaron un total de 56 operaciones mineras, entre las que se encuentran minas, fundiciones y refinерías, las que representan al 100% de la producción de cobre fino a nivel nacional (véase el anexo para el listado completo de las operaciones). Lo anterior corresponde al porcentaje más alto de cobertura alcanzado desde la creación de la EMPAE, gracias al 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: World Nuclear Organization.

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

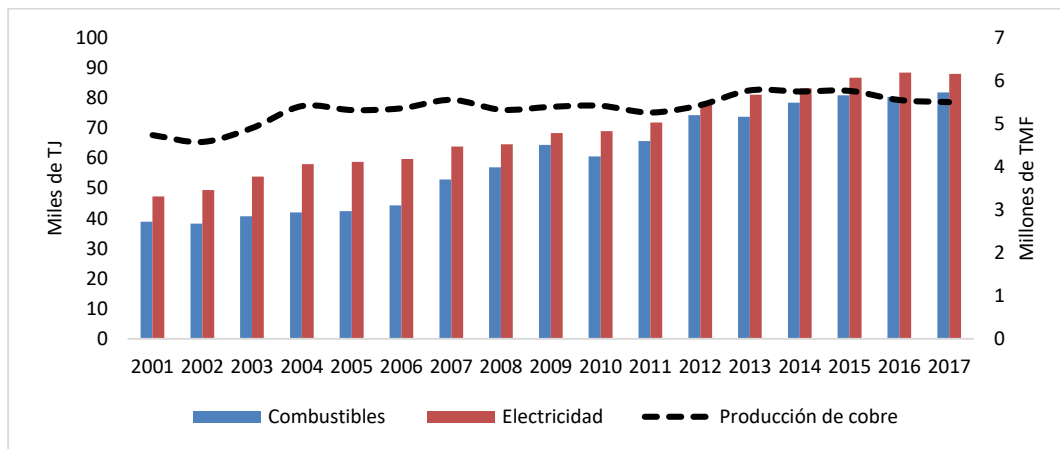
En el presente capítulo se indican los resultados de los consumos energéticos estimados para la minería del cobre en Chile.

3.1. Consumos totales de energía en la minería del cobre

El consumo energético total en la minería del cobre aumentó de 168.487 TJ en 2016 a 169.923 TJ en 2017, reflejando un alza interanual de 0,9%. Sin embargo, la producción nacional de cobre mina disminuyó en alrededor de 50 mil toneladas de cobre fino, lo que representa una caída del 0,9%¹, reflejando la presión energética en la minería cuprífera nacional.

La Figura 3 ilustra el comportamiento histórico desde el 2001 de la producción de cobre y el consumo energético por combustibles y electricidad. Vemos que a pesar de que la producción ha sido voluble en el tiempo, el consumo energético ha tendido al alza en prácticamente todos los años.

Figura 3 Consumos Totales de Energía de la Minería del Cobre vs Producción de Cobre Fino, 2001-2017



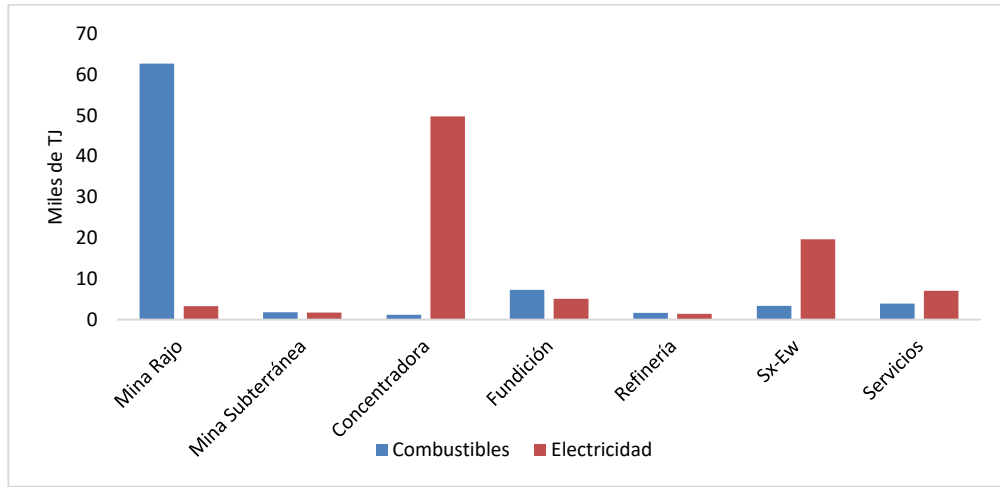
Fuente: Cochilco.

3.2. Consumos por procesos productivos

Si bien a nivel general los consumos de electricidad y combustibles son relativamente similares, con un 51,8% y un 48,2% del total respectivamente, para el año 2017 a nivel de procesos varían significativamente. En efecto, para el caso del consumo de combustibles, la mina rajo se lleva el 77% del total, seguido por fundiciones con un 9% y luego por servicios con un 5%. Para el consumo eléctrico en cambio, el proceso de concentradora es la fuerza dominante con un 57%, seguido de la electro-obtención con un 22%, y los servicios con un 8%. La Figura 4 a continuación resume los consumos por proceso y tipo de energía para el año 2017.

¹ Esta baja se atribuye principalmente a una menor producción de Escondida (-7,6% en relación al 2016), dada la huelga enfrentada durante el primer trimestre del año.

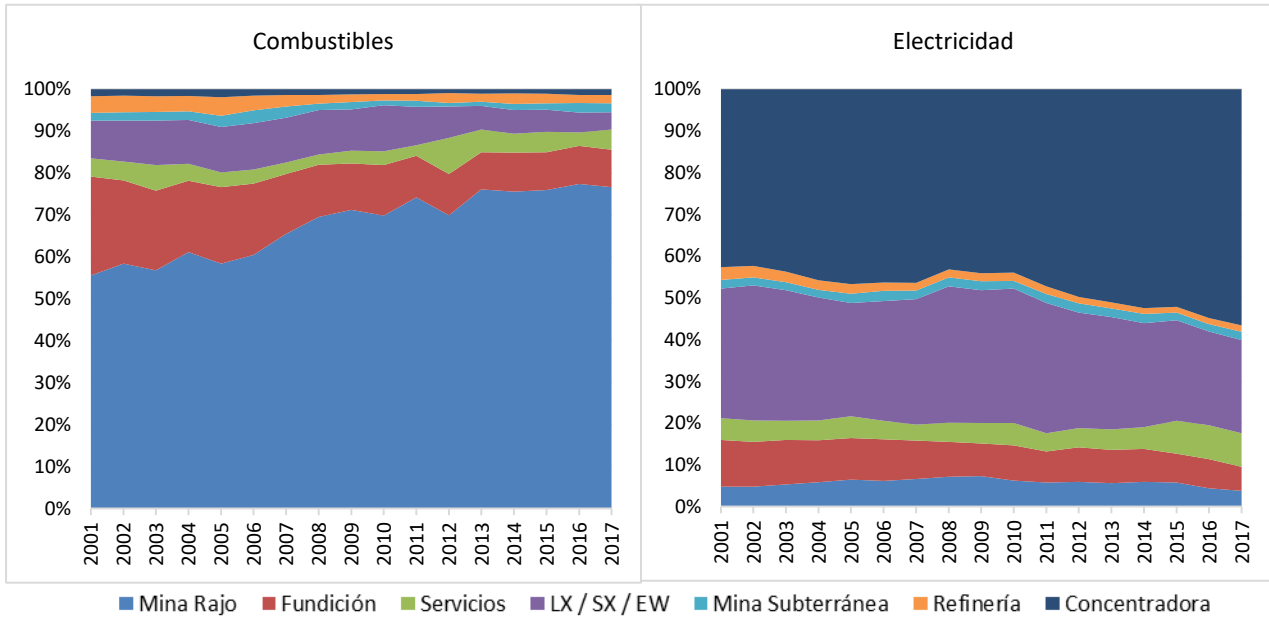
Figura 4 Consumo de electricidad y combustibles por procesos en la minería del cobre, 2017



Fuente: Cochilco.

Analizando su evolución en el tiempo, 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, el consumo de combustibles de mina rajo se incrementó desde un 55,6% del consumo agregado de combustibles en 2001 al 76,7% en 2017. Por el lado de la electricidad, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando del 42,6% del total en 2001 al 56,6% en 2017. La Figura 5 ilustra la participación en el tiempo de los consumos de combustibles y electricidad por proceso.

Figura 5 Evolución en la participación (%) por proceso en el consumo de combustibles y electricidad, 2001-2017



Fuente: Cochilco.



Por otra parte, si bien la producción y el consumo energético son variables históricamente correlacionadas positivamente, en los últimos años se hace visible el desacople entre las mismas, pues a pesar de que la producción de cobre ha decrecido desde 5,78 millones de TM en 2013 a 5,50 en 2017 (-4,7%), el consumo energético ha pasado de 155 mil TJ a 170 mil en el mismo periodo (+9,7%).

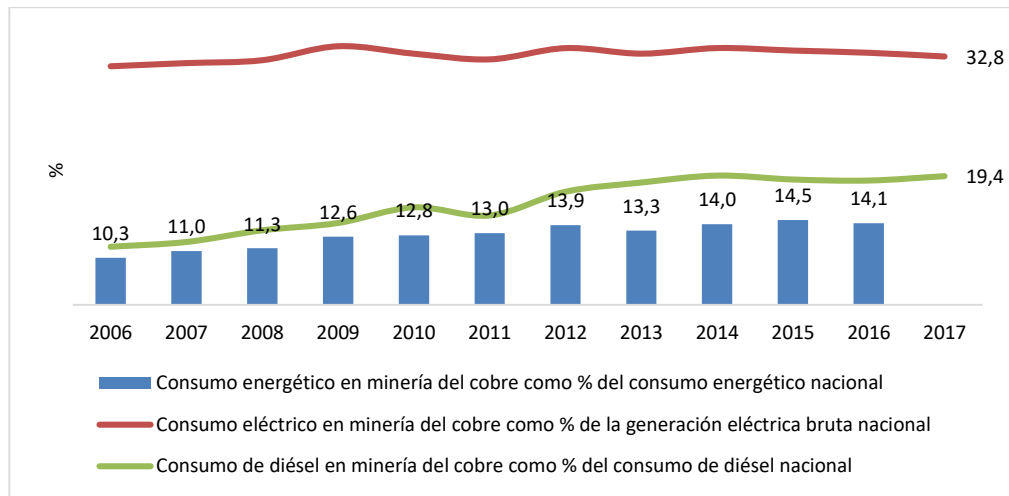
Este aumento en la intensidad de uso de energía por parte de la minería del cobre, se explica principalmente por cambios estructurales en distintas fases del proceso de explotación, entre los que se destacan los siguientes:

- Tendencia decreciente en las leyes de las minas: La ley de mineral promedio del país en general ha tendido a la baja, desde 1,08% en 2001 hasta 0,64% en 2017 (-40%), con las leyes promedio de concentradora en específico, proceso altamente intensivo en electricidad, cayendo desde 1,24% hasta 0,8% en el mismo periodo (-36%).
- Mayor dureza de la roca: Situación que se asocia al envejecimiento de las minas y una mayor profundidad de excavación.
- Aumento de las distancias de acarreo: A medida que las minas se van envejeciendo, la roca se hace más dura y además se requiere profundizar en vetas más distantes de extracción, lo que aumenta las distancias de acarreo de mineral desde su extracción hasta su procesamiento.
- Tendencia a la mayor producción de concentrados: Mientras que la producción de cátodos SxEw se ha mantenido relativamente estable en el tiempo en torno a 1,5-1.6 millones de TM entre 2001 y 2017, la producción de concentrados (considerando aquellos fundidos local y externamente) ha aumentado desde 3,2 millones de TM en 2001 hasta 3,9 en 2017. Dado que este producto es altamente intensivo en energía eléctrica en el proceso de concentradora, se ha presionado al alza en el uso energético en general.
- Tendencia al uso de agua de mar: Ante la escasez hídrica del norte del país, donde la mayor parte de las minas están localizadas, varias operaciones han recurrido al uso de agua marítima, para lo cual se requiere de su desalinización e impulsión a las faenas, lo que presiona a un mayor consumo energético, particularmente en el proceso de impulsión. Ambos procesos, desalación e impulsión, son contabilizados en la categoría de Servicios.
-

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% del consumo energético del país, cifra que en general ha experimentado progresivas alzas marginales desde el 2006 en adelante (véase Figura 6). 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 creciendo sustantivamente desde un 11,5% en 2006 a un 23,5% del consumo nacional.



Figura 6 Participación del consumo sectorial de energía en el consumo nacional, 2006-2017

Fuente: Cochilco en base a datos propios y el Anuario Estadístico de Energía 2017 (Comisión Nacional de Energía, 2018).

Nota: Se omite el consumo energético en minería del cobre como porcentaje del consumo energético nacional para el 2017 dado que a la fecha del presente informe no se cuenta con el consumo energético agregado para dicho año.

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 (46 mil TJ, equivalente al 58,2% del total durante 2017) como en electricidad (47,6 mil TJ, equivalente al 52,2% del total). El mayor consumo energético de Antofagasta viene dado por su alta producción de cobre (52,5% del total) pero también –como se señaló previamente- por las restricciones geográficas que enfrenta, en particular la escasez hídrica que ha incentivado a muchas operaciones a ocupar agua de mar, cuyo proceso de impulsión y desalación es altamente intensivo en energía eléctrica.

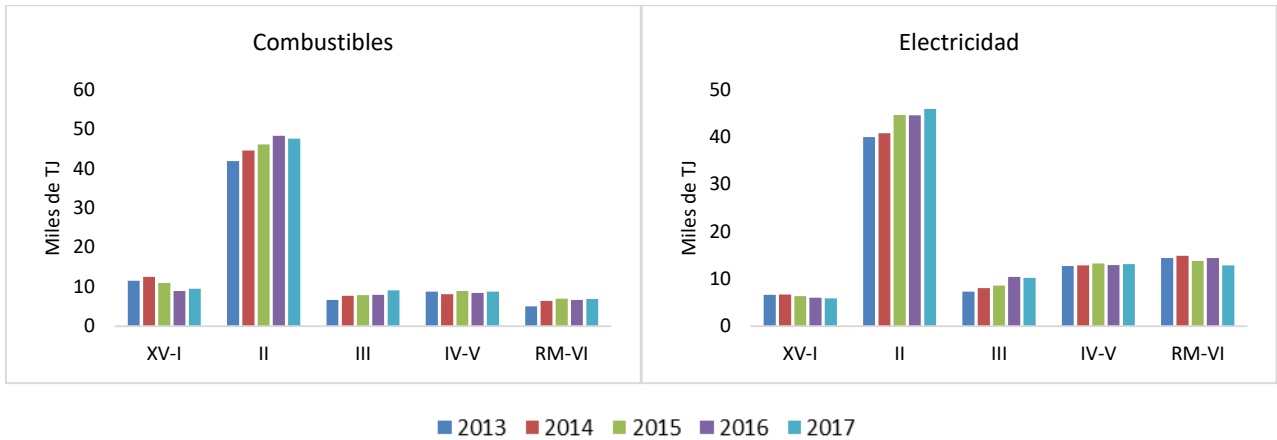
Tabla 2: Participación (%) del consumo de energía y producción de cobre por región, 2017

	XV-I	II	III	IV-V	RM-VI
Consumo electricidad	6.7	52.2	11.6	14.9	14.6
Consumo combustibles	11.6	58.2	11.1	10.7	8.5
Consumo total energía	9.1	55.1	11.4	12.9	11.6
Producción cobre	11.2	52.5	8.8	13.6	14.0

Fuente: Cochilco.

En este contexto, el consumo energético total de Antofagasta ha estado en alza durante los últimos años, pasando de 81,9 mil TJ en 2013 a 93,6 mil TJ en 2017 (+14%). Atacama (III) también ha experimentado un alza en el mismo periodo, pasando de 13,9 mil TJ a 19,3 mil (+39%). Por otra parte, las regiones de Coquimbo y Valparaíso (IV y V) tuvieron un alza marginal de 21,5 mil TJ a 21,9 mil TJ (+1,9%), mientras que las regiones Metropolitana y del Libertador Bernardo O'Higgins (RM y VI) pasaron de 19,5 mil TJ a 19,8 mil TJ (1,5%) en el mismo periodo. Al mismo tiempo, las regiones de Tarapacá y de Arica y Parinacota (I y XV) decrecieron, bajando de 18,2 mil TJ a 15,4 mil TJ (-15%).

Figura 7 Consumo de energía en la minería del cobre por región, 2013-2017

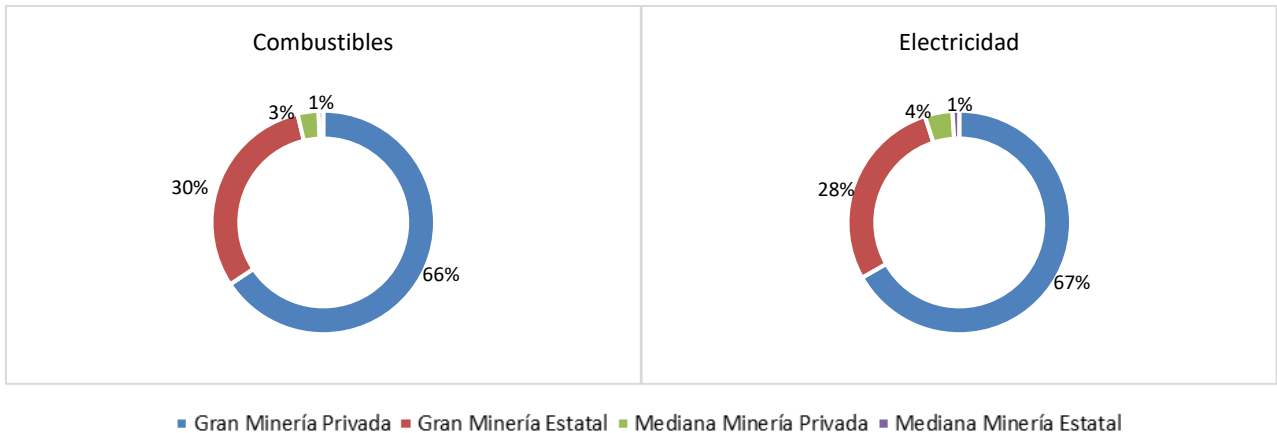


Fuente: Cochilco.

3.5. Consumos por tamaño de minería

Como se aprecia en la Figura 8, la gran minería privada del cobre fue responsable de dos tercios del consumo tanto de electricidad como de combustibles durante el año 2017. La gran minería estatal por su parte, representada por Codelco, concentró el 30% y el 28% de combustibles y electricidad, respectivamente. La mediana minería privada es responsable del 3% de combustibles y 4% de electricidad. Por último, la mediana minería estatal, representada por las plantas de Enami, consume cerca del 1% en cada fuente energética.

Figura 8 Consumo de energía en la minería del cobre por tamaño, 2017



Fuente: Cochilco.

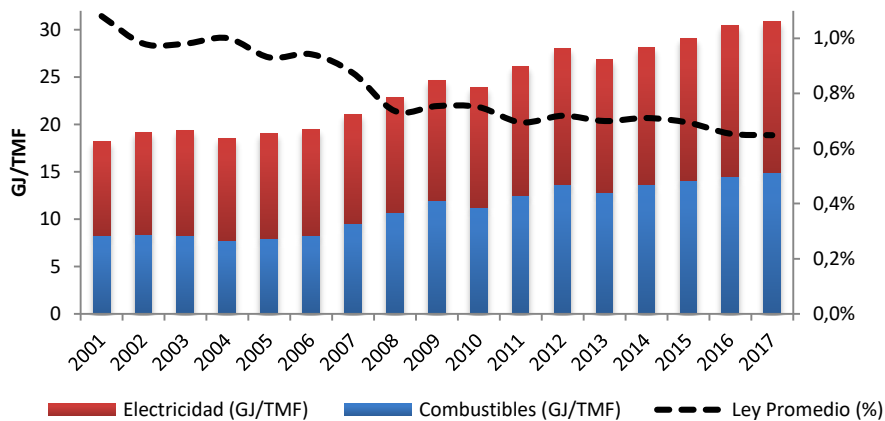
3.6. Consumos totales unitarios de energía en la minería del cobre

El consumo unitario de energía es una medida útil para dimensionar la intensidad de uso de energía por tonelada de cobre fino producido. Esta medida, a pesar de no corregir por los cambios estructurales antes mencionados, permite analizar la tendencia del consumo de energía en la producción minera. Así, para el año 2017 se necesitaron en promedio 30,9 GJ para producir una tonelada de cobre fino, un 1,6% más que el año anterior y un 69,7% 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 14,9 GJ/TMF en 2017 (+80,9%), mientras que el consumo de electricidad aumentó de 10,0 GJ/TMF a 16 GJ/TMF (+60,4%) 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 los incrementos del consumo en la planta concentradora.

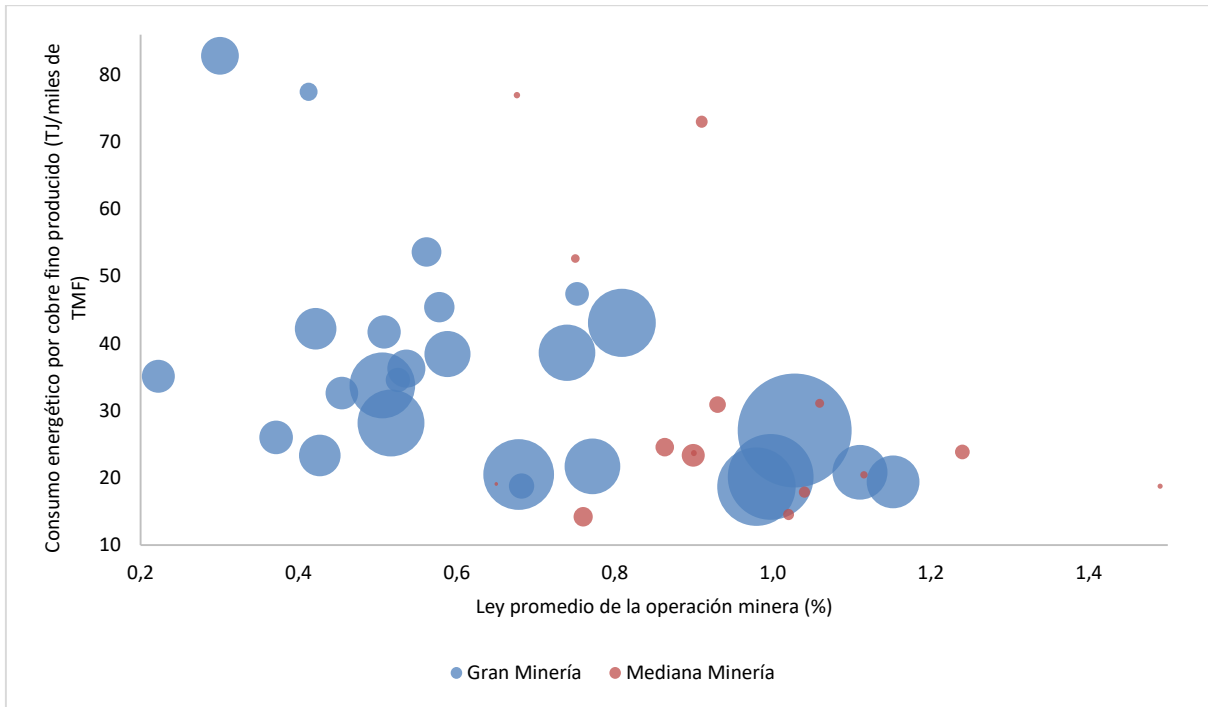
Al mismo tiempo, las leyes de mineral son indudablemente una variable crucial en la determinación de los requerimientos de energía dado que una importante parte de los aumentos de consumo son destinados a suplir menor productividad por bajas de ley sostenidas en el tiempo. La Figura 9 ilustra la relación inversa entre la evolución del consumo unitario de energía y la ley promedio anual del mineral desde el 2001 al 2017.

Figura 9 Evolución del consumo unitario de energía y leyes a nivel nacional, 2001-2017



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 2017, como se ilustra en la Figura 10. 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 10 Consumo energético por cobre fino producido versus ley promedio del mineral por operación minera, 2017

Nota: Los tamaños de las circunferencias se grafican según el nivel de producción de cobre fino equivalente durante 2017.

Fuente: Cochilco.

4. Consumo de combustibles

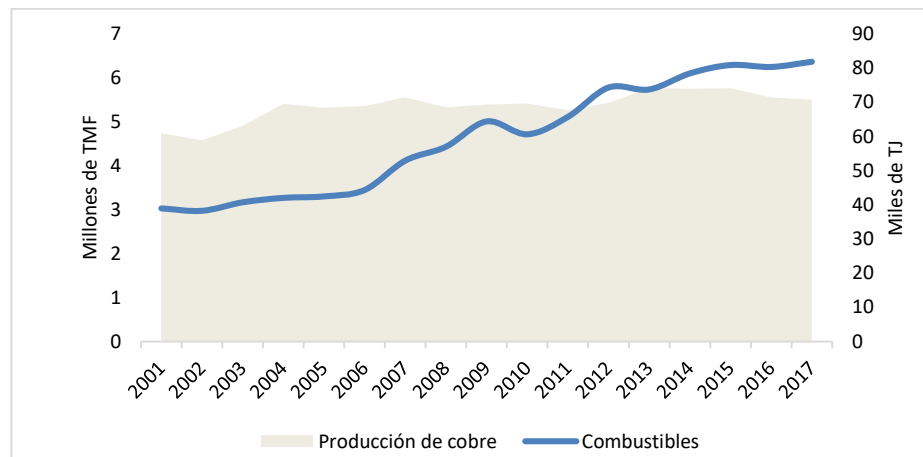
En esta sección se muestra información referente a la evolución interanual de energía en base a combustibles, el total de energía en combustibles por procesos y el consumo unitario de combustibles por cobre fino y por material procesado.

4.1 Consumo agregado

La Figura 11 presenta la evolución del consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre para el período 2001-2017. Durante el año 2017 alcanzó los 81.857 TJ, registrando así un aumento de 1.623 TJ, equivalente a una variación de 2% respecto al 2016.

El crecimiento sostenido en el consumo de combustibles obedece a una producción que en general tiende al alza junto a los cambios estructurales que enfrenta la minería del cobre ya mencionados. A saber, la caída en las leyes de mineral y el envejecimiento de las minas explotadas, situación que implica un mayor esfuerzo en materia energética para, al menos, sostener un volumen de producción.

Figura 11 Consumo de energía en base a combustibles de la minería del cobre, 2001 - 2017



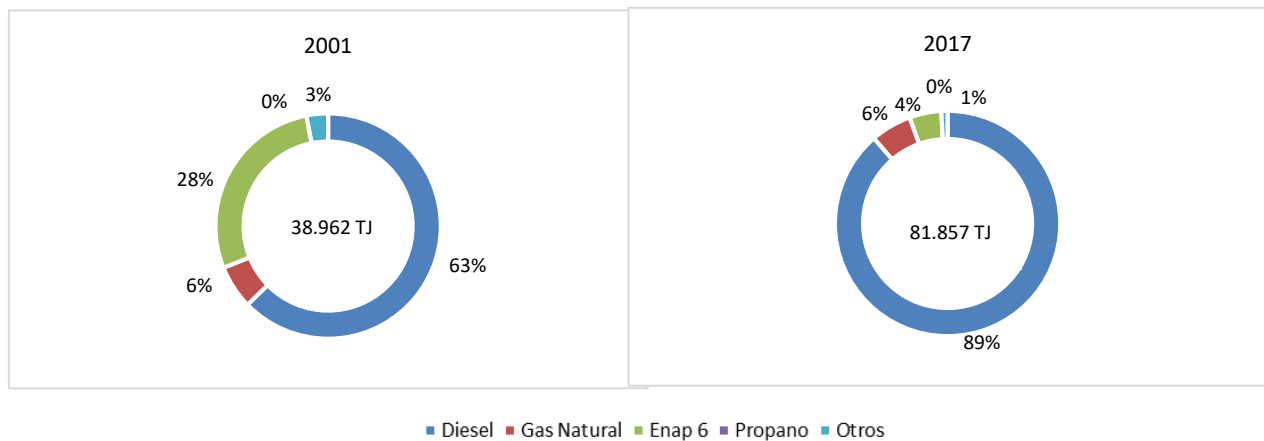
Fuente: Cochilco.

La Figura 12, presenta los cambios de la matriz de combustibles usados en la minería del cobre, y el mayor peso relativo que el diésel (89% del total durante 2017 versus un 63% en 2001) ha ganado conforme evolucionan las operaciones mineras. Esta tendencia hacia el uso de diésel incluso se ha dado en años recientes. En efecto, de los 1.623 TJ adicionales de 2017 con respecto a 2016, el diésel es responsable de 1.347 TJ, es decir, el 83% del incremento.

En paralelo, otros combustibles han ido perdiendo progresivamente su usabilidad, destacando el caso del gas natural. Dicho combustible en el año 2001 representaba un 28% de la cartera de combustibles consumidos, pero para el año 2017 sólo representó un 6% del total sectorial. Situación similar, aunque bastante menos drástica, se repite con el consumo de Enap 6. Este insumo, principalmente en los procesos de fundición y refinación, pasó de representar un 6% en 2001 a un 4% en 2017.

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 12 Participación de combustibles en el consumo total de combustibles, 2001 y 2017



Fuente: Cochilco.

4.2 Consumo por procesos

Como vimos en la Figura 5, el consumo de combustibles de mina rajo se incrementó desde un 55,6% del consumo agregado de combustibles en 2001 al 76,7% en 2017. Esto se debe principalmente a menores leyes del mineral, lo que supone una mayor cantidad de mineral transportado, y también al envejecimiento de los yacimientos, lo que implica incurrir en mayores distancia de acarreo del mineral.

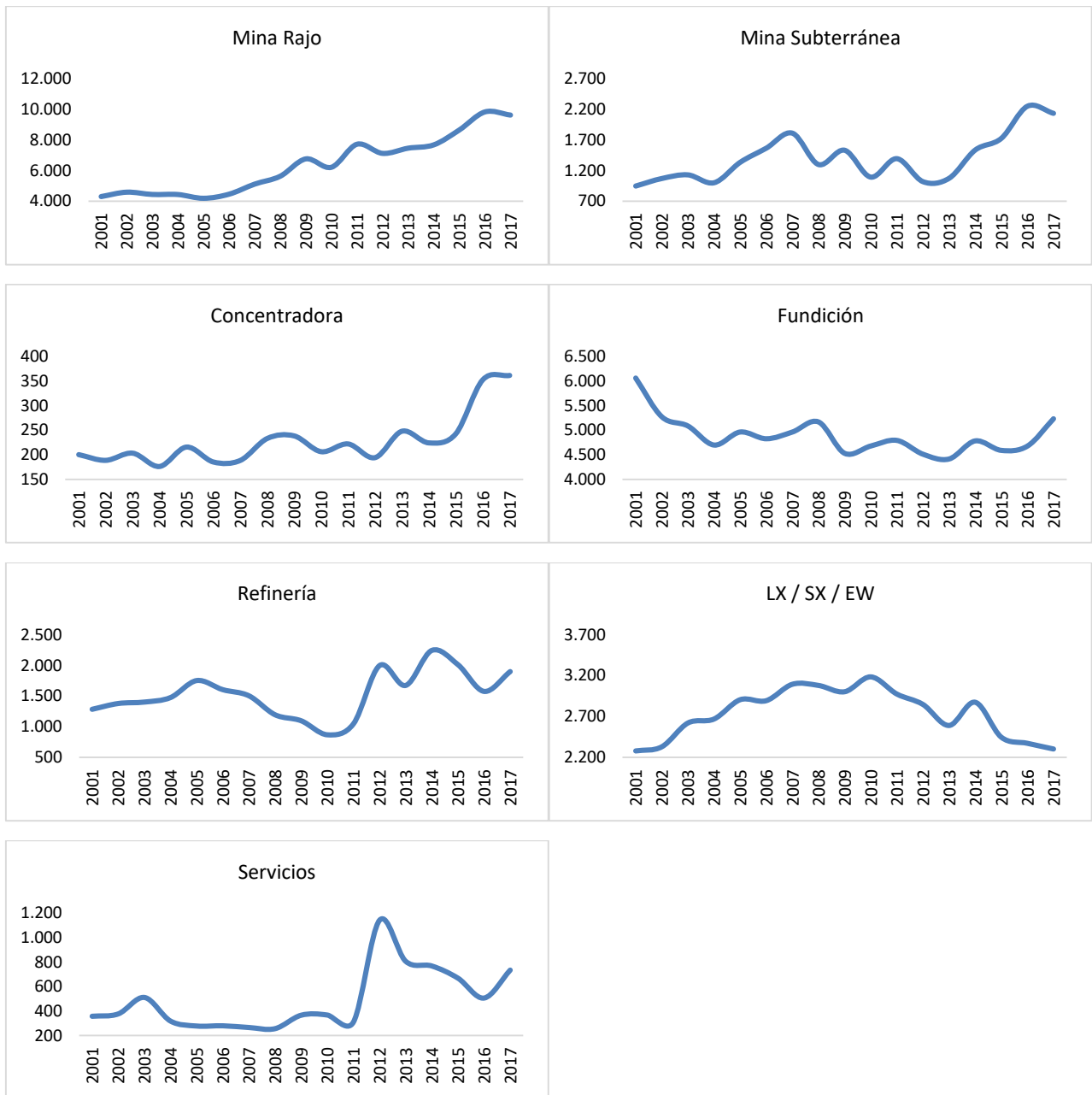
A su vez, el consumo de combustibles en Fundición, la segunda fuente más importante de demanda de combustibles, disminuyó del 23,6% del consumo agregado a un 8,9% en el mismo periodo. Esto se debe a que en términos absolutos la producción de fundición se ha mantenido relativamente estable en el tiempo mientras que la producción en otros procesos, como el mina rajo, se han incrementado en el tiempo.

Por otra parte, el consumo de combustibles en los demás procesos se ha mantenido con participaciones anuales inferiores al 5% en cada proceso.

4.3 Consumos unitarios

La Figura 13 ilustra los consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido. Se destacan los aumentos de los procesos de Fundición (11,8%), Refinería (20,4%) y Servicios (44,9%) durante 2017 en relación al 2016. Sin embargo, dado el menor uso de combustibles en estas fases del proceso respecto de la mina rajo, que decreció un 2%, su impacto agregado no resulta significativo. Precisamente este último proceso ha crecido en prácticamente todos los años, pasando de 4.308 MJ/TMF en 2001 a 9.620 en 2017 (+123%), evidenciando aún más el impacto de las disminuciones en las leyes de mineral y del aumento de distancias de acarreo de mineral previamente descrito.

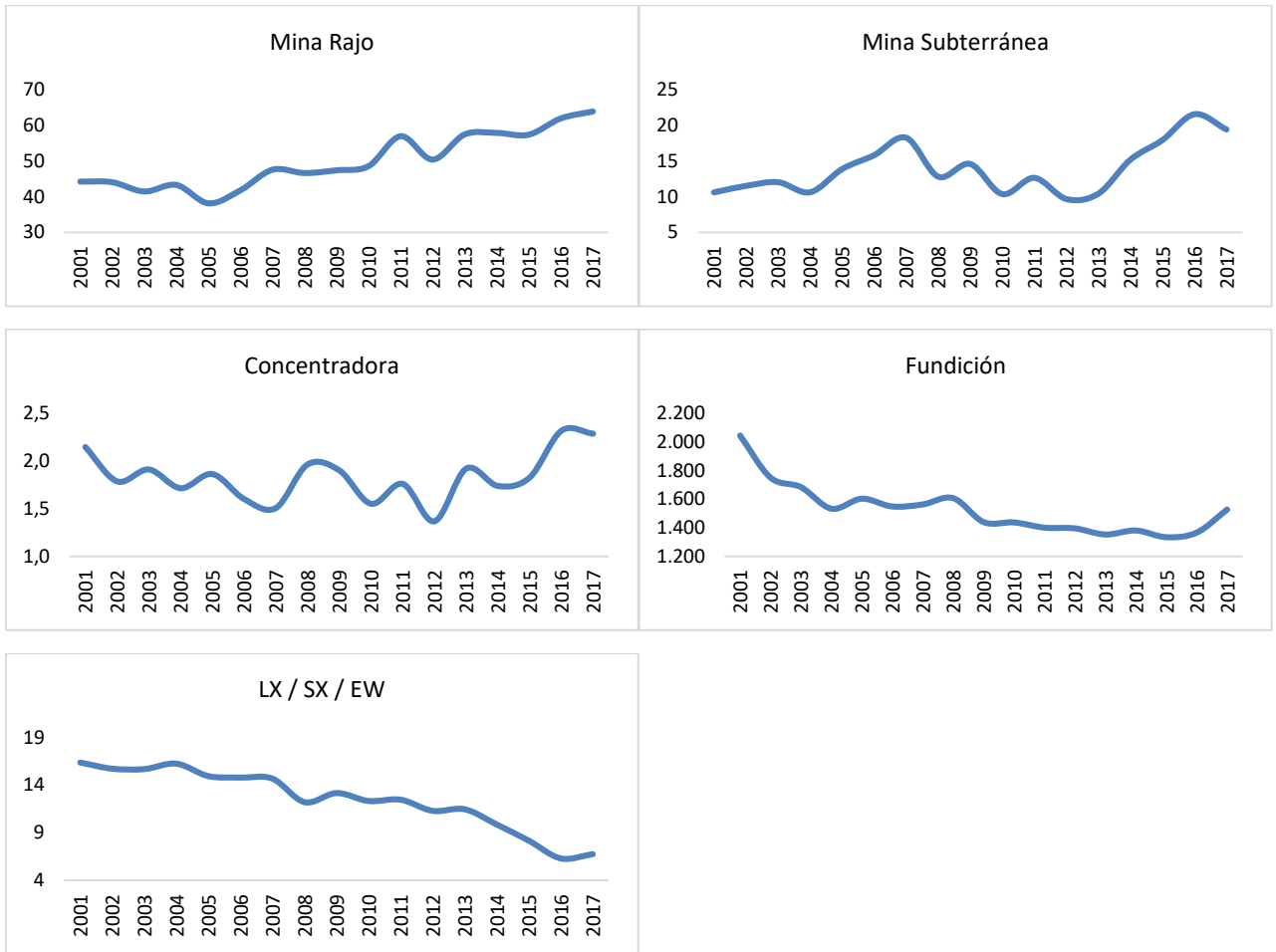
Figura 13 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF), 2001-2017



Fuente: Cochilco.

Por otra parte, la Figura 14 muestra la evolución de los consumos unitarios de combustibles por tonelada de mineral extraído o procesado, lo que implícitamente omite el impacto de las leyes del mineral. Este análisis es más prudente que la comparación previa por tonelada de cobre fino contenido, en tanto que toma en consideración el insumo primario de producción en cada proceso. Bajo este marco, vemos que el consumo unitario en mina rajo se incrementó un 3,1% en 2017 con respecto al 2016, acumulando un alza de 44% desde el 2001. Lo anterior refleja en parte las consecuencias de las mayores distancias de acarreo del mineral desde las faenas operativas hasta las plantas de procesamiento.

Figura 14 Consumos unitarios de combustibles por tonelada de mineral extraído/procesado (MJ/TM), 2001-2017



Fuente: Cochilco.

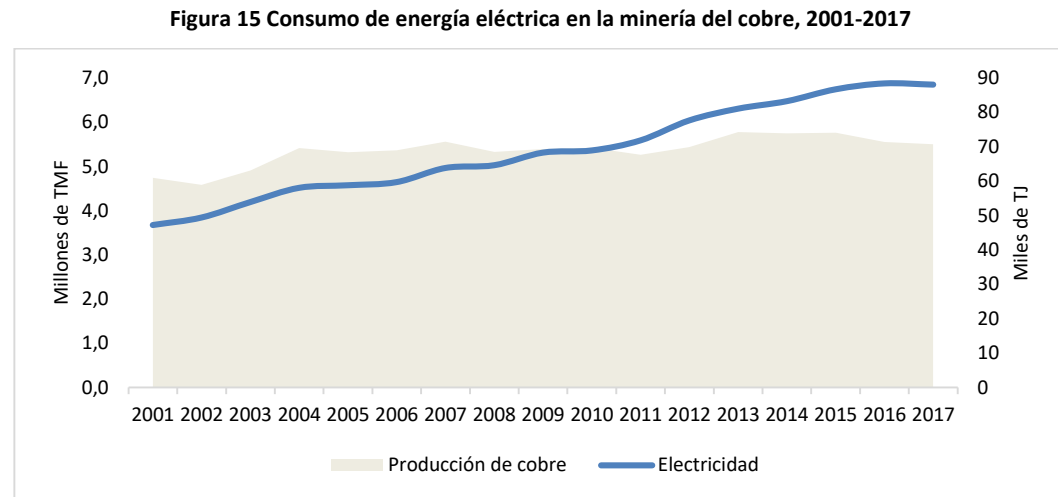


5. Consumo eléctrico

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 2017 la minería del cobre consumió un total de 88.066 TJ en energía eléctrica. Este consumo corresponde a una caída del 0,4% respecto de 2016. Ahora bien, como se advierte en la Figura 15, desde el año 2001 en general el consumo eléctrico ha aumentado progresivamente. 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.



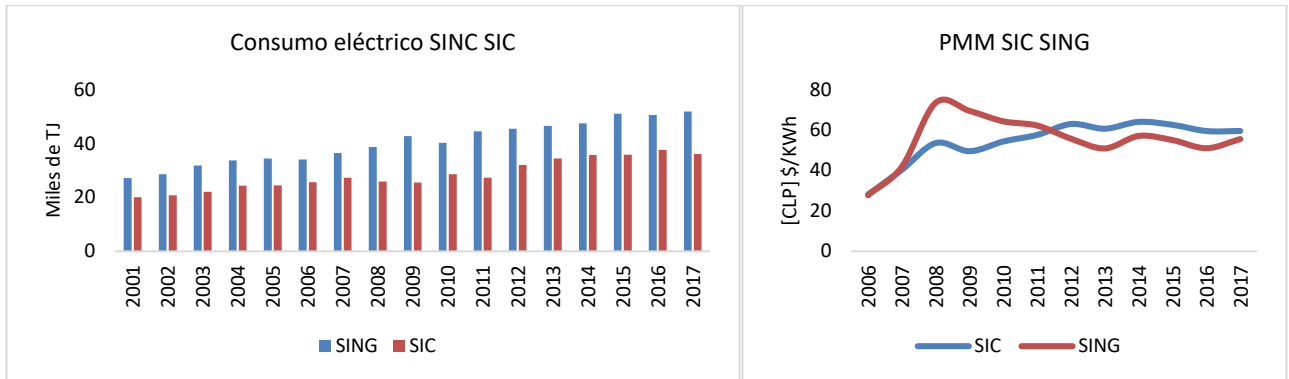
Fuente: Cochilco.

5.2. Consumos energía eléctrica por SIC y SING

En el 2017 comenzó a materializarse la integración de los sistemas energéticos del SIC y SING, a fin de crear un único gran sistema eléctrico para las zonas del norte y centro del país. Sin embargo, esta integración aún no estaba del todo realizada a diciembre de dicho año, lo que generó, entre otras cosas, que los Precios Medio de Mercado (PMM) entre ambos tendieran a acercarse pero aun manteniendo diferencias (véase Figura 16).

Así, vemos que el consumo eléctrico en el SING alcanzó cerca de 52 mil TJ al 2017, siendo un 43% superior al del SIC. Por el lado de los PMM del SIC y SING vemos que en general se han mantenido relativamente estables en los últimos años, lejos de los periodos de precios altos de diez años atrás, particularmente para el caso del SING.

Figura 116 Consumo de electricidad en la minería del cobre por SIC y SING 2001-2017, y PMM SIC y SING 2006-2017.

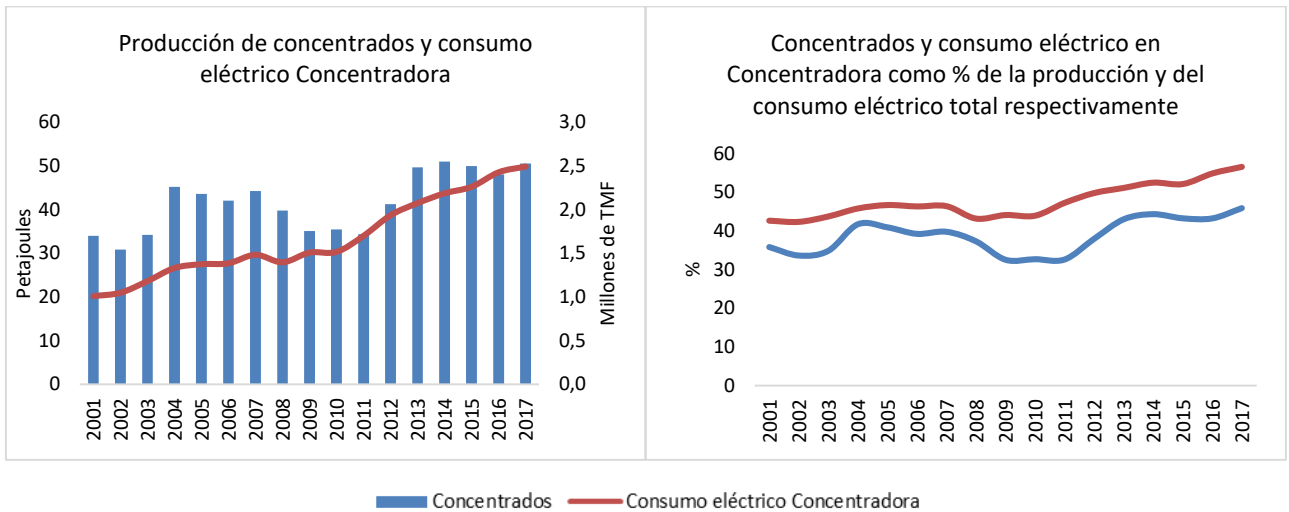


Fuente: Cochilco.

5.3. Consumo por procesos

Como se puede advertir de la Figura 17, la concentradora ha sido la principal fuerza demandante, pasando del 42,6% del total en 2001 al 56,6% en 2017. Esta situación se debe a la tendencia a la producción de concentrados, que a su vez pasaron del 35,8% de la producción cuprífera nacional al 45,9% durante el mismo periodo.

Figura 17 Producción de concentrados y consumo eléctrico en Concentradora en la minería del cobre, 2001 - 2017



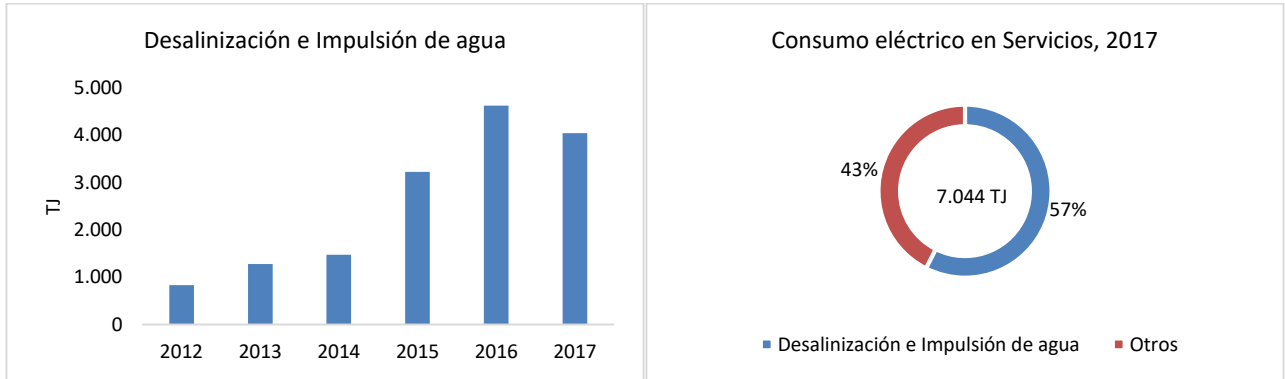
Fuente: Cochilco.

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, decreció en su participación desde el 31,0% al 22,4% entre el 2001 y el 2017.

Por último, dada la escasez de agua en el norte del país, un 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 18, si bien el 2017 se evidenció una caída con respecto al 2016 (-12%), el crecimiento del consumo de energía eléctrica para transporte y desalación de agua en la minería del cobre prácticamente se ha

quintuplicado en 6 años, desde 829 TJ en 2012 a 4.047 en 2017, lo que equivale al 43% del consumo eléctrico en Servicios y al 4,6% del consumo eléctrico total de la minería. El crecimiento reciente evidencia una solución ante la escasez hídrica 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.

Figura 18 Desalinización e impulsión de agua, 2012-2017

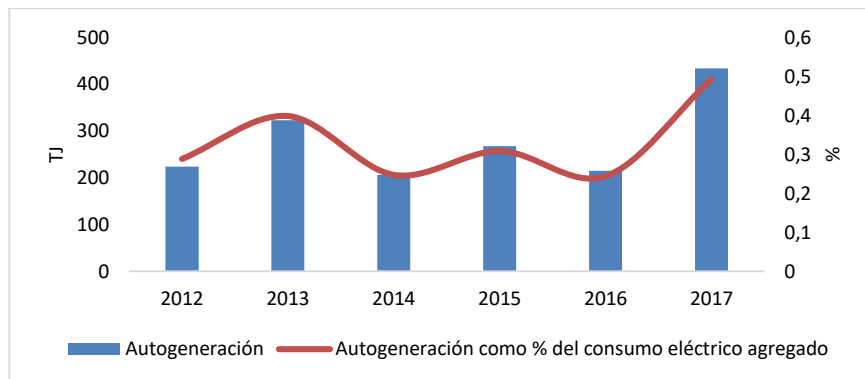


Fuente: Cochilco.

5.4. Autogeneración de energía

A raíz de una demanda energética creciente, algunas empresas han recurrido a su propia autogeneración, sea a través de sus propias plantas generadoras de energía eléctrica en base a diésel, mediante plantas de Energías Renovables No-Convencionales (ERNC) o bien a través del re-aprovechamiento energético en sus procesos productivos. Con todo, como se aprecia en la Figura 19, se estima que la autogeneración alcanzó en 2017 los 434 TJ, equivalentes al 0,5% del consumo energético total en la minería del cobre.

Figura 19 Autogeneración de energía eléctrica, 2012-2017



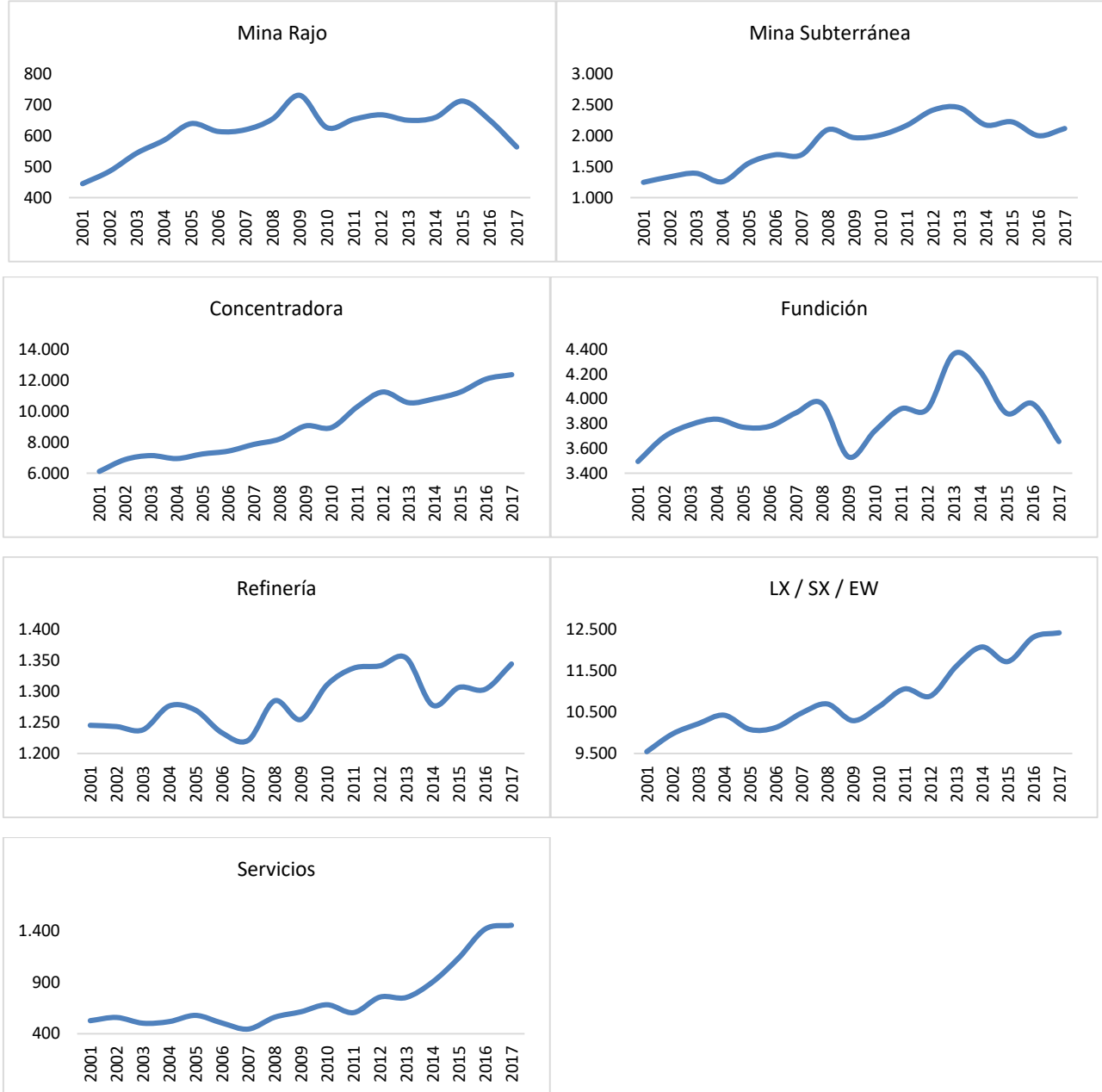
Fuente: Cochilco.



5.5. Consumos unitarios

La Figura 20 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 en 2016 volvió a crecer un 2,4% respecto del 2017, acumulando un aumento del 102,4% en el periodo 2001 – 2017. Otro proceso que ha experimentado alzas constantes en su consumo unitario ha sido el de LXSWEW, que creció un 0,9% en 2017 respecto de 2016, acumulando un alza de 30,3% desde el 2001.

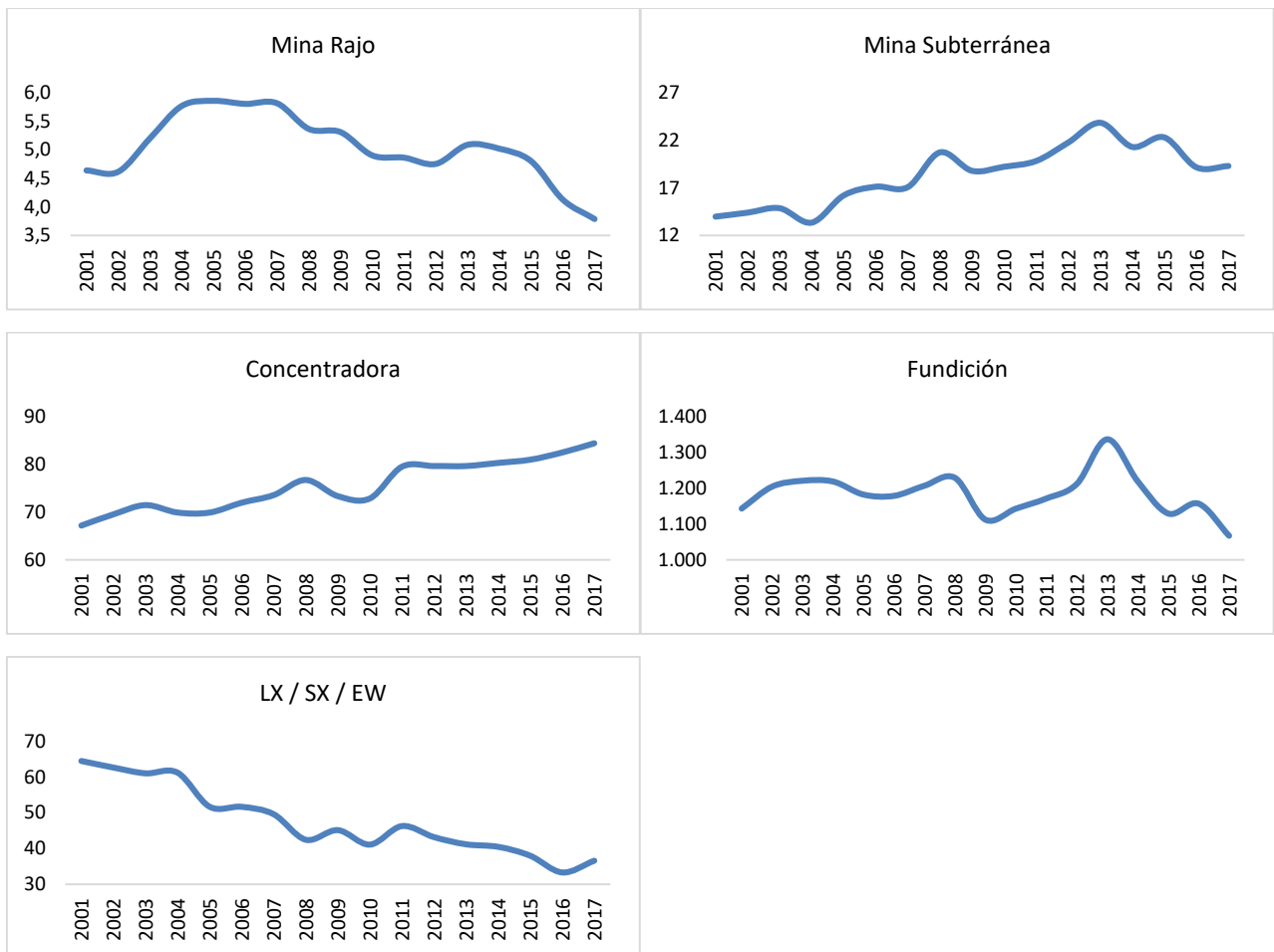
Figura 20 Consumo unitario de electricidad por tonelada de cobre fino contenido (MJ/TMF), 2001-2017



Fuente: Cochilco.

Por último, la Figura 21 ilustra el consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral extraído o procesado. De un modo similar al caso de los combustibles, esta comparación en base al mineral trabajado es más prudente, en tanto que toma en consideración el insumo primario de producción en cada proceso. De esta manera, vemos que el proceso de planta concentradora nuevamente destaca por incrementos en la mayoría de los años, aunque con mayor moderación que en su consumo unitario por cobre fino contenido. En el 2017 registró un incremento de 2,3% y del 2001 al 2017 acumula un alza de 25,7%. En paralelo, el consumo unitario del proceso de LXSXEW, si bien registró un aumento del 9,8% en 2017 en relación al 2016, en general ha caído 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.

Figura 21 Consumo unitario de electricidad por tonelada de mineral extraído/procesado (MJ/TM), 2001-2017



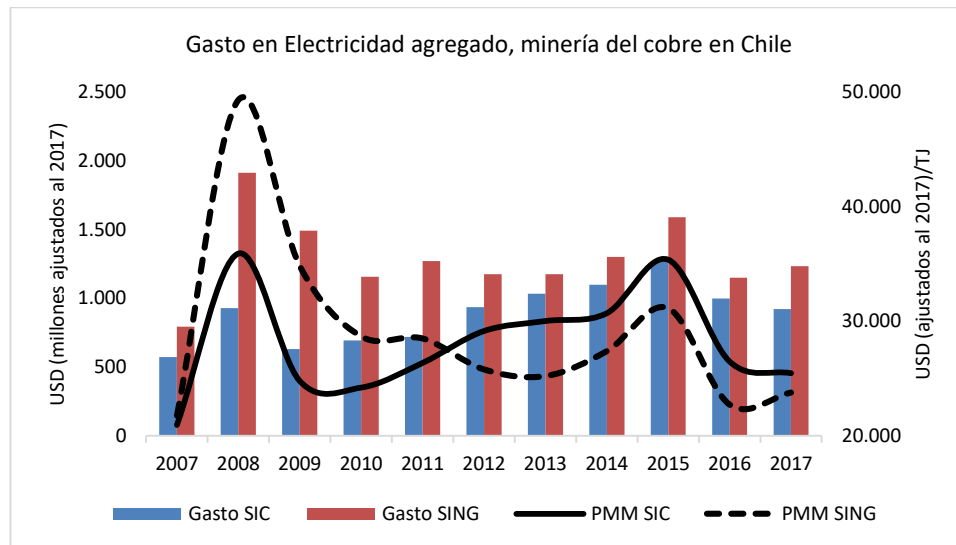
Fuente: Cochilco.

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) para los sistemas SIC y SING. 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 a fin de hacer comparables los valores en el tiempo.

De esta manera, al revisar el gasto en electricidad se advierte en primer lugar que el sistema SING representa al 2017 el 57% de los costos de electricidad de la minería del cobre. Lo anterior se debe a un mayor consumo en dicho sistema (43% mayor en 2017, como vimos en la sección 5.2), aun cuando enfrente menores precios (cerca de un 7% menores). Esta preponderancia en el gasto en SING sobre el SIC es habitual en la industria pero, como se aprecia en la Figura 22, solía ser mayor antes de 2011 dadas las variaciones relativas de los precios. Se ve, por ejemplo, que en el 2008 cuando el PMM del SING era superior al del SIC en más de un 30%, el gasto en SING era más de dos veces superior al del SIC.

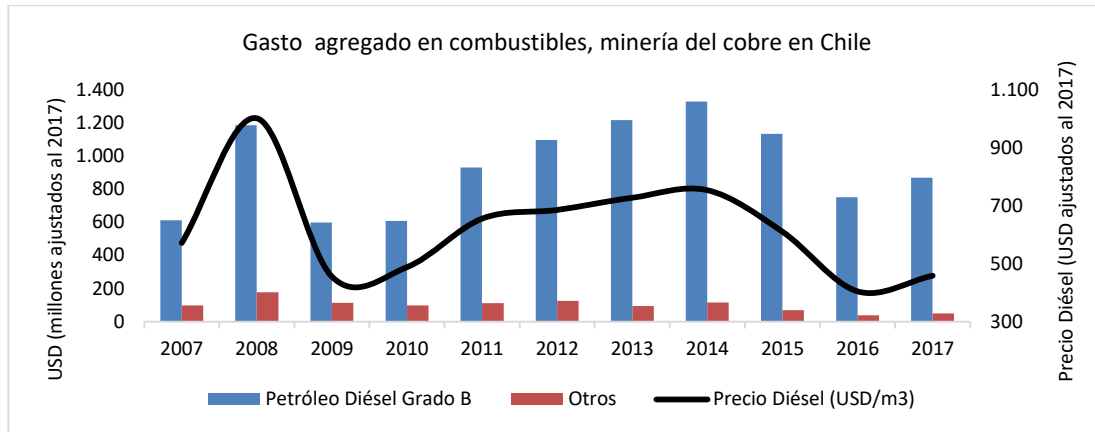
Figura 22 Gasto agregado en electricidad de la minería del cobre, 2007-2017



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

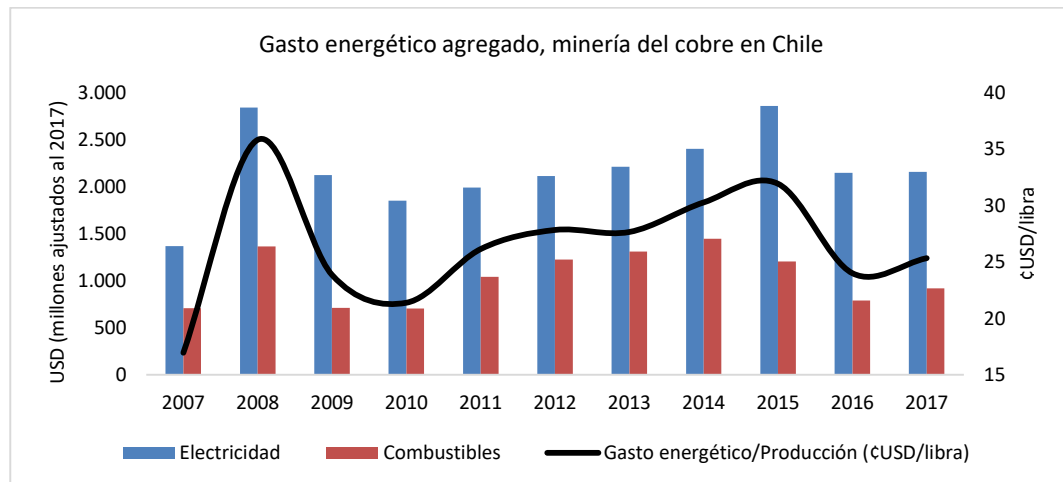
Por otra parte, en relación al gasto en combustibles, vemos de la Figura 23 que, en concordancia con un uso creciente del diésel en la minería cuprífera nacional, su gasto como proporción del consumo total de combustibles también ha aumentado, pasando de un 86% en 2006 a un 95% en 2017. Es decir, prácticamente 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 23 Gasto agregado en combustibles de la minería del cobre, 2007-2017

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 24 que el consumo eléctrico constituye la principal fuente de gasto con USD 2.155 millones frente a los USD 918 millones del costo asociado al consumo de combustibles durante el año 2017. Es decir, prácticamente 2,5 veces más. Al mismo tiempo, el gasto energético por libra de cobre producida llegó a las cUSD 25,3, un 21% menos en relación a los cUSD 31,9 de 2015, principalmente debido a la reducción de los costos de electricidad.

Figura 24 Gasto energético agregado de la minería del cobre, 2007-2017

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 \$7,28 millones, mientras que el gasto promedio por TJ en electricidad llegó a los \$15,89 millones. En suma, el consumo energético representa cerca del 11-12% 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 la escasez hídrica, 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, para 2018 está proyectada la integración total de los Sistemas Interconectados Central y del Norte Grande, lo que permitirá avanzar hacia una mayor seguridad en el abastecimiento.

Lo anterior configura un escenario favorable para que la autoridad fortalezca las políticas asociadas al uso de agua de mar como solución ante la falta del recurso en gran parte del norte del país. Una rápida, pero profunda discusión en esta materia entregaría a la industria del cobre en Chile una herramienta robusta para dar salida a conflictos con comunidades que tienen su origen en el agua. Al mismo tiempo, se puede aprovechar la integración de los sistemas SIC y SING para fomentar un uso aún mayor de ERNC, lo que permitiría disminuir los costos energéticos y reducir los niveles de contaminación asociados al uso de combustibles.

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 2017 de la EMPAE

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

Fuente: Cochilco.



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

Andrés González Eyzaguirre

Analista de Mercado Minero

Jorge Cantallopts Araya

Director de Estudios y Políticas Públicas

Junio / 2018

