

Yannick Deniau

Manuel Llano

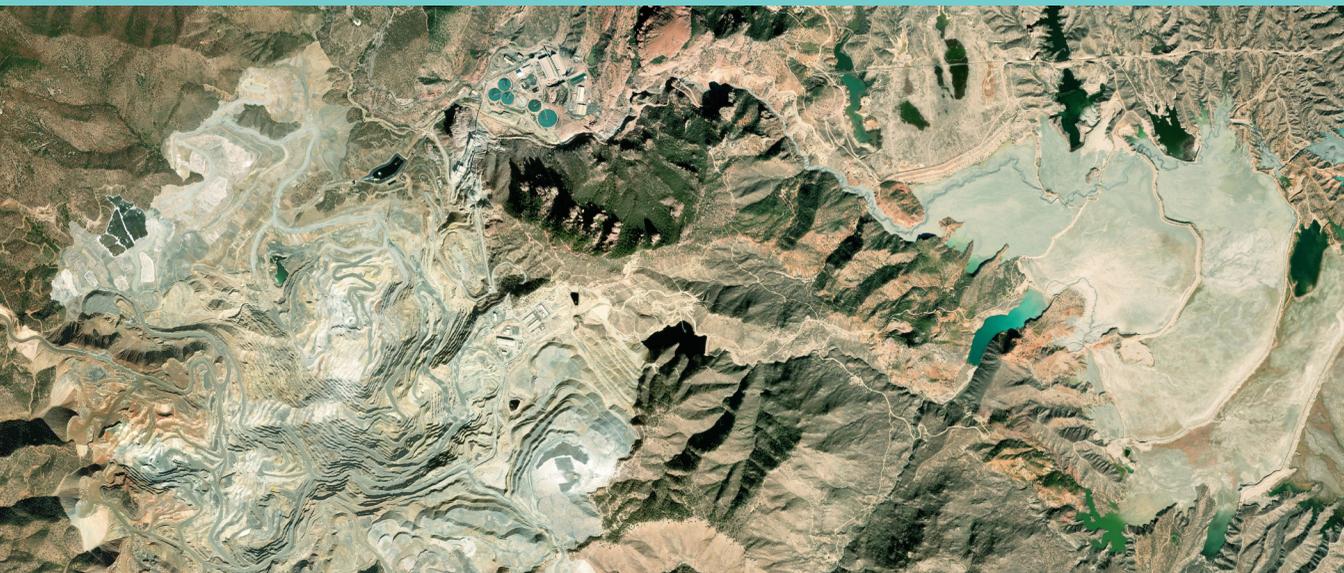
Luca Ferrari

Carla Flores Lot



El cobre como mineral estratégico y el papel de México:

implicaciones para los escenarios de transición energética



El cobre como mineral estratégico y el papel de México:

implicaciones para los escenarios de transición energética



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Yannick Deniau
Manuel Llano
Luca Ferrari
Carla Flores Lot

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)
Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC)
Plataforma Nacional Energía, Ambiente y Sociedad (Planeas)



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



PRONACES
ENERGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



PLANEAS
PLATAFORMA NACIONAL ENERGÍA, AMBIENTE Y SOCIEDAD



Corrección de estilo

Andrea González Márquez
Julio Montoya

Diseño editorial

Arlen Hernández • tallerhojarasca.com
contacto@tallerhojarasca.com



Fotografías

Can Pac Swire (p. 58)
Codelco (p. 4)
Devin Poolman (p. 75)
Esri (pp. 1, 27)
Hans (p. 5)
Jean Weller (p. 9)
Jimena L. Paz Navarro (p. 73)
Jonathan Zander (p. 7)
Roy (p. 10)
Steffen Thomä (p. 3)

Citar como: Deniau, Y., Llano, M., Ferrari, L. y Flores Lot, C. (2024). *El cobre como mineral estratégico y el papel de México: implicaciones para los escenarios de transición energética*. México: Pronace ECC-Conahcyt.

“Este cuaderno temático es producto de un proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024. Los contenidos y el diseño editorial es responsabilidad de las y los colaboradores. El Conahcyt, con el fin de ampliar el acceso a los resultados y productos de los proyectos apoyados, difunde este documento sin que ello represente una postura institucional.”

ISBN en trámite.

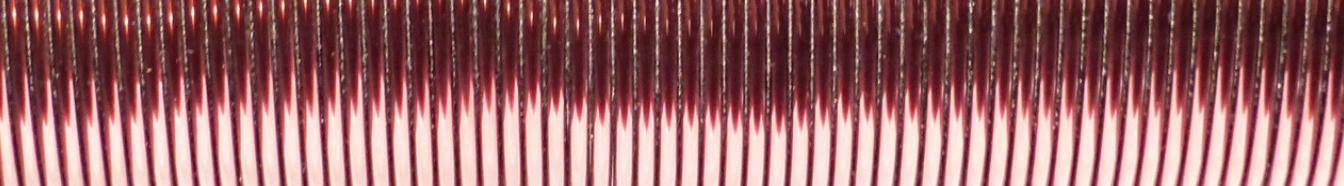
Noviembre de 2024.



Contenido

Introducción | **6**

- 1. El cobre: dónde se encuentra y cómo se obtiene | 9**
 - 1.1 Ocurrencias y tipo de yacimientos | 10**
 - 1.2 Explotación | 12**
 - 1.3 Contaminación asociada a la explotación de cobre | 13**
- 2. Mercado mundial del cobre | 14**
 - 2.1 Producción y refinación | 15**
 - 2.2 Evolución del precio | 18**
 - 2.3 Demanda por país | 19**
 - 2.4 Reservas mundiales y contexto geopolítico | 20**
 - 2.5 Reciclaje | 24**
 - 2.6 Disminución de la ley del mineral y su efecto sobre los costos energéticos y económicos de la extracción | 25**
- 3. Situación del cobre en México e impacto de la minería | 27**
 - 3.1 Minas de cobre: empresas, producción, valor y reservas | 28**
 - 3.2 Ocupación territorial | 35**
 - 3.3 Consumo de energía | 39**
 - 3.4 Consumo de agua | 43**
 - 3.5 Emisiones | 48**
 - 3.6 Impacto sobre la salud | 55**



4.	Estimaciones del uso de cobre a futuro	 58
4.1	Aumento previsto a nivel internacional	 59
4.2	Aumento previsto en México	 63
4.3	Estimación de los impactos en México	 67
5.	Conclusiones	 69

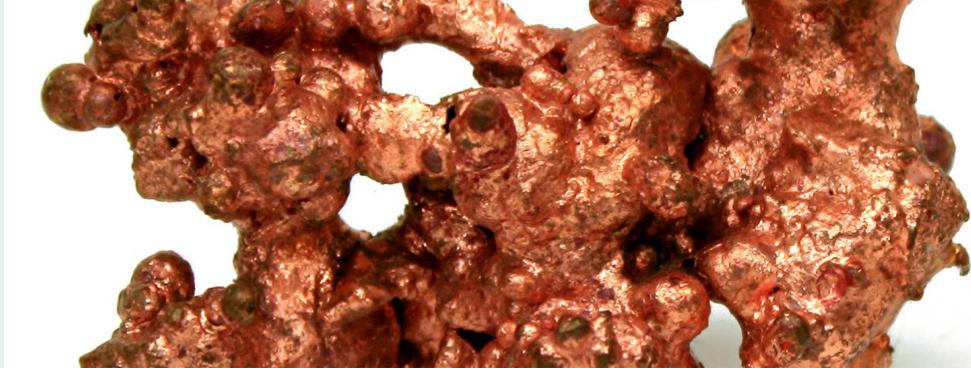
Listado de tablas | **72**

Listado de figuras | **73**

Referencias | **75**

Introducción





Introducción

Por sus propiedades, el cobre es uno de los metales que se han utilizado desde la antigüedad y ha sido uno de los materiales cruciales en el desarrollo de la civilización. Debido a su alta ductilidad, maleabilidad, longevidad, resistencia a la corrosión y su conductividad tanto térmica como eléctrica, el cobre es también un metal fundamental para la industria moderna, por lo que ocupa el tercer lugar después del hierro y el aluminio en cuanto a volumen consumido.

Los usos eléctricos del cobre —incluida la transmisión y generación de energía, el cableado de edificios, las telecomunicaciones y los productos eléctricos y electrónicos— representan alrededor de tres cuartas partes de su uso total. Su mercado más grande se relaciona con toda clase de equipo eléctrico y electrónico (32%), seguido por su uso en edificios (26%). Por otra parte, su demanda está creciendo de forma significativa, ya que es un mineral imprescindible en todas las tecnologías relacionadas con el proceso de *transición energética hegemónica*:¹ líneas de transmisión, vehículos eléctricos, baterías de almacenamiento y centrales solares, eólicas, geotérmicas e hidroeléctricas. El cobre es también un componente fundamental del internet y los servicios digitales que proporciona. Por su excelente conductividad eléctrica, no es posible que sea sustituido por otros metales en todas estas aplicaciones.

¹ La *transición energética hegemónica* se refiere a las supuestas soluciones propuestas por las élites del norte global —gobiernos y empresas— basadas en inversiones masivas en megaproyectos de energías “limpias” o renovables y de electrificación del sector transporte, que no cuestionan los patrones de consumo individualistas y desiguales.

Los escenarios de transición de tipo “emisiones netas cero” y “crecimiento verde” planteados por agencias internacionales y gobiernos occidentales como la Unión Europea estiman que el cobre es el mineral con mayor aumento de demanda prevista para 2050. La Agencia Internacional de Energía (*IEA*, por sus siglas en inglés) estima que la demanda mundial de cobre refinado crecerá de 26 millones de toneladas (Mt) por año en 2023 a 33 Mt en 2030 y 40 Mt en 2050 en el escenario de *net zero emissions (NZE)* o cero emisiones netas. Si bien es uno de los metales que más se recicla (~32%), la altísima demanda que se vislumbra implica que la mayor parte seguirá siendo proporcionado por la minería, lo que generará un incremento de la exploración y la apertura de nuevas minas. Para 2023 la Asociación Internacional de Cobre (*ICA*, por sus siglas en inglés) estima que hay 35 nuevos proyectos en fase de estudio de factibilidad a nivel mundial.

Por otro lado, conforme a una tendencia general en la industria minera, la concentración del metal va disminuyendo a medida que procede la explotación, debido a que los yacimientos con mejor ley —los que presentan una mayor densidad de un determinado elemento— se explotan primero. El crecimiento de la demanda y la disminución de la ley implican un uso creciente de energía, territorio y agua para la extracción y refinación del cobre. La minería de cobre no puede hacerse sin un uso intensivo de derivados del petróleo —en especial diésel—, por lo que el incremento de demanda y de la energía asociada a la extracción se traduce también en mayores emisiones. La minería de cobre se realiza en su gran mayoría a cielo abierto y, junto con los procesos de refinación, es una de las que mayor impacto tiene en cuanto a contaminación de metales pesados y partículas.

Entre los minerales estratégicos para la transición energética, el cobre es el más abundante en México. Por esta razón, en este reporte analizamos la evolución de la extracción de cobre a nivel internacional y nacional, su impacto socioambiental, las necesidades crecientes de energía, territorio y agua para su explotación, así como la forma en la que esto puede evolucionar frente al incremento de la demanda de este mineral estratégico.

1. El cobre: dónde se encuentra y cómo se obtiene





1. El cobre: dónde se encuentra y cómo se obtiene

1.1 Ocurrencias y tipo de yacimientos

Los yacimientos de cobre se forman por diferentes procesos geológicos asociados a ambientes magmáticos —arcos volcánicos— o sedimentarios. En el primer caso, tenemos los depósitos de pórfido de cobre y, en el segundo, los depósitos de cobre estratificados y alojados en los sedimentos. Si bien existen otros tipos de depósitos, estos dos representan la gran mayoría de la producción actual de cobre y el 85 % de los recursos identificados en el mundo (Hammarstrom *et al.*, 2021). En la tabla 1 se resumen las principales características.

Los depósitos de pórfido de cobre representan el 75 % de los recursos de cobre en el mundo. Consisten en minerales de cobre, por lo general calcopirita (CuFeS_2) o bornita (Cu_5FeS_4), en diseminaciones y vetas que se distribuyen a lo largo de grandes volúmenes de roca y que fueron depositados por fluidos de alta temperatura asociados con magma entrampado en la corteza superior (< 5 km) mientras se enfriaba. Estos depósitos suelen formarse en arcos magmáticos a lo largo de márgenes de placas convergentes —zona de subducción— (figura 1). Aunque los depósitos de pórfido de cobre pueden haberse formado a lo largo de toda la historia de la Tierra, la mayoría de los que se conocen son de edad mesozoica o cenozoica (John *et al.*, 2010). En su mayoría, los depósitos mexicanos son de este tipo, representan la continuación de la franja que recorre la cordillera norteamericana en Sonora y Sinaloa, son de edad cretácica o paleocena, y han sido expuestos por la tectónica extensional que ha provocado la apertura del golfo de California (Ferrari *et al.*, 2018).

TABLA 1. Características de los yacimientos de cobre

Características	Pórfidos de cobre	Depósitos estratificados
Entorno geológico	Arcos magmáticos a lo largo de márgenes de placas convergentes	Cuencas sedimentarias intracontinentales en zonas de fractura abortadas o <i>failed rifts</i>
Tonelaje	100 millones de toneladas métricas o más	100 millones de toneladas métricas o menos
Ley de cobre (concentración)	0.3 a 2 % de cobre	0.5 a 5 % de cobre
Subproductos	Molibdeno, oro y plata	Plata y cobalto
Forma del yacimiento	Tubular (cilíndrico)	Tabular
Dimensión del yacimiento	0.1 a 1 km de diámetro	Miles de metros de largo, anchos de 500 a 2000 m, espesores desde pocos metros hasta 50 m
Minerales más comunes	Calcopirita y bornita	Calcocita, bornita y calcopirita

Fuente: elaboración propia con información de Hammarstrom y colaboradores (2021).

Los depósitos de cobre estratificados alojados en sedimentos representan un 10% de los recursos identificados. Son cuerpos de minerales de cobre diseminados y alojados en vetillas menores en rocas sedimentarias o metasedimentarias (Hayes *et al.*, 2015). Los principales minerales de cobre en estos depósitos son la calcocita (Cu_2S) y la bornita (Cu_5FeS_4). Constituyen yacimientos lateralmente extensos —de varios kilómetros— y relativamente delgados —su ancho es menor a los 50 metros— que forman capas en rocas como arenisca, esquisto y dolomita en cuencas sedimentarias. Se han formado en cuencas sedimentarias que contenían agua salada —salmueras— la cual disolvía, transportaba y redepositaba cobre en ciertos horizontes favorables. Las cuencas sedimentarias de Europa y África central albergan los depósitos de cobre estratificados más grandes que se conocen.

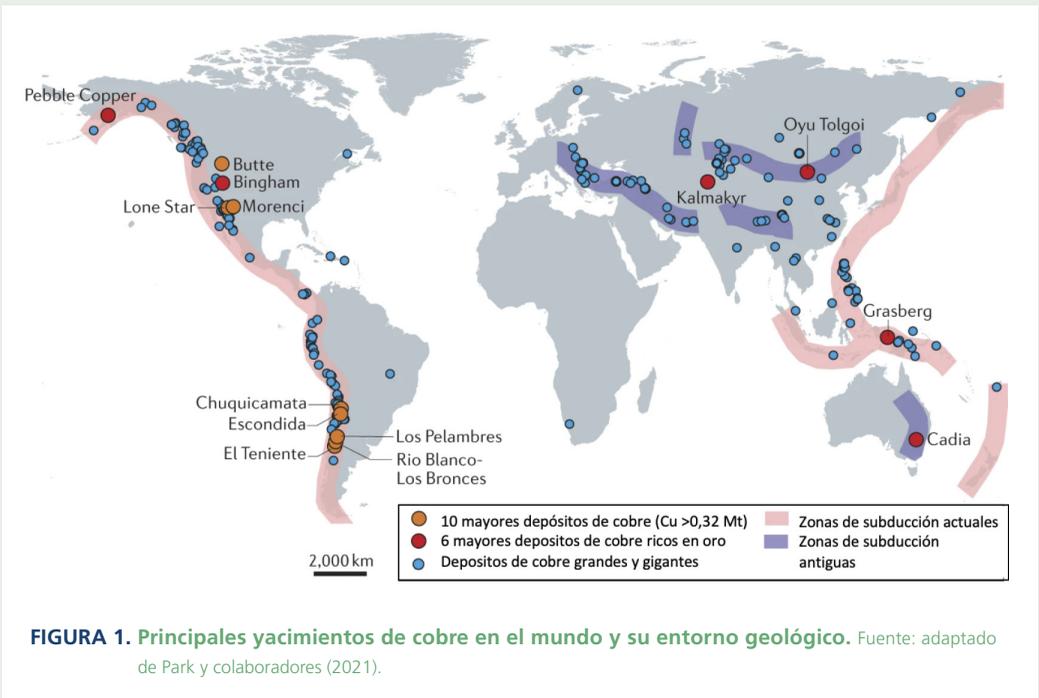


FIGURA 1. Principales yacimientos de cobre en el mundo y su entorno geológico. Fuente: adaptado de Park y colaboradores (2021).

1.2 Explotación

La gran mayoría de los depósitos de cobre se explota a cielo abierto. La minería subterránea sólo se utiliza cuando el mineral se encuentra lejos de la superficie; sin embargo, por los altos costos que ello implica, se recurre a este proceso en condiciones particulares. La excavación y el transporte de la mena mineral se hace mediante equipos mecánicos y camiones alimentados por diésel, con las consecuentes emisiones. El material rocoso se lleva a una planta de beneficio —por lo normal, cercana a la mina— para su refinación mediante procesos intensivos en energía que también requieren combustibles fósiles, además de agua.

El primer paso para la refinación del cobre es la clasificación y molienda del mineral. Después hay básicamente dos técnicas o procesos, dependiendo del tipo de mineral en que se encuentra el metal. La principal técnica, utilizada para la concentración de minerales sulfurados, es la flotación, seguida de fundición y

refinación mediante un proceso pirometalúrgico. En éste, los sulfuros se separan del material de ganga mediante flotación para formar un concentrado que contiene entre 25 y 35 % de cobre. De manera posterior, el concentrado de cobre se alimenta a una fundición, donde —junto con oxígeno y un reductor como el carbón coque— los sulfuros se oxidan y producen un “blíster” de entre 97 y 99 % de cobre metálico, el cual pasa a una purificación electrolítica para obtener cobre puro. En el caso de los minerales oxidados y algunos minerales sulfurados de baja calidad, se utiliza un proceso hidrometalúrgico que combina la lixiviación en pilas con la extracción por solventes y la electroobtención (SX-EW, por sus siglas en inglés) (Calvo *et al.*, 2016).

1.3 Contaminación asociada a la minería de cobre

Los subproductos de la minería y del procesamiento del cobre son sobre todo cenizas, escorias y polvos. Estos desechos son fuentes de metales pesados tóxicos, como plomo, cadmio, mercurio, arsénico y aluminio, además de partículas en suspensión (Izydorczyk *et al.*, 2021). Estos elementos tóxicos se pueden esparcir por diferentes vías. Los polvos de fundición se transmiten a largas distancias por el aire, mientras las presas de jales mal protegidos están sujetas a la erosión eólica y a la lixiviación del agua de lluvia. Los metales pesados y otras partículas en suspensión pueden ser transportados a grandes distancias, contaminando suelos y aguas superficiales o infiltrándose en los acuíferos del subsuelo. Los metales pesados son reconocidos como elementos bioacumulables que tienen un impacto negativo en el medioambiente y la salud humana (Shaheen *et al.*, 2016). La acumulación de elementos tóxicos en el suelo es una amenaza para la producción de alimentos, y se suma a la contaminación por agrotóxicos. Por su parte, los polvos metalúrgicos tienen importantes efectos en la salud humana y representan una amenaza para la biota.

2. Mercado mundial de cobre





2. Mercado mundial de cobre

2.1 Producción y refinación

Conforme a los datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS*, por sus siglas en inglés), la producción anual mundial estimada de cobre para 2023 fue de 22 (Mt), mientras que la de 2009 fue de un poco menos de 16 (Mt). Lo anterior representa un crecimiento del 38% en 14 años.

Sólo tres países concentraron el 46% de la producción mundial en 2023: Chile (22.7%), Perú (11.8%) y República Democrática del Congo (11.4%). Además, sólo 13 países representan el 86% de la producción mundial (tabla 2 y figura 2). Dentro de este ranking, México se encuentra en el décimo lugar con 3.4% de la producción mundial de 2023. Desde 2015, México se ha mantenido entre el 3 y el 4% de la producción mundial (figura 3).

TABLA 2. Producción de cobre por país en 2023

Posición	País	Producción en 2023 (miles de toneladas)	Porcentaje de la producción mundial en 2023
1	Chile	5,000	22.7 %
2	Perú	2,600	11.8 %
3	Congo	2,500	11.4 %
4	China	1,700	7.7 %
5	Estados Unidos	1,100	5.0 %
6	Rusia	910	4.1 %
7	Indonesia	840	3.8 %
8	Australia	810	3.7 %
9	Zambia	760	3.5 %
10	México	750	3.4 %
11	Kazajstán	600	2.7 %
12	Canadá	480	2.2 %
13	Polonia	400	1.8 %
14	Otros países	3,100	14.1 %
	Total	22,000	100.0 %

Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

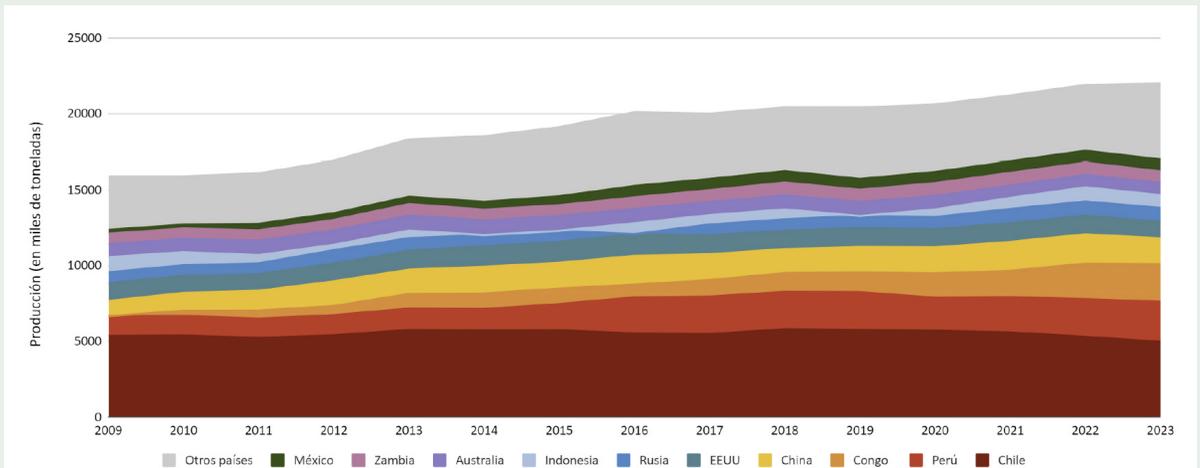


FIGURA 2. Producción de cobre por país de 2009 a 2023 en miles de toneladas. Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

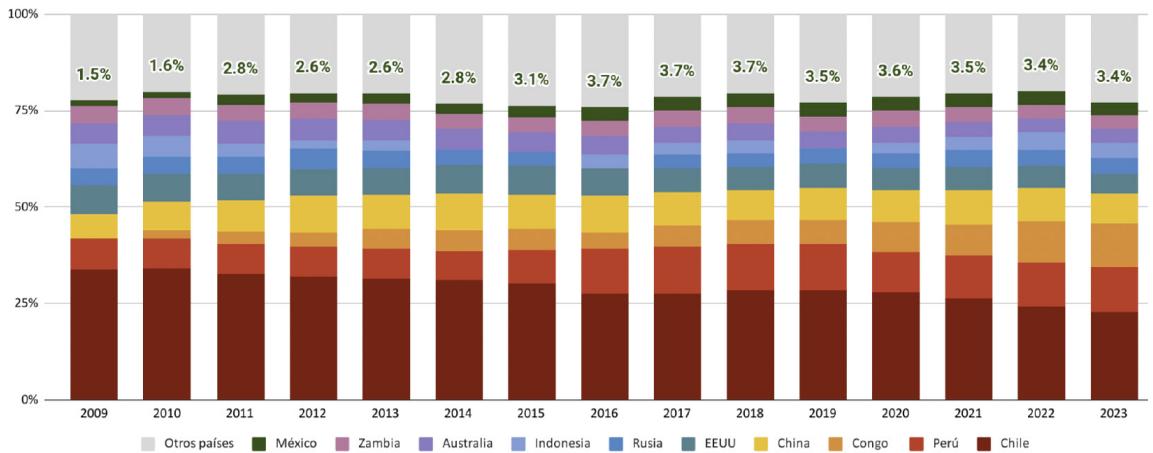


FIGURA 3. Porcentaje de la producción mundial de cobre por país de 2009 a 2023. Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

En lo que respecta a la refinación del cobre en la actualidad, China domina el mercado con el 45 %, después de un rápido crecimiento desde el 30 % en 2015 (IEA, 2024a). A pesar de que Chile es el mayor productor del mundo —abasteció una cuarta parte del suministro global en 2023—, produce sólo el 8% del cobre refinado del mundo, participación que ha disminuido desde 2015, cuando era del 12 %. De hecho, más de la mitad del concentrado de cobre extraído de Chile se exporta para refinación. Desde 2012, dichas exportaciones han aumentado un 60%, sobre todo a China, mientras que las exportaciones de cobre refinado han disminuido un 20%. Esta caída se debe en gran medida a la disminución de la producción de las minas que pueden procesar cobre directamente a partir de minerales de óxido mediante extracción electrolítica por solventes (*SX-EW*). Con la disminución del mineral de óxido, muchas minas pasaron a los procesos pirometalúrgicos de sulfuros y comenzaron a exportar concentrados para estos fines.

2.2 Evolución del precio

Debido a que el cobre es considerado como una materia prima fundamental para la economía global, su precio se determina en los mercados internacionales y éste varía según la oferta, la demanda y factores económicos globales. La figura 4 muestra los cambios en los precios del cobre de 1960 a 2022, expresados en dólares por tonelada métrica y ajustados por inflación. La gráfica visualiza las tendencias a largo plazo y su impacto potencial en la economía y la industria minera.

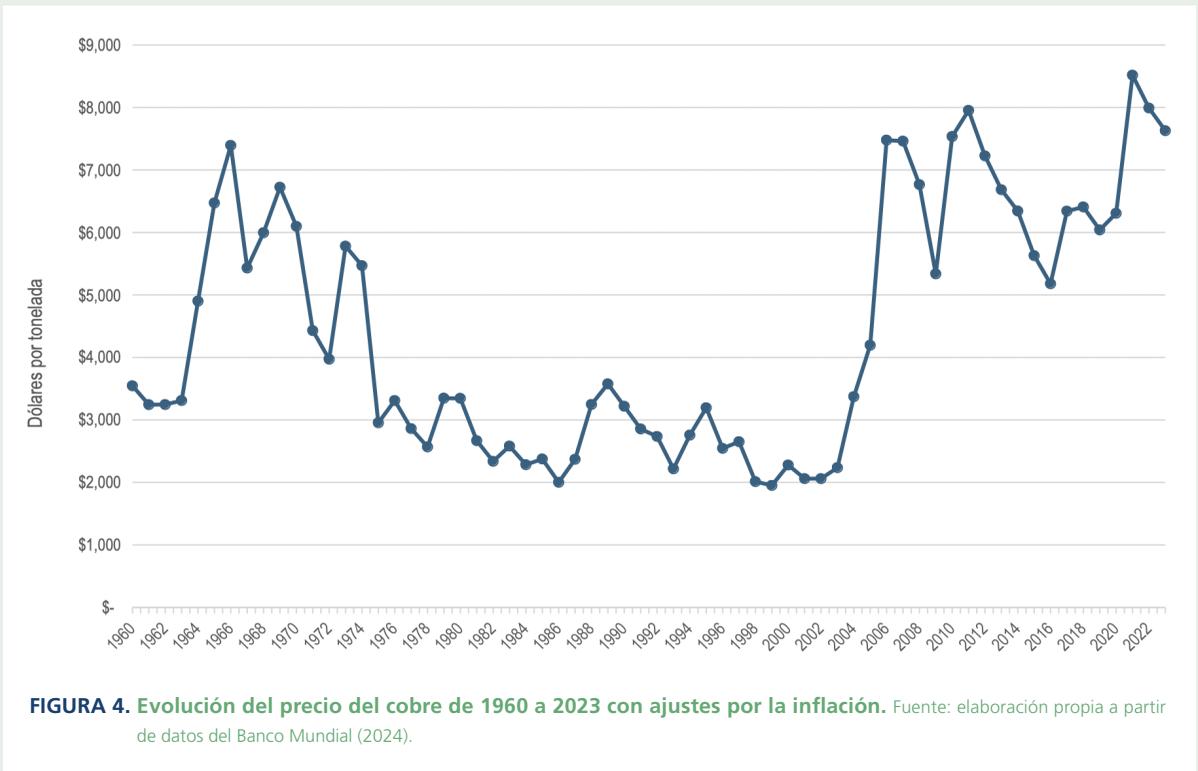


FIGURA 4. Evolución del precio del cobre de 1960 a 2023 con ajustes por la inflación. Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (2024).

En la figura 4, se observa un patrón cíclico con variaciones significativas a lo largo de las décadas. Entre 1964 y 1973, se aprecia un aumento considerable en el precio del cobre, el cual alcanza un pico en los años 1965-1970, a pesar de una ligera disminución en 1968, con un valor cercano a los 7 mil dólares por tonelada. Este incremento se debió sobre todo a la alta demanda global ocasionada por la industrialización y electrificación, así como a problemas en la oferta en países productores como Chile, Zambia y Perú, que experimentaron tensiones laborales y movimientos hacia la nacionalización de la industria del cobre. Estas disrupciones intermitentes afectaron la producción mundial de este mineral. Más tarde, entre 1980 y finales de la década de 1990, el precio muestra una tendencia a la baja y se mantiene por debajo de los 4 mil dólares, con una notable estabilidad.

A partir de 2005, el valor del cobre muestra una tendencia ascendente muy marcada. Esto se observa en los precios de todos los minerales y se relaciona con el súbito incremento del precio del petróleo, cuya producción convencional alcanza su máximo a partir de este año (Ferrari, 2020). Entre 2006 y 2008, el precio del cobre alcanzó un pico por encima de los 7 mil dólares, antes de la crisis financiera global, la cual provocó una fuerte caída en 2009. No obstante para 2011 el precio casi alcanzó los 8 mil dólares por tonelada, lo cual marcó uno de los máximos históricos.

En la última década, de 2015 en adelante, el precio del cobre ha mostrado cierta volatilidad, pero con una tendencia general al alza. Alcanzó un máximo en 2021, cuando superó los 8 mil 500 dólares por tonelada, debido a factores como la creciente demanda de cobre para tecnologías de energía renovable y la electromovilidad. Esto último sugiere un crecimiento sostenido de la demanda.

2.3 Demanda de cobre por país

En términos de demanda de cobre por país, China concentra más de la mitad de la demanda mundial (57%), aunque sólo representa el 7.7% de la producción mundial (figura 5). De forma similar, si bien China, Europa y Estados Unidos suman tres cuartos de la demanda mundial, representan menos del 15% de la producción.

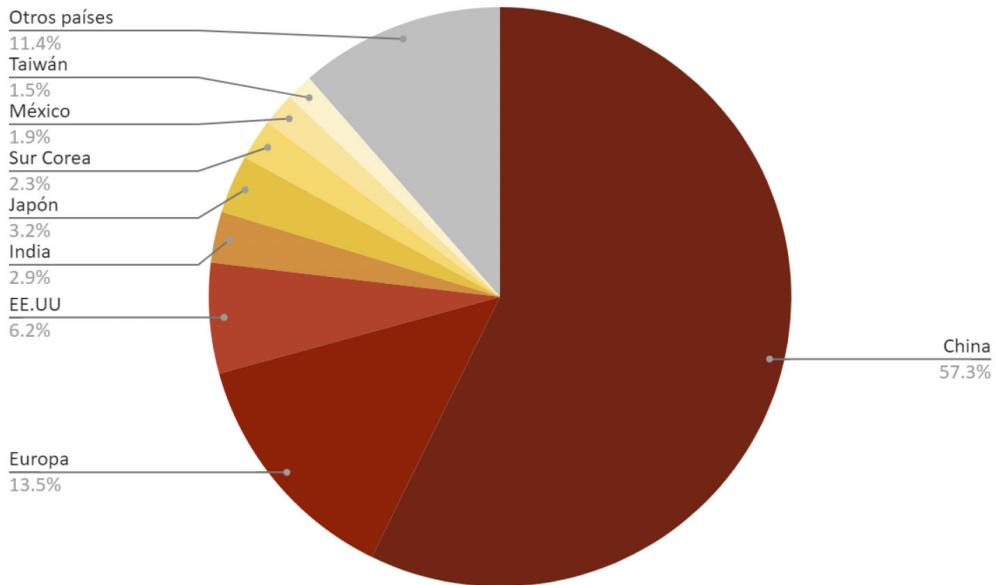


FIGURA 5. Demanda de cobre por país en 2023. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Cochilco (2024).

2.4 Reservas mundiales y contexto geopolítico

La disponibilidad futura de minerales se basa en el concepto de reservas y recursos. Las reservas son depósitos que se han descubierto y evaluado para determinar que su extracción es económicamente rentable de acuerdo a una metodología estándar. Los recursos son mucho mayores, ya que incluyen reservas, depósitos descubiertos que son rentables en potencia y depósitos no descubiertos que se predicen en función de estudios geológicos preliminares.

En términos de reservas de cobre, según los datos del *USGS* para 2022, México se encuentra en el sexto lugar a nivel mundial con 53 millones de toneladas, lo que representa el 5.3 % de las reservas mundiales. Sólo cuatro países —Chile, Perú, Australia y Congo— concentran la mitad de las reservas actuales a nivel mundial (tabla 3).

TABLA 3. Reservas de cobre por país en 2022 en miles de toneladas

Posición	País	Reservas en 2022 (miles de toneladas)	Porcentaje de reservas mundiales en 2022
1	Chile	190,000	19 %
2	Perú	120,000	12 %
3	Australia	100,000	10 %
4	República Democrática del Congo	80,000	8 %
5	Rusia	80,000	8 %
6	México	53,000	5.3 %
7	Estados Unidos	50,000	5 %
8	China	41,000	4.1 %
9	Polonia	34,000	3.4 %
10	Indonesia	24,000	2.4 %
11	Zambia	21,000	2.1 %
12	Kazajstán	20,000	2 %
13	Canadá	7,600	0.76 %
14	Otros países	180,000	18 %
	Total mundial	1,000,000	100 %

Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

Las reservas pueden incrementar con nuevos descubrimientos o con la reclasificación de yacimientos existentes. De 2009 a 2022, las reservas estimadas a nivel mundial han pasado de 630 millones de toneladas a mil millones de toneladas, con una tasa de crecimiento del 58.7% (figura 6). Las reservas en México pasaron de 38 a 53 millones de toneladas, con una tasa de crecimiento del 39.5%, la cual resulta ser inferior al promedio mundial pero superior a las de los países con mayores reservas: Chile (28.7%), Perú (33.3%) y Australia (25%).

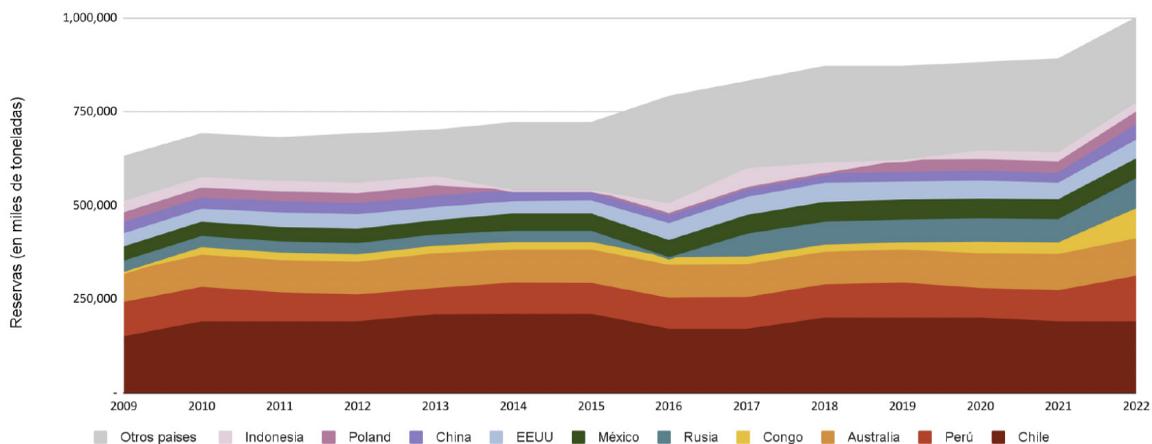


FIGURA 6. Reservas de cobre por país de 2009 a 2022 en miles de toneladas. Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

De 2009 a 2022, la participación de México en las reservas mundiales de cobre ha oscilado entre el 5 y 6% (figura 7).

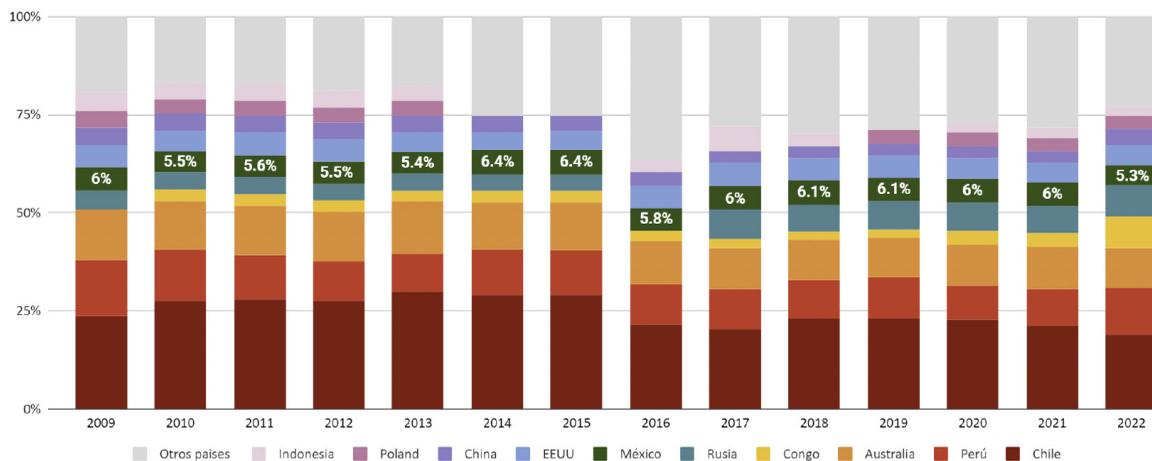


FIGURA 7. Reservas de cobre por país de 2009 a 2022 en porcentaje de las reservas totales. Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2024).

La figura 8 muestra la distribución geográfica de las reservas y la producción en 2019. Las reservas de Estados Unidos y Australia representan cerca del 16%, y las de Rusia, Kazajstán y China el 12.3%. Por su parte, Chile, Perú y México en conjunto cuentan con más de un tercio del total mundial de las reservas. China ya importa gran parte de la producción de cobre de estos tres países. En la competencia creciente entre Occidente y la dupla conformada por China y Rusia en torno a los recursos energéticos y minerales remanentes en el planeta, es de esperarse que Estados Unidos ejerza cada vez más presión para concentrar la producción de cobre de América Latina.

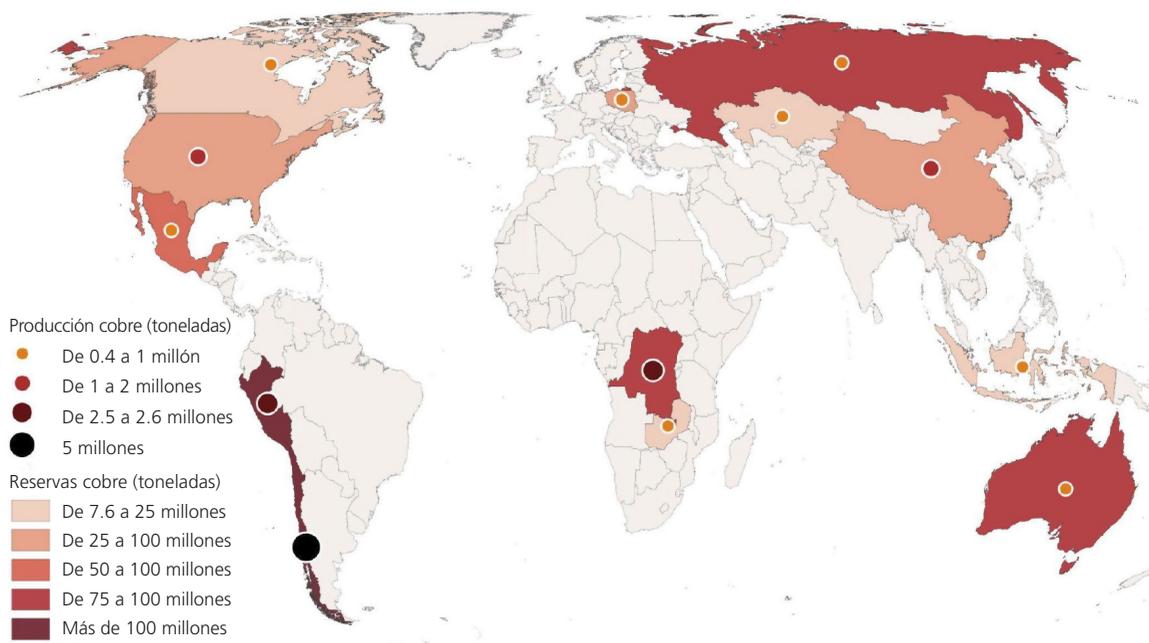


FIGURA 8. Mapa de los principales países con producción y reservas de cobre en 2022. Fuente: elaboración propia a partir de USGS (2022).

2.5 Reciclaje

El cobre es uno de los pocos materiales que no se degradan ni pierden sus propiedades químicas o físicas en el proceso de reciclaje, lo que permite mayores tasas de recuperación respecto a otros metales. El *International Copper Study Group (ICSG, 2024)* estima que en 2023 el 32% del consumo mundial de cobre procede de cobre reciclado (figura 9). Esta cantidad es la suma de los desechos que proceden de: a) la minería (3,690 kilotoneladas [kt]); b) la fundición y refinación (4,380 kt); c) la fabricación de productos (4,390 kt); y d) los productos al término de su vida útil (5,150 kt). Como se puede observar, la mayor parte del reciclaje procede de las diferentes fases de la producción, frente a una menor proporción que corresponde a los productos al final de su vida útil.

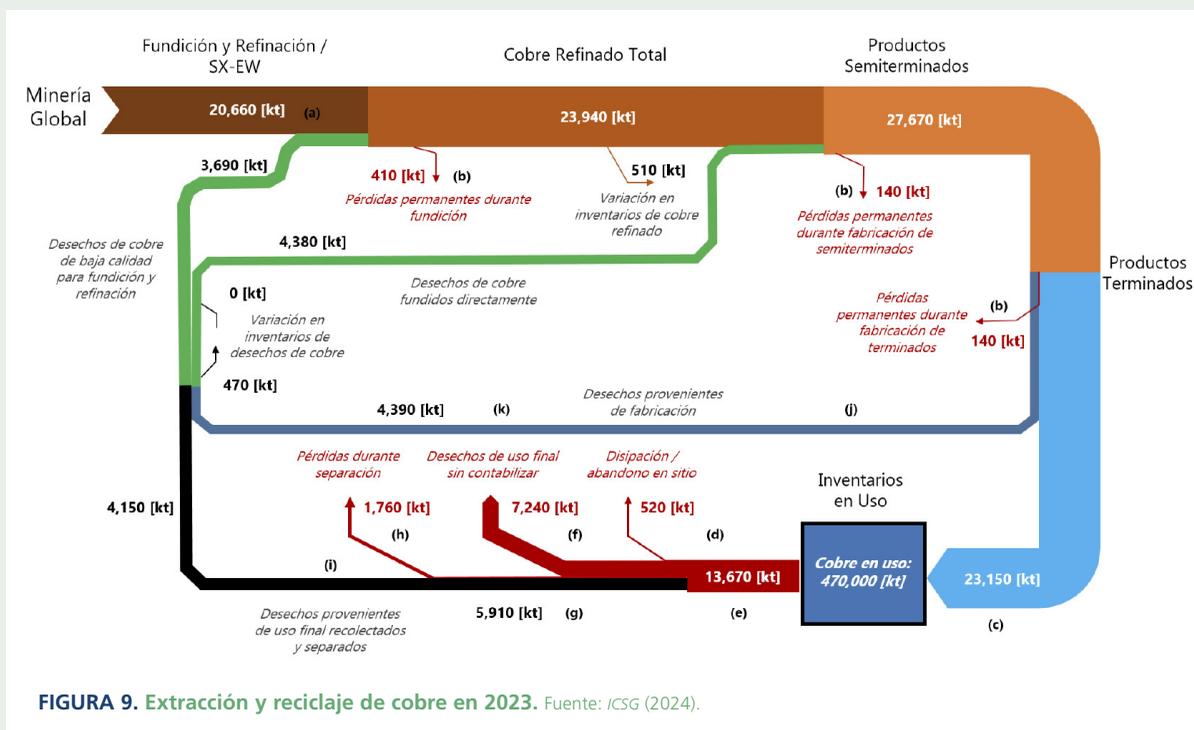


FIGURA 9. Extracción y reciclaje de cobre en 2023. Fuente: ICSG (2024).

Si se gestiona de manera adecuada, el reciclaje tiene el potencial de ampliar el uso de los recursos, eliminar residuos, así como de disminuir el uso de energía y de algunas emisiones. Sin embargo, el cobre reciclado es demasiado poco para satisfacer la demanda creciente de este metal, por lo que sólo podría aminorar la expansión de su minería a nivel mundial.

2.6 Disminución de la ley del mineral y su efecto sobre los costos energéticos y económicos de la extracción

Al igual que para todos los recursos no renovables, la extracción del cobre tiene rendimientos decrecientes en el tiempo, ya que se explotan primero los yacimientos de mejor ley o concentración, los más cercanos a la superficie y los más próximos tanto a las vías de comunicación como al abastecimiento de energía. El rubro más importante en cuanto al consumo de energía es la disminución de la ley, ya que con el tiempo se debe separar más mineral de ganga del mineral de mena para producir la misma cantidad de concentrado. Si bien la innovación y mejoras en las tecnologías extractivas pueden contrarrestar parcialmente este proceso y prolongar incluso la vida de las minas más antiguas, esto no compensa el efecto de la disminución de la ley. En el caso de Australia, se observa una tendencia constante a la disminución de la ley desde el siglo antepasado, lo que provoca un incremento creciente del consumo de energía (Mudd, 2009). A nivel global, para 1990 la ley promedio del mineral de cobre en la mina era de 1.67 %, aunque para las mayores minas —responsables del 32 % de la producción— era del 1.48 % (Cox y Singer, 2002). Dos décadas más tarde, el promedio mundial de leyes de mineral de cobre era de alrededor de 0.62 % (Mudd y Weng, 2012), y un estudio global mostraba que aunque entre 2003 y 2013 el cobre producido había incrementado en un 30 %, el consumo total de energía de las actividades mineras para extracción y procesado había subido un 46 % (Calvo *et al.*, 2016).

En la literatura no existen datos globales más recientes. Sin embargo, la tendencia a la disminución de la ley se observa con claridad para las minas de Chile, el primer productor mundial. La figura 10 muestra cómo la ley ha disminuido de forma constante para las minas de la principal empresa de este país y la mayor a nivel internacional, la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco). Como se observa, la ley promedio se ha reducido a casi la mitad entre 1993 y 2022.

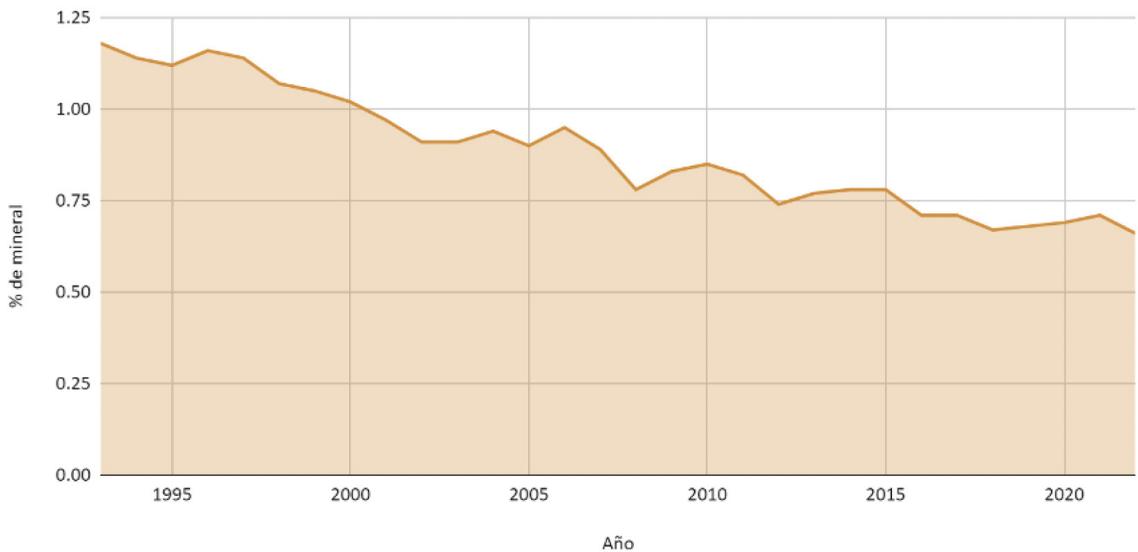
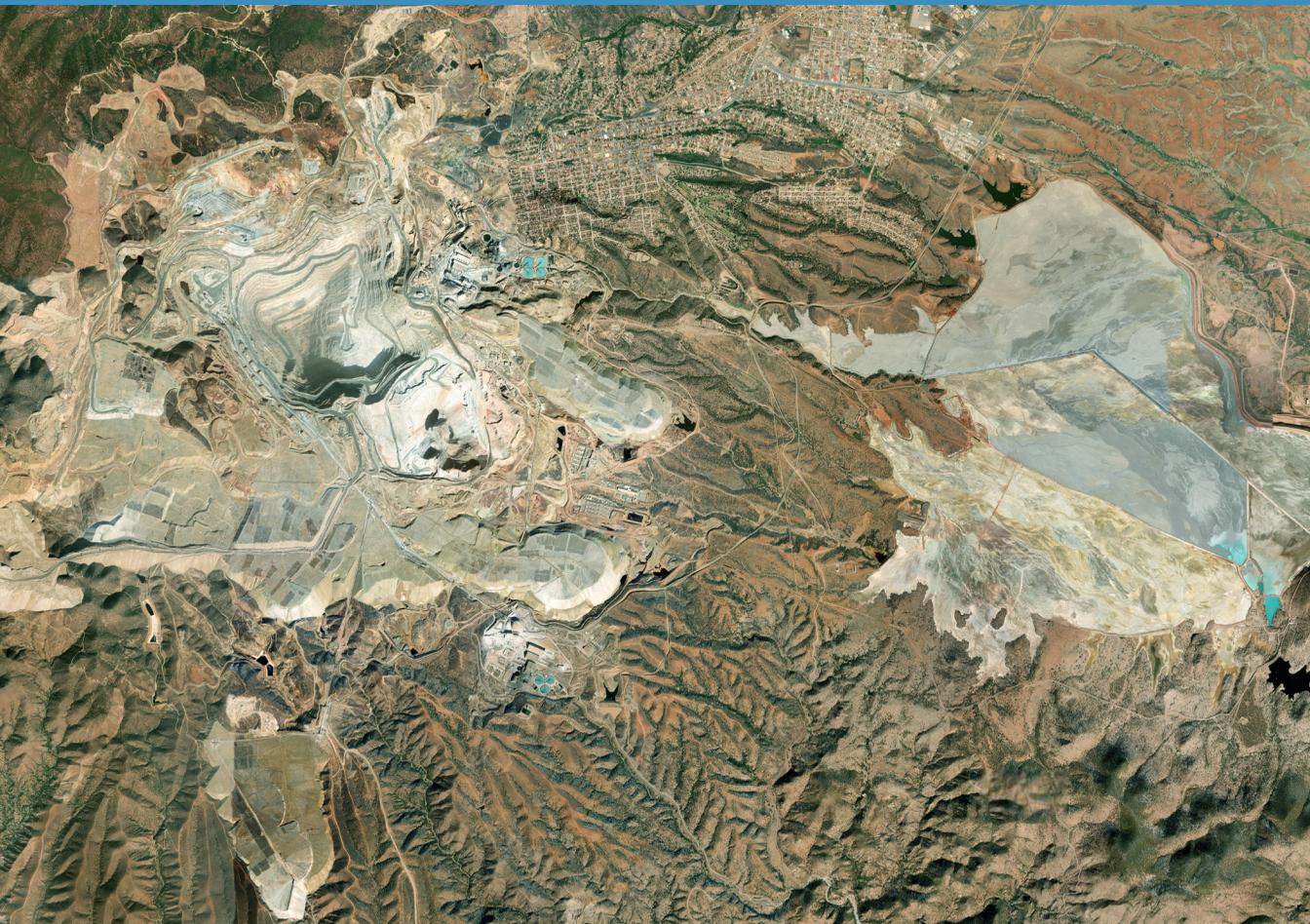


FIGURA 10. Disminución de la ley de cobre de la Corporación Nacional del Cobre de Chile de 1993 a 2022.

Fuente: Codelco-Cochilco (2024).

En México los informes más recientes de las minas del Grupo México indican valores más bajos: 0.78% para Pilares, 0.52% para Buenavista del Cobre, 0.4% para El Arco y 0.29% para Caridad. En el caso de la mina Buenavista del Cobre, responsable de más de la mitad de la producción nacional, la ley promedio ha disminuido de 0.537 en 2018 a 0.527 en 2021.

3. Situación del cobre en México e impacto de la minería





3. Situación del cobre en México e impacto de la minería

3.1 Minas de cobre: empresas, producción, valor y reservas

Los datos de producción por mina de cobre en México se recabaron a partir de distintas fuentes. Por un lado, se consideran los informes anuales de la Cámara Minera de México (Camimex)² sobre la producción de cobre por unidad minera, los cuales se basan en la información pública de las propias empresas. Sin embargo, en ellos sólo se menciona la producción de las 15 o 20 minas principales en el país por año, de manera inconsistente. En el caso de las minas de menor producción, se revisaron los datos de los informes anuales de las empresas, así como los publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). La información de Inegi está agrupada por municipio, por lo que fue necesario revisar las minas existentes en cada municipio para asignar a cada una el volumen de producción estimado. Cuando en un municipio sólo existía una mina metálica, se le asignó a ésta la totalidad de la producción municipal reportada por el Inegi. En municipios con dos o más minas metálicas, se revisó la información disponible sobre ellas —por parte de Camimex o de informes de las empresas— para estimar el rango aproximado de producción anual de cada una, y se distribuyó de forma proporcional la producción reportada por el Inegi para el municipio. En total, se georeferenciaron 34 minas que han registrado producción de cobre entre 2010 y 2023.

² Los informes se pueden consultar en el siguiente enlace: <https://www.camimex.org.mx/index.php/publicaciones/informe-anual>

La producción anual de cobre en México, según datos del Inegi, pasó de 270,136 toneladas en 2010 a 699,118 toneladas en 2023 (figura 11). La producción nacional se ha triplicado entre 2010 y 2016, para posteriormente estabilizarse en alrededor de 750 mil toneladas, sin aumentos significativos en los últimos años.

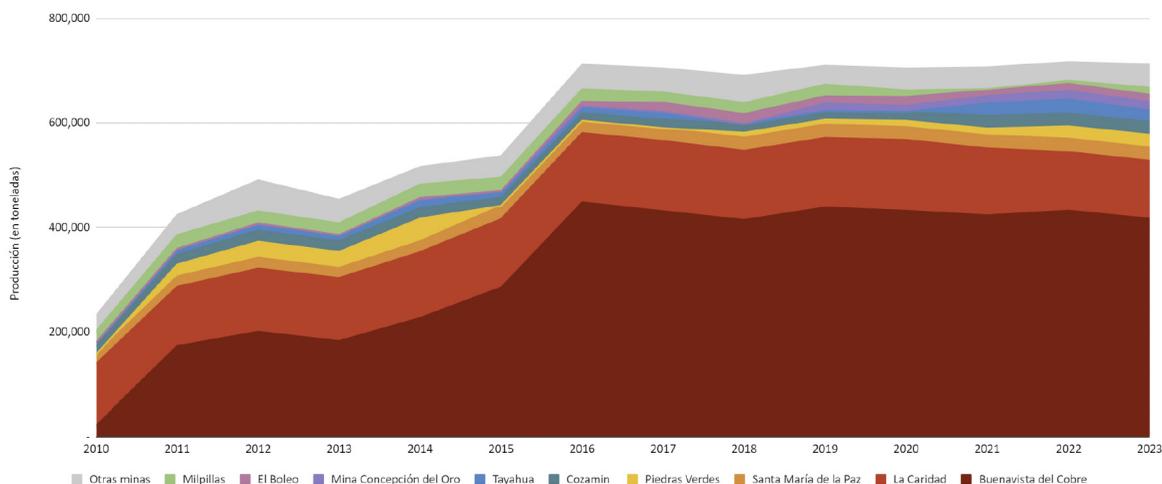


FIGURA 11. Producción de cobre por minas en México de 2010 a 2023. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi.

De las 34 minas georreferenciadas, 27 siguen produciendo en 2023. La mina Buenavista del Cobre representa más de la mitad de la producción nacional de cobre; junto con La Caridad, ambas representan tres cuartas partes de la producción nacional (tabla 4). Esto muestra una clara dependencia de la producción nacional hacia muy pocas minas.

TABLA 4. Producción de cobre por mina en 2023

Nº	Proyecto	Empresa	Entidad	Producción 2023 (toneladas)	Porcentaje de la producción total	Fuente
1	Buenavista del Cobre	Grupo México	Sonora	416,506	58.49 %	Camimex
2	La Caridad	Grupo México	Sonora	110,808	15.56 %	Camimex
3	Santa María de la Paz	Nemisa	San Luis Potosí	25,791	3.62 %	Camimex
4	Piedras Verdes	Invecture Group	Sonora	24,360	3.42 %	Camimex
5	Cozamin (San Roberto)	Capstone Mining Corp	Zacatecas	24,340	3.42 %	Camimex
6	Tayahua	Minera Frisco	Zacatecas	21,754	3.05 %	Camimex
7	Aranzazú	Aura Minerals Inc.	Zacatecas	16,507	2.32 %	Camimex
8	El Boleo	Korea Resources (Komir)	Baja California Sur	13,880	1.95 %	Camimex
9	Milpillas	Industrias Peñoles	Sonora	13,676	1.92 %	Camimex
10	Bolívar	Sierra Metals	Chihuahua	11,690	1.64 %	Camimex
11	San Martín	Grupo México	Zacatecas	4,647	0.65 %	Camimex
12	Velardeña	Industrias Peñoles	Durango	2,922	0.41 %	Camimex
13	Charcas	Grupo México	San Luis Potosí	2,791	0.39 %	Camimex
14	Sabinas	Industrias Peñoles	Zacatecas	2,529	0.36 %	Camimex
15	Campo Morado y G-9	Luca Mining	Guerrero	2,507	0.35 %	Camimex
16	Capela	Industrias Peñoles	Guerrero	2,467	0.35 %	Camimex
17	Avino	Avino Silver & Gold Mines Ltd	Durango	2,406	0.34 %	Camimex
18	Santa Bárbara	Grupo México	Chihuahua	2,125	0.30 %	Camimex

Nº	Proyecto	Empresa	Entidad	Producción 2023 (toneladas)	Porcentaje de la producción total	Fuente
19	El Espíritu	Cía. Minera y Beneficiadora Purísima	Hidalgo	1,997	0.28 %	Inegi
20	Tizapa	Industrias Peñoles	México	1,331	0.19 %	Camimex
21	El Águila	Gold Resource	Oaxaca	1,287	0.18 %	Inegi
22	Nuevo Monte	Santa Cruz Silver Mine	Hidalgo	1,255	0.18 %	Camimex
23	San Francisco del Oro	Minera Frisco	Chihuahua	1,142	0.16 %	Inegi
24	Unidad Asientos (El Porvenir)	Minera Frisco	Aguascalientes	367	0.05 %	Inegi
25	Nuestra Señora	Americas Gold and Silver Corp.	Sinaloa	252	0.04 %	Inegi
26	La Verde	Americas Gold and Silver Corp.	Sinaloa	252	0.04 %	Inegi
27	El Cajón	Americas Gold and Silver Corp.	Sinaloa	126	0.02 %	Inegi

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi. Nota: Para la mina Campo Morado, el Inegi no reporta producción en 2023 en el municipio de Arcelia donde se ubica la mina.

Las principales minas de cobre en México se concentran en la parte noroccidental del país, en la Sierra Madre Occidental (figura 12). Con Buenavista del Cobre y La Caridad, además de Piedras Verdes y Milpillias, el estado de Sonora concentra casi el 80 % de la producción nacional (figura 13), seguido de muy lejos por Zacatecas, San Luis Potosí y Chihuahua. La mina Buenavista del Cobre ocupa también el quinto lugar a nivel internacional, al representar por sí sola el 2 % de toda la producción mundial (IEA, 2024a). Las minas ubicadas en la Sierra Madre Oriental y la Sierra Madre del Sur son principalmente polimetálicas, donde el cobre representa un producto secundario asociado a otros minerales como plomo, zinc, plata u oro.



FIGURA 12. Principales minas y producción de cobre por municipio en México en 2023.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi.

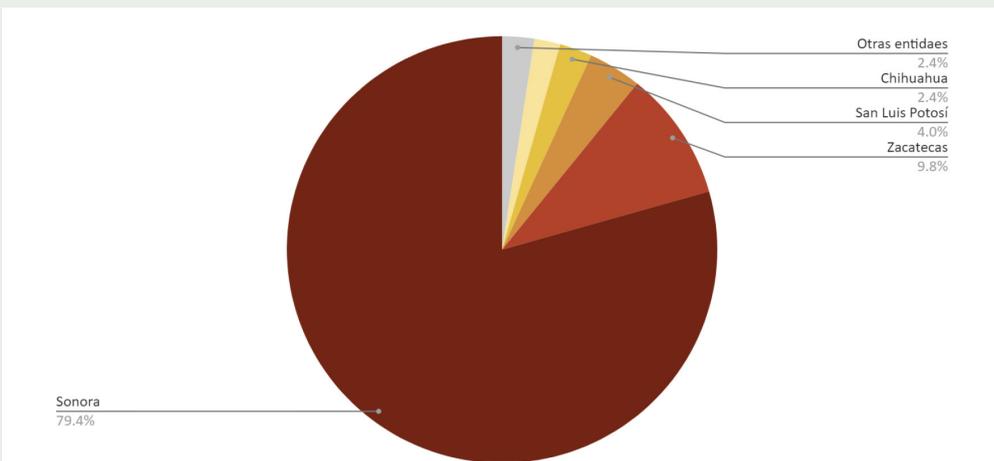


FIGURA 13. Producción de cobre por entidad federativa en 2023. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi.

En cuanto a la propiedad, con sus 5 minas en operación³ el Grupo México concentra tres cuartos de la producción nacional (figura 14). El 95 % de la producción total se concentra en tan sólo 6 empresas, lo que representa un oligopolio mucho más importante que el que existe para la producción de oro y plata. La otra diferencia respecto a la minería de estos dos metales es que las empresas dedicadas al cobre son mayoritariamente de capital nacional.

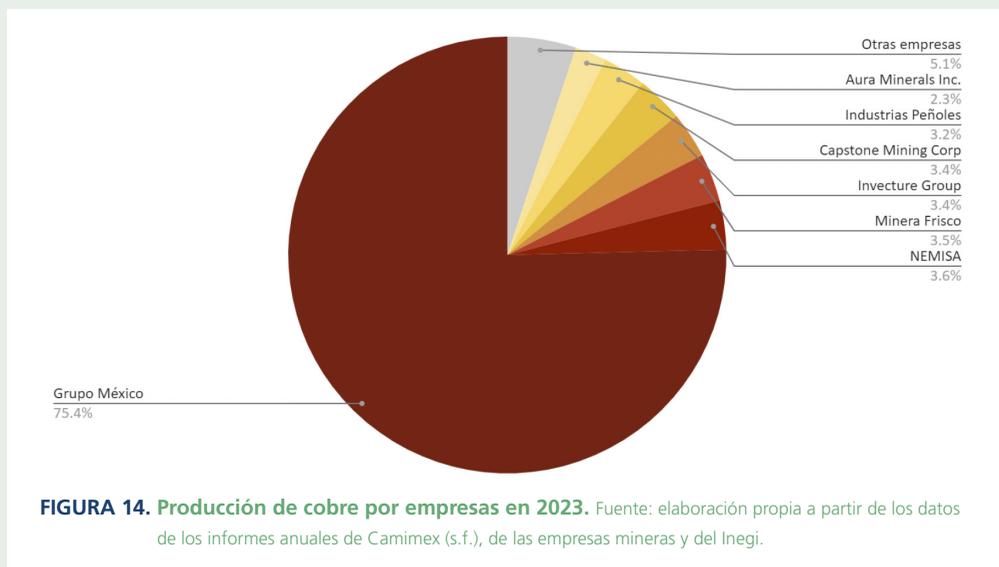


FIGURA 14. Producción de cobre por empresas en 2023. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi.

Desde 2001 hasta 2024, el Inegi ha reportado que 107 municipios del país han producido cobre en algún momento, de forma continua o intermitente. Zacatecas, Chihuahua, Sonora y Durango están a la cabeza con 17, 16, 15 y 15 municipios respectivamente, seguidos por Guerrero con 7, así como Sinaloa y Jalisco con 6 cada uno. El resto de los municipios está distribuido entre Michoacán, San Luis Potosí, Coahuila, México, Guanajuato, Oaxaca, Nayarit, Morelos, Baja California, Baja California Sur, Querétaro, Hidalgo y Aguascalientes. El número de

³ A las minas de Buenavista del Cobre, La Caridad, Charcas, San Martín y Santa Bárbara se suma ahora la mina Pilares que empezó a operar, pero que todavía no reportó producción en el informe anual de 2023.

municipios productores de cobre se ha reducido cada año, pasando de 58 en 2001 a 27 en 2023.

Para 2023, el municipio de Cananea, Sonora, fue el mayor productor de cobre del país con el 60% de la producción nacional, seguido de Nacoziari de García, también en Sonora, con el 16% (figura 15). Históricamente estos dos municipios han concentrado el 75% de la producción nacional de cobre. De hecho, durante la huelga de los mineros de Cananea, entre 2007 y 2009, la producción nacional de cobre se redujo en una tercera parte.

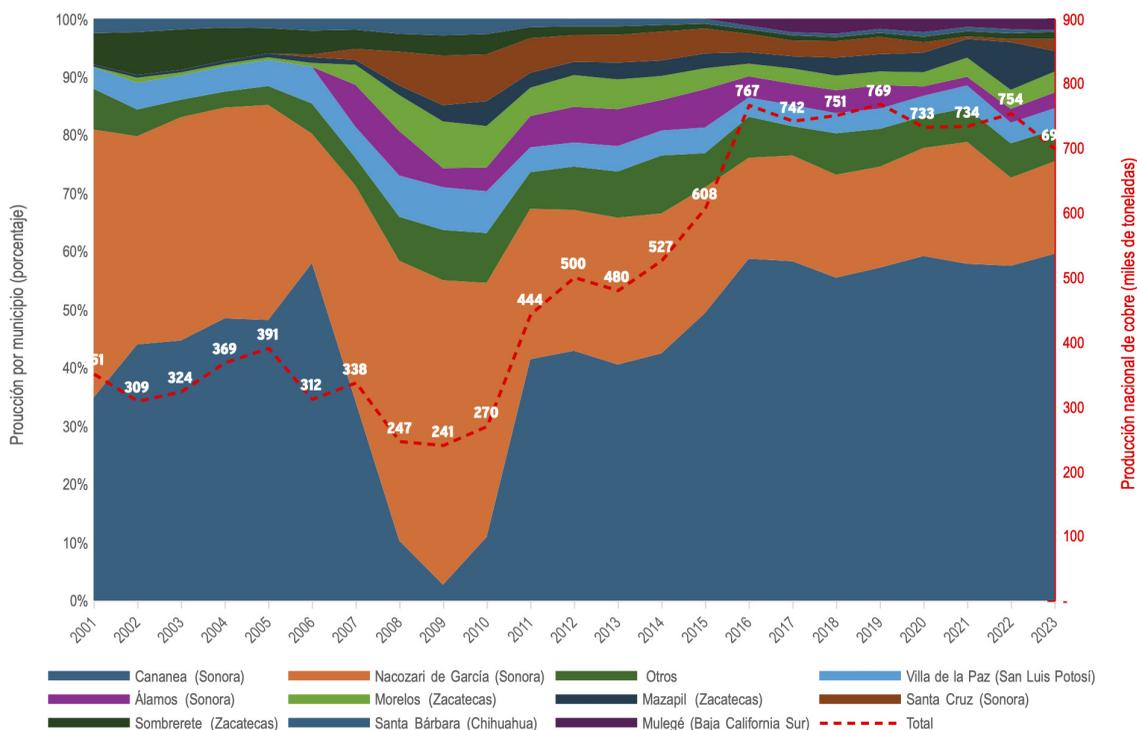


FIGURA 15. Producción minera por municipio. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del Inegi.

3.2 Ocupación territorial

En las últimas décadas, la explotación de cobre en México ha tenido un crecimiento sostenido no sólo en términos de producción, sino también en la superficie ocupada por las operaciones mineras. Para cuantificar dicha superficie, el área ocupada por cada una de las minas de cobre en 2023 se identificó con base en imágenes satelitales, y mediante las bases de datos espaciales de alta resolución sobre vegetación y uso del suelo elaboradas por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio) — disponibles para los años 2010, 2015, 2018 y 2021— se determinó el tipo de cobertura del suelo que existía en el lugar de la mina en esos años. Aunque este análisis no contempla la profundidad o volumen de las minas a cielo abierto — aspectos que sería deseable incluir para un estudio más completo —, la superficie ocupada sigue siendo un indicador relevante del impacto territorial de estas actividades.

La figura 16 compara la evolución de la superficie ocupada por las minas de cobre en México y su producción total. El área destinada a las minas de cobre ha aumentado debido a la necesidad de expandir las zonas de extracción y procesamiento, impulsada por la demanda internacional de este mineral. En 2023, el área ocupada por las operaciones mineras para extraer cobre ascendió a 27,460 hectáreas (ha), mientras que en 2010 la superficie era de apenas 6,616 ha, es decir, cuadruplicó su superficie en 13 años.

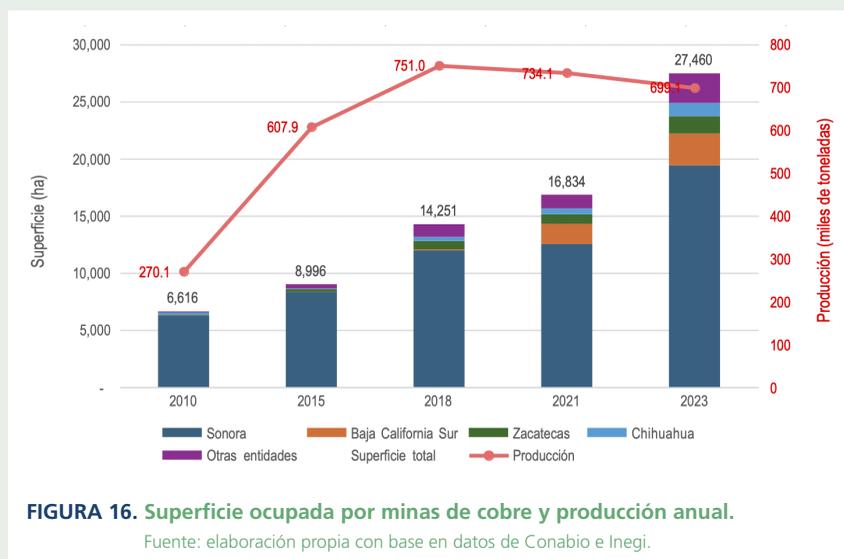


FIGURA 16. Superficie ocupada por minas de cobre y producción anual.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Conabio e Inegi.

La expansión territorial ha sido notable en los principales estados productores —como Sonora, líder en la producción de cobre que alberga las minas más grandes del país—, pero no siempre se ha acompañado de un aumento proporcional en la producción, lo que sugiere desafíos en la eficiencia y gestión del territorio minero. Parte del crecimiento en la ocupación territorial ha sido paralelo a un aumento en la producción, que alcanzó su máximo en 2019 con 768,542 toneladas. Sin embargo, en los últimos años se aprecia una ligera reducción en la producción a pesar de que la superficie continúa expandiéndose, lo que puede deberse a una caída en la concentración de cobre de los yacimientos actuales (ver sección 2.6).

Durante el periodo analizado, la relación entre superficie y producción en México da como resultado un promedio de 46 toneladas de cobre extraídas por hectárea de operación minera, aunque esta relación ha mostrado una tendencia a la baja. En 2010, la relación fue de 41 toneladas de cobre por hectárea, mientras que en los años siguientes la productividad por hectárea fue variando: 68 toneladas en 2015, 53 en 2018, 44 en 2021 y 25 en 2023 (figura 17). Esta tendencia a la baja plantea importantes preguntas sobre el impacto territorial y la sostenibilidad de las actividades mineras en el futuro cercano.

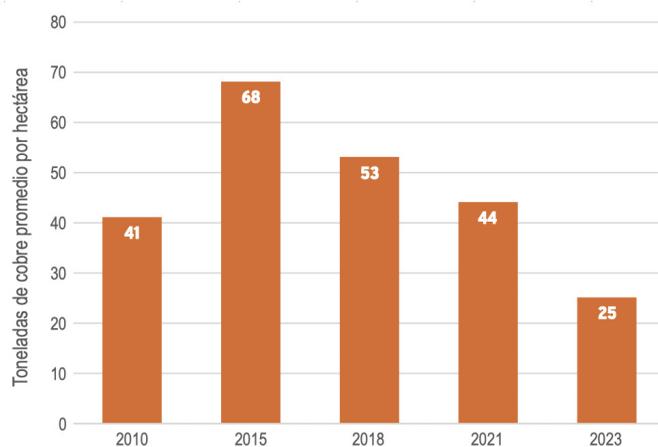


FIGURA 17. Toneladas de cobre promedio extraídas por hectárea en México.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Conabio e Inegi.

Como se puede apreciar en la tabla 5 y la figura 18, en 2010, la cobertura del suelo en las áreas que actualmente ocupan las minas de cobre en México estaba dominada por ecosistemas naturales, las cuales representaban el 67% del total (18,108 ha). Los matorrales constituían una porción significativa de esta cobertura, con 6,864 ha deforestadas, sobre todo en Sonora (43%) y Baja California Sur (39%). Los pastizales, que cubrían 5,394 ha, también sufrieron una importante pérdida, con 75% de dichas hectáreas localizadas en Sonora. La deforestación de bosques y selvas afectó un total de 5,002 y 848 ha, respectivamente, ubicadas en su mayoría en Sonora (81% de los bosques y 65% de las selvas). Destacan también más de 200 ha de selvas perdidas en Sinaloa y Guerrero.

TABLA 5. Cobertura del suelo en 2010 de la superficie ocupada por minas de cobre en 2023

Entidad	Cobertura natural				Uso humano	
	Matorrales	Pastizales	Bosques	Selvas	Operación minera	Agricultura
Superficie (hectáreas)						
Aguascalientes	99.1	230.4			3.0	0.1
Baja California Sur	2,673.5				94.7	
Chihuahua	206.1	385.0	272.2	4.1	242.1	28.7
Durango	186.3	113.6	275.3	0.8	0.1	44.0
Guerrero		66.1	30.3	107.0	18.3	104.8
Hidalgo	5.9	15.6	43.5		11.6	102.0
México		93.9	8.1	11.9	19.6	105.1
Michoacán				23.0	0.3	13.9
Oaxaca		1.1	5.2	24.3	-	48.6
Querétaro	19.0	14.0	0.1		0.7	16.3
San Luis Potosí	93.5	181.5			62.2	128.7
Sinaloa			18.1	127.7	-	26.8
Sonora	2,985.1	4,024.1	4,038.3	549.2	6,607.7	1,054.6
Zacatecas	595.1	269.2	310.5		114.8	186.5
Total	6,863.7	5,394.5	5,001.5	847.9	7,175.0	1,860.2

Fuente: elaboración propia con base en datos de Conabio e Inegi.



FIGURA 18. Cobertura del suelo en 2010 de la superficie ocupada por minas de cobre en 2023.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Conabio e Inegi.

Por otro lado, un 33 % (9,035 ha) del área que hoy ocupan las minas de cobre ya se encontraba alterada o destinada a usos humanos en 2010. De este porcentaje, el 26 % correspondía a áreas sin cobertura natural debido a actividades mineras ya en curso, mientras que el 7 % estaba dedicado a la agricultura (figura 18). Esta distribución refleja tanto el impacto ambiental de la minería en ecosistemas naturales como la conversión de tierras antes dedicadas a otros usos humanos, como la agricultura.

3.3 Consumo de energía

Desde 2020, a nivel mundial se observa un incremento en términos reales de los costos operativos en la mayoría de las minas de cobre, entre los cuales los principales impulsores son la energía para excavación, transporte y refinación, así como los gastos de envío y los aumentos en los costos de los reactivos (IEA, 2024a). Los costos de capital para los nuevos proyectos de cobre también se han elevado de forma importante. Los proyectos de ampliación recientes tienen una intensidad de capital de alrededor de 30 mil dólares estadounidenses (USD, por sus siglas en inglés) por tonelada (ton), mientras que en términos reales los proyectos iniciados alrededor de 2017 eran de alrededor de 20 mil USD/ton. Las expansiones están costando cada vez más debido a que requieren llegar a mayores profundidades, así como remover y procesar más roca a paridad de cantidad de metal refinado debido a la disminución de la concentración del mineral.

En el caso de México, no se encontraron datos públicos del consumo energético de la minería de cobre en su conjunto. No obstante, los datos publicados en los informes de desarrollo sustentable de Grupo México —empresa que para 2023 controlaba el 76.8% de la producción nacional— ofrecen un panorama de la tendencia nacional (tabla 6).

En la actualidad, la electricidad representa más de la mitad del consumo energético total de la división minera de Grupo México en el país, seguida por el diésel y el gas natural. Juntos, esos tres energéticos representan el 98.3% del consumo energético total. Esta gran dependencia de la electricidad es similar a la existente en Chile, donde ésta representó el 53% del consumo energético total de la minería de cobre en 2022 (Cochilco, 2022).

Los datos muestran con claridad el aumento del consumo energético total de la empresa entre 2020 y 2023. Tomando en cuenta que sólo el 0.28% de la electricidad consumida por la empresa en 2023 proviene de fuentes renovables,⁴ y que el consumo eléctrico representa el 50.4% del consumo energético total para este mismo año, en total es el 99.9% del consumo energético de la división minera en México que sigue dependiendo de fuentes fósiles (figura 19).

⁴ La división minera de Grupo México en el país en 2023 consumió 11,369 megavatios-hora (MWh) de energía eólica proveniente del parque El Retiro —que forma parte de los activos de la empresa— y 4,076,714 MWh de energía proveniente de fuentes no renovables.

TABLA 6. Consumo de electricidad y combustibles de 2020 a 2023 de la división minera de Grupo México en el país en gigajoules

Energético	2020	% 2020	2021	% 2021	2022	% 2022	2023	% 2023
Electricidad (no renovable)	15,040,166	56.2 %	13,490,896	49.3 %	14,885,870	50.8 %	14,676,170	50.4 %
Electricidad (renovable)	34,650	0.1 %	511,290	1.9 %	69,116	0.2 %	40,928	0.1 %
Diésel	7,116,300	26.6 %	8,813,174	32.2 %	9,435,833	32.2 %	10,138,690	34.8 %
Gas natural	4,137,180	15.5 %	4,043,887	14.8 %	4,414,171	15.1 %	3,782,196	13.0 %
Gasolina	167,010	0.6 %	169,601	0.6 %	172,931	0.6 %	185,432	0.6 %
Gas LP	121,370	0.5 %	140,046	0.5 %	135,750	0.5 %	166,490	0.6 %
Aceite usado	61,580	0.2 %	137,021	0.5 %	113,379	0.4 %	94,656	0.3 %
Combustóleo	54,920	0.2 %	37,323	0.1 %	38,605	0.1 %	51,000	0.2 %
Queroseno	10,000	0.0 %	8,000	0.0 %	9,140	0.0 %	9,875	0.0 %
Total	26,743,176	100 %	27,351,238	100 %	29,274,796	100 %	29,145,438	100 %

Fuente: elaboración propia a partir de los informes de desarrollo sustentable de Grupo México (s.f.) de 2021 a 2024.

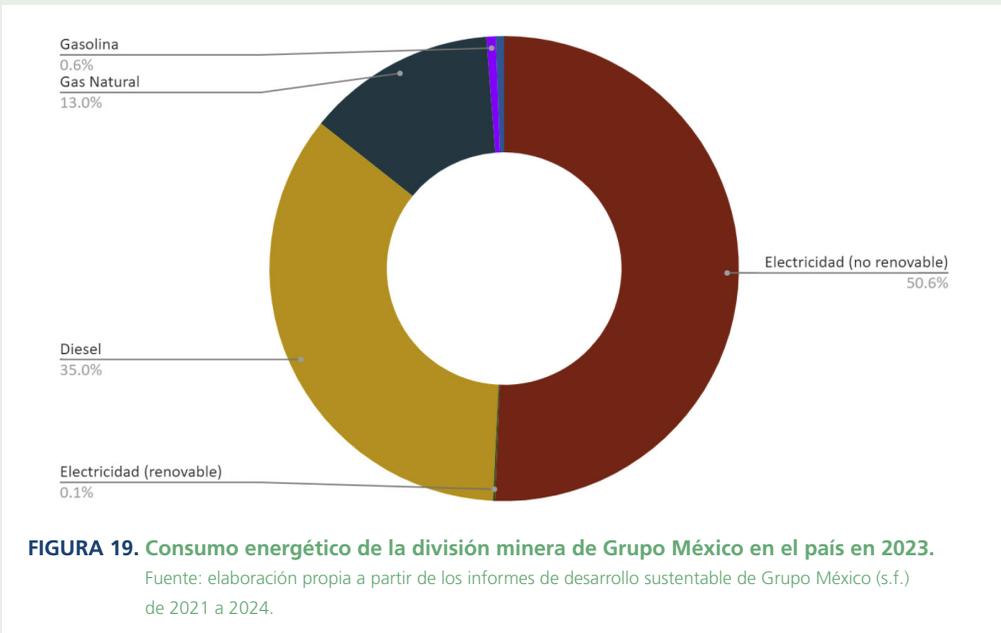


FIGURA 19. Consumo energético de la división minera de Grupo México en el país en 2023.

Fuente: elaboración propia a partir de los informes de desarrollo sustentable de Grupo México (s.f.) de 2021 a 2024.

Lo anterior muestra parte de la contradicción del sector minero, ya que, aunque se posiciona mediática y corporativamente como clave para el proceso de transición energética, su operación sigue basada casi en su totalidad en fuentes no renovables. Aumentar la producción y el extractivismo minero significa ineluctablemente aumentar el consumo energético y, por ende, la demanda y extracción de fuentes fósiles. En la práctica, las necesidades de operación del sector minero entran en contradicción con la narrativa oficial que propone una minería “verde”, “sustentable” o “climáticamente inteligente”.

La tabla 7 muestra el incremento de la intensidad energética de la extracción de cobre a través de los años con datos de Grupo México, en particular para los energéticos derivados del petróleo. En promedio, entre 2020 y 2023 la intensidad energética ha incrementado un 17%. Esto significa que, como en el caso del petróleo, cada vez se requieren mayores cantidades de energía para extraer la misma cantidad de producto. A su vez, indica que, no obstante las declaraciones oficiales de la empresa y del sector minero en general sobre sus esfuerzos para incrementar la eficiencia energética, la intensidad energética de las minas de la empresa en México sigue aumentando.

TABLA 7. Intensidad energética por fuente de energía de la división minera de Grupo México en el país de 2020 a 2023 en gigajoules/tonelada de cobre

Energético	2020	2021	2022	2023
Electricidad	26.10	25.01	27.05	27.41
Diésel	12.32	15.74	17.07	18.88
Gas natural	7.16	7.22	7.98	7.04
Gasolina	0.29	0.30	0.31	0.35
Gas LP	0.21	0.25	0.25	0.31
Aceite usado	0.11	0.24	0.21	0.18
Combustóleo	0.10	0.07	0.07	0.09
Queroseno	0.02	0.01	0.02	0.02
Total por tonelada de cobre	46.30	48.86	52.95	54.29

Fuente: elaboración propia a partir de los informes de desarrollo sustentable de Grupo México (s.f.) de 2021 a 2024.

Si se compara la intensidad energética de la división minera de Grupo México en el país con la del conjunto minero de cobre en Chile, se puede constatar que para extraer la misma cantidad de cobre se gastan más electricidad y combustibles en México que en Chile (tabla 8 y figura 2o). Esto se puede explicar por la mayor ley o concentración del mineral y tamaño de los depósitos en Chile respecto a México.

TABLA 8. Consumo energético de la división minera de Grupo México en el país y de la minería de cobre en Chile

	2020		2021		2022	
	Chile	México	Chile	México	Chile	México
Consumo energético total en gigajoules (GJ)	180,249,000	26,743,176	185,208,000	27,351,238	185,995,000	29,274,796
Consumo electricidad (GJ)	95,949,000	15,074,816	98,686,000	14,002,186	97,895,000	14,954,987
Electricidad (%)	53.20 %	56.40 %	53.30 %	51.20 %	52.60 %	51.10 %
Producción (tonelada)	5,730,000	577,580	5,620,000	559,840	5,330,000	552,883
Densidad energética (GJ/tonelada)	31.46	46.30	32.96	48.86	34.90	52.95
Densidad eléctrica (GJ/tonelada)	16.75	26.10	17.56	25.01	18.37	27.05

Fuente: elaboración propia a partir de los informes de desarrollo sustentable de Grupo México (s.f.) y de los informes de actualización del consumo energético de la minería del cobre en Chile de Cochilco (s.f.) de 2021 a 2023.

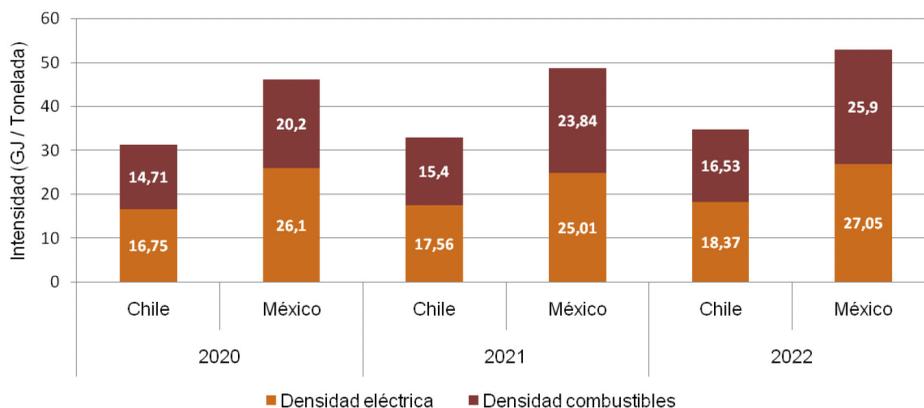


FIGURA 20. Comparación de la intensidad energética de la división minera de Grupo México en el país y de la minería de cobre en Chile de 2020 a 2022 en gigajoules/tonelada de cobre.

Fuente: elaboración propia a partir de los informes de desarrollo sustentable de Grupo México (s.f.) y de los informes de actualización del consumo energético de la minería del cobre en Chile de Cochilco (s.f.) de 2021 a 2023.

También es notorio el aumento de la densidad energética en ambos países de 2020 a 2022 con una tasa de crecimiento del 10.9 % en Chile y 14.4 % para la división minera de Grupo México en el país. Esto también se puede explicar por el decrecimiento progresivo de las leyes de concentración de cobre en ambos países, descrito en la sección 2.6.

3.4 Consumo de agua

La minería en México opera bajo un régimen especial en cuanto al uso del agua, sobre todo en lo relacionado con las aguas de laboreo. Estas últimas se encuentran en los yacimientos mineros, deben ser bombeadas para permitir la extracción de minerales, y no requieren concesión alguna para su uso por parte de las mineras. Según estimaciones del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2023), el volumen de aguas de laboreo puede ser hasta 2.4 veces mayor que el volumen concesionado. A pesar de su relevancia, este

tipo de agua no ha sido tradicionalmente sujeto a control, lo que plantea importantes desafíos para la gestión sostenible de los recursos hídricos en las regiones mineras.

La reforma a la Ley de Minería de 2023 hizo obligatorio que las empresas reporten el volumen utilizado de aguas de laboreo, aunque sin necesidad de solicitar una concesión. Si bien este cambio mejora la transparencia, sigue siendo problemático que estas aguas no se integren en los balances hídricos regionales. Esto impide tener una visión completa del impacto total de la minería sobre los recursos hídricos y complica la gestión del agua en zonas que ya enfrentan estrés hídrico y competencia por el acceso al líquido entre distintos sectores.

La información pública disponible sobre el uso del agua en México se limita al Registro Público de Derechos de Agua (Repda) de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Esta base de datos da cuenta de los titulares de derechos de agua y los volúmenes concesionados. Sin embargo, es importante señalar que el Repda no reporta los volúmenes realmente extraídos ni los declarados por los titulares para el pago de derechos, sino sólo las cantidades máximas autorizadas por el documento de la concesión. De tal forma, los datos del Repda no corresponden a una visión completa del uso del agua concesionada, pero permiten establecer un volumen aproximado de su uso, al menos en términos administrativos.

Para identificar las concesiones de agua vinculadas a las operaciones mineras de cobre en México, se utilizaron los datos del Repda actualizados a 2024 y se realizó una búsqueda exhaustiva mediante dos enfoques complementarios. En una primera aproximación, se utilizaron mapas de las áreas de operación minera para visualizar los aprovechamientos de agua cercanos a las zonas de extracción que pudieran corresponder a las mineras. En una segunda aproximación, se recopilaron las razones sociales de las empresas propietarias de las minas de cobre y de los títulos de concesión ubicados en las cercanías de las minas, que luego fueron buscados en el Repda para crear una base de datos lo más completa posible de las concesiones de agua asociadas a la minería de cobre.

Como resultado, fue posible identificar 230 títulos de agua vinculados a 34 razones sociales de empresas mineras, correspondientes a 25 minas de cobre. El volumen autorizado para extracción y aprovechamiento de agua para estas minas es de 99.09 millones de metros cúbicos (m³) anuales. Este volumen equivale al consumo doméstico anual de agua de una ciudad como la zona metropolitana de Querétaro, sin incluir el agua de laboreo, lo que significa que

el uso real de agua por parte de las mineras de cobre es considerablemente mayor. Si se utiliza el factor de 2.4 veces el agua concesionada —determinado por el IMTA para el cálculo aproximado de las aguas de laboreo—, el volumen total aproximado de agua utilizado por las minas de cobre podría ascender a un total de 335.81 millones de metros cúbicos anuales. Esto significa que el agua concesionada corresponde apenas a un 30 % del volumen total, frente a un 70 % de aguas de laboreo.

Tomando en consideración sólo los títulos de concesión de agua registrados en el Repda, se analizó el volumen de agua concesionada por mina en relación con su producción de cobre para 24 minas en las que se contaba con la información. De esta relación se pudo estimar un promedio de 183 m³ de agua por tonelada de cobre extraída en las minas de México para los años 2010 a 2023. Este cálculo proporciona un marco de referencia para evaluar la eficiencia en el uso del agua en las distintas operaciones mineras, en especial en un contexto donde el acceso a recursos hídricos es limitado y las actividades mineras demandan grandes volúmenes de agua.

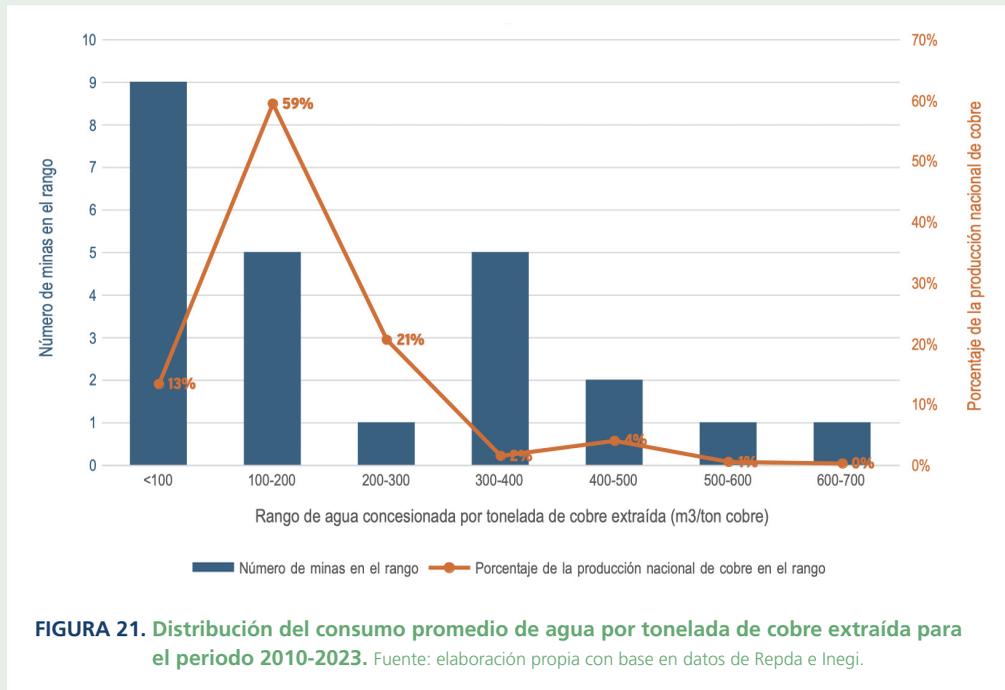


FIGURA 21. Distribución del consumo promedio de agua por tonelada de cobre extraída para el periodo 2010-2023. Fuente: elaboración propia con base en datos de Repda e Inegi.

En la figura 21 se presenta una gráfica que ilustra la distribución promedio del consumo de agua por tonelada de cobre extraída en el periodo de 2010 a 2023, en función de los rangos de volumen de agua concesionada por mina. La gráfica destaca dos indicadores importantes: 1) el número de minas que caen dentro de cada rango de consumo de agua por tonelada de cobre; y 2) el porcentaje de la producción nacional de cobre que representan esas minas.

La gráfica revela que, si bien hay 9 minas en el rango de menos de 100 m³ de agua por tonelada de cobre extraída, éstas sólo representan en promedio el 13 % de la producción de cobre del país y tienen un 3 % del agua concesionada para las minas de cobre. Este dato sugiere que, aunque estas minas son relativamente eficientes en términos de agua concesionada por tonelada de cobre, no contribuyen de manera significativa a la producción nacional de este mineral.

En contraste, las 5 minas en el rango de 100 a 200 m³ de agua por tonelada de cobre son responsables en promedio del 59 % de la producción nacional, y tienen un volumen de agua concesionada de 48 millones de m³ anuales que equivale al 48 % del agua concesionada para la minería de cobre. Esto indica que las minas en este segundo rango de mayor consumo de agua concesionada son las que generan la mayor parte del cobre en México y las que mayor volumen de agua utilizan, lo que podría señalar una relación entre el volumen de agua utilizado y la escala de producción.

En la figura 21 se observa que, a medida que aumentan los rangos de consumo de agua por tonelada por encima de los 200 m³, disminuye tanto el número de minas como su contribución a la producción nacional de cobre. Estos rangos de uso extremo de agua en relación con la producción de cobre también pueden deberse a que se trata de minas polimetálicas cuya producción principal corresponde a un mineral distinto del cobre.

Este análisis evidencia una distribución desigual en el uso del agua concesionada a las minas de cobre del país, donde un pequeño grupo de minas con un consumo de entre 100 y 200 m³ por tonelada de cobre es responsable de la mayor parte de la producción, mientras que otras minas, tanto más eficientes como muchísimo menos eficientes en términos de uso de agua, tienen una contribución más limitada a la producción total.

Los datos se complementan con una visión más amplia del volumen total de agua concesionada a lo largo del tiempo y su relación con la producción anual de cobre en México. La figura 22 muestra la evolución del volumen

vigente de agua concesionada a las minas de cobre —línea azul—, expresada en millones de metros cúbicos anuales, junto con la producción de cobre —barras naranjas— en miles de toneladas entre 1994 y 2023. Si bien no se dispone de datos de producción de cobre antes de 2001, los volúmenes de agua concesionada a las minas ya se registraban desde mediados de la década de 1990.

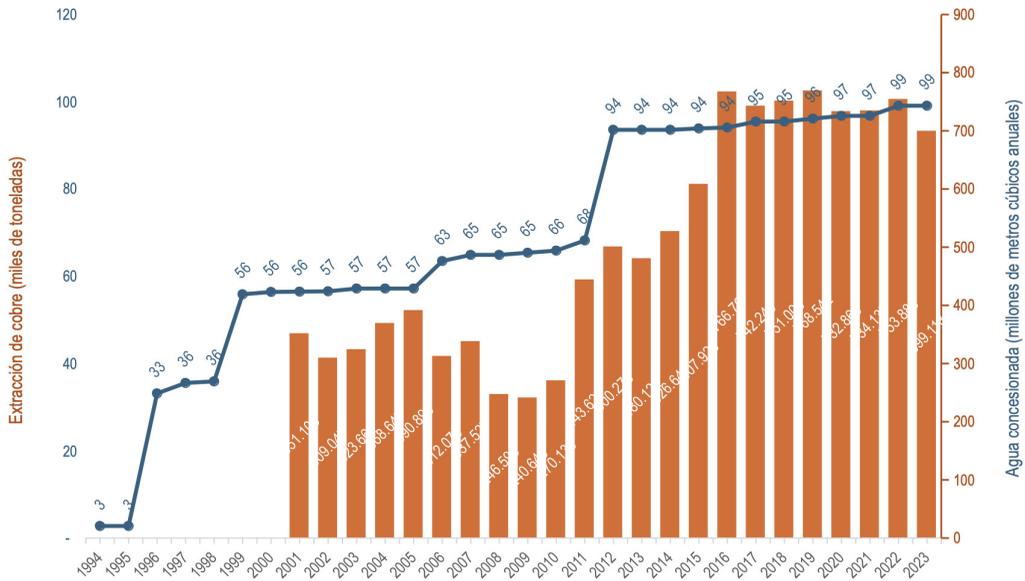


FIGURA 22. Volumen vigente de agua concesionada y producción anual de cobre. Fuente: elaboración propia con base en datos de Repda e Inegi.

La gráfica muestra que, entre 1994 y 1998, el volumen de agua concesionada vigente creció de manera notable, pasando de 3 millones de metros cúbicos anuales a 36 millones en sólo cuatro años. A partir de 1999, el volumen concesionado subió a 56 millones de metros cúbicos anuales, y casi mantuvo esa cifra hasta 2005. Desde 2006 hasta 2011 se observa un ligero incremento, para dar en 2012 un nuevo salto hasta los 94 millones de metros cúbicos y mantener un ligero incremento hasta 2022.

El crecimiento sostenido en la cantidad de agua concesionada a las minas de cobre refleja el papel esencial del recurso hídrico en la industria minera. Sin embargo, es importante recordar que el volumen concesionado no incluye las aguas de laboreo, cuyo uso sigue sin estar integrado en los balances hídricos regionales, lo que significa que el uso real de agua por parte de las minas es mucho mayor de lo que muestran las concesiones.

El uso intensivo de aguas concesionadas y de laboreo subraya la necesidad urgente de revisar las políticas hídricas aplicables a la minería para garantizar una gestión más equitativa y sostenible de los recursos, así como para evitar impactos irreversibles en los ecosistemas y las comunidades locales.

3.5 Emisiones

La producción de cobre es una de las actividades mineras más intensivas en términos de consumo de energía, lo que se refleja en las altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) reportadas en términos de dióxido de carbono equivalente (CO₂e). El CO₂e permite comparar el impacto de diferentes GEI al expresarlos en una medida común que refleja su capacidad relativa para atrapar calor en la atmósfera.

De acuerdo con estudios de análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés) en la minería de metales (Nuss y Eckelman, 2014), las emisiones de CO₂e oscilan entre 3 y 9 toneladas por cada tonelada de cobre. Este rango de variabilidad depende de diversos factores, como la ley del mineral, ya que una ley más baja implica procesar mayor cantidad de mineral para obtener la misma cantidad de cobre, lo que aumenta el consumo de energía y, por ende, las emisiones. Además, la eficiencia energética de las operaciones y el tipo de energía utilizada —fósil o renovable— son determinantes clave en el nivel de emisiones generadas.

Los datos de Nuss y Eckelman son de hace una década. Desde entonces, ha incrementado la intensidad energética por unidad de metal producido (ver sección 3.3.). Para analizar las emisiones del sector minero en México recurrimos a los datos del Registro Nacional de Emisiones (Rene): una plataforma creada bajo la Ley General de Cambio Climático de México, a la que industrias de ciertos sectores, como el minero, reportan sus emisiones anuales de GEI. Esta información proviene de las Cédulas de Operación Anual (COA) que las

empresas presentan a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), las cuales deben incluir datos sobre las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC) y otros gases con potencial de calentamiento global.

A pesar de que todas las empresas deben cumplir con esta obligación, el Rene no verifica la precisión de los datos reportados. Esto puede dar lugar a información incompleta o inconsistente, lo que complica la obtención de un panorama completo y fiable sobre las emisiones reales de las empresas en México. En sectores como la minería, donde los impactos ambientales son significativos, esta falta de consistencia en los reportes es un problema importante.

Para este análisis, se consultaron los datos del Rene con el objetivo de identificar las emisiones reportadas por las minas de cobre en el país. De las 35 minas identificadas, sólo 19 han reportado emisiones en el periodo de 2015 a 2023, lo que deja un vacío considerable en los datos y muestra una vez más la relevancia de los problemas de transparencia y cumplimiento ambiental en el sector minero (tabla 9). En la tabla 9 puede verse por mina la mediana de las emisiones reportadas anualmente⁵ así como de la producción anual, también pueden verse las minas de cobre que no han reportado emisiones al Rene, ni una sola ocasión, en los últimos ocho años (2015-2023). Los casos de Minera María y Pilares son especiales, pues Minería María no ha reportado producción desde 2015, aunque presenta emisiones para los años 2018 y 2023, y el caso de Pilares que aún no ha iniciado producción.

⁵ Se utilizó la mediana para representar las emisiones en la tabla, debido a la presencia de valores atípicos que, en algunos casos, alcanzan órdenes de magnitud significativamente mayores que el resto de los datos. Dado que el Rene puede incluir errores y datos inconsistentes, la mediana se empleó para reducir la influencia de estos valores extremos y proporcionar una representación más equilibrada de las emisiones durante el periodo de estudio.

TABLA 9. Relación promedio entre emisiones y producción por mina de cobre para el periodo 2015-2023

Empresa	Proyecto	Promedio (2015-2023)		
		Emisiones anuales reportadas (toneladas de Co ₂ e)	Producción de cobre anual (toneladas)	Relación de emisiones / producción
Grupo México	Buenavista del Cobre	1,319,767	403,399	3.3
Grupo México	La Caridad	860,865	125,307	6.9
Nemisa	Santa María de la Paz		25,037	
Capstone Mining Corp	Cozamin (San Roberto)	34,244	18,868	1.8
Minera Frisco	Tayahua	105,153	18,619	5.6
Industrias Peñoles	Milpillas	130,617	16,825	7.8
Aura Minerals Inc.	Aranzazú		14,826	
Korea Resources (Komir)	El Boleo	103,945	12,680	8.2
Invecture Group	Piedras Verdes	141,124	9,752	14.5
Sierra Metals	Bolívar		8,389	
Santa Cruz Silver Mine	Nuevo Monte		5,374	
Industrias Peñoles	Sabinas		4,377	
Grupo México	San Martín	40,773	3,784	10.8
Grupo México	Charcas	35,110	3,197	11
Grupo México	Santa Bárbara		2,706	
Cía. Minera y Beneficiadora Purísima	El Espíritu		2,649	
Industrias Peñoles	Capela	27,887	2,557	10.9
Industrias Peñoles	Velardeña	27,650	2,348	11.8
Gold Resource	El Águila	30,959	2,163	14.3
Minera San Francisco Del Oro	La Mesa, Granadeña, Frisco, Clarines		2,029	
Minera Frisco	San Francisco del Oro	44,370	1,975	22.5
Avino Silver & Gold Mines Ltd	Avino y San Gonzalo		1,962	
Excellon Resources	La Negra (Maconi)		1,822	

Empresa	Proyecto	Promedio (2015-2023)		
		Emisiones anuales reportadas (toneladas de CO ₂ e)	Producción de cobre anual (toneladas)	Relación de emisiones / producción
Luca Mining	Campo Morado y G-9		1,289	
Industrias Peñoles	Tizapa	58,538	1,277	45.9
Industrias Peñoles	Francisco I. Madero	123,551	1,042	118.5
Minera Frisco	Unidad Asientos (El Porvenir)	37,505	916	41
AHMSA	El Baztán		804	
Industrias Peñoles	Bismark	97,055	754	128.8
Fresnillo Plc	Ciénega & San Ramón	90,376	385	234.9
Americas Gold and Silver Corp.	Nuestra Señora		383	
Americas Gold and Silver Corp.	El Cajón		383	
Americas Gold and Silver Corp.	La Verde		192	
Minera Frisco	María	15,298		

Fuente: elaboración propia con base en datos de Rene, Camimex e Inegi.

La gráfica de la figura 23 muestra la relación anual entre las emisiones totales de GEI reportadas por las minas de cobre y su producción durante el periodo mencionado. Las barras naranjas representan las emisiones totales de CO₂e en decenas de toneladas, mientras que las barras azules reflejan la producción de cobre en toneladas. La línea roja indica el factor de relación entre las emisiones y la producción (toneladas de CO₂e / tonelada de cobre), lo que proporciona una medida de la intensidad de carbono de las operaciones mineras.

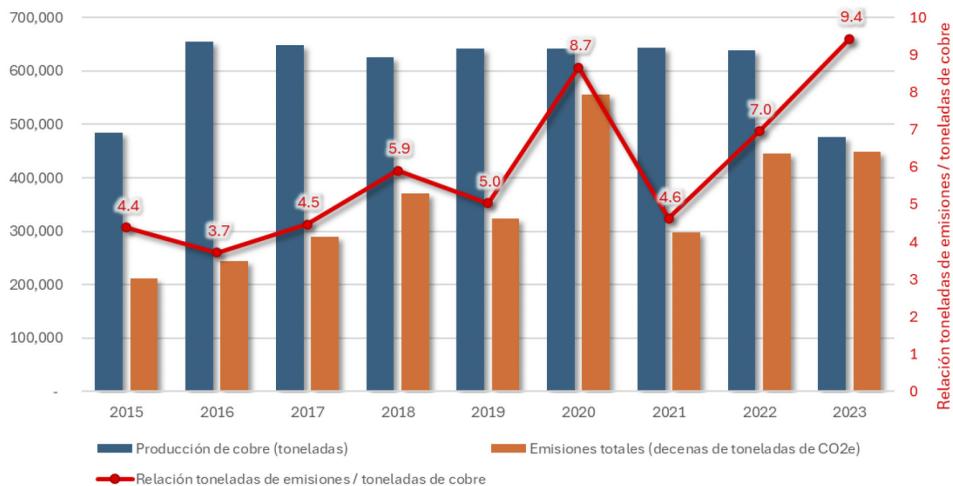


FIGURA 23. Relación entre producción de cobre y emisiones totales para el periodo 2015-2023.

Fuente: elaboración propia con base en datos de Rene, Camimex e Inegi.

La gráfica muestra un panorama preocupante en términos de cómo han evolucionado las emisiones de GEI en comparación con la producción de cobre a lo largo de los años. Entre 2015 y 2023, el factor de relación entre emisiones y producción aumentó de forma considerable, al pasar de 4.4 toneladas de CO₂e por tonelada de cobre en 2015 a 9.4 toneladas en 2023, es decir, más del doble. Esto significa que, a pesar de que la producción de cobre se ha mantenido relativamente estable, las emisiones por tonelada de cobre han crecido de manera alarmante.

En 2020, se observa un máximo en el factor de relación, el cual alcanza las 8.7 toneladas de CO₂e por tonelada de cobre y coincide con un aumento considerable en las emisiones totales reportadas. Este aumento podría deberse a varios factores, incluyendo una explotación más intensiva en un contexto global de alta demanda de materias primas, junto con el posible agotamiento de los yacimientos de alta ley, lo que implicaría mayores volúmenes de procesamiento de material de menor calidad y, por tanto, un mayor consumo energético.

En 2021, el factor de relación muestra una leve disminución, llegando a 4.6 toneladas de CO₂e por tonelada de cobre. Sin embargo, esta caída no debe interpretarse como un avance significativo en términos de eficiencia, sino como una posible desaceleración temporal en las operaciones que refleja la caída de la demanda por la pandemia de covid-19. A largo plazo, la tendencia general sigue siendo el aumento sostenido en las emisiones por tonelada de cobre producida. El dato de 2023, de 9.4 toneladas de CO₂e por tonelada de cobre, representa el valor más alto registrado en el periodo. Este incremento refuerza la idea de que las minas de cobre en México están enfrentando un deterioro significativo en términos de eficiencia energética y de manejo de emisiones, lo que genera dudas sobre la sostenibilidad de las operaciones a largo plazo.

Este análisis subraya que la minería de cobre en México está atravesando por un periodo en el que, a pesar de que la producción de cobre se ha mantenido relativamente estable, el impacto ambiental ha empeorado, medido en términos de emisiones de GEI por tonelada de cobre. Este comportamiento es sintomático de un modelo extractivo intensivo, donde no existen mejoras tecnológicas o de eficiencia suficientes para compensar el agotamiento de los recursos y las crecientes dificultades geológicas para obtener el mineral.

En la figura 24 se presenta la evolución anual de los GEI reportados por las minas de cobre, desglosados por tipo de gas entre 2015 y 2023. La gráfica muestra las emisiones en toneladas de CO₂e, y destaca cómo el CO₂ es el principal contribuyente a las emisiones totales en todo el periodo analizado.

El dióxido de carbono (CO₂) es, sin lugar a dudas, el gas más emitido por las minas de cobre, con cifras que oscilan entre los 2.1 millones de toneladas en 2015 y un pico de 6.8 millones de toneladas en 2019. En 2023, las emisiones de CO₂ fueron de 4.37 millones de toneladas. En cuanto al óxido nitroso (N₂O), aunque sus emisiones son menores en comparación con el CO₂, registró un incremento alarmante en 2018 al alcanzar las 534,742 toneladas, tras de lo cual mantuvo valores elevados hasta 2023 con 82,229 toneladas.

Las emisiones de metano (CH₄) también presentaron fluctuaciones, en especial en 2018, año en que se registró un valor máximo de 16,395 toneladas de CO₂e, aunque las emisiones de este gas se mantuvieron en torno a las 2,300 toneladas de CO₂e en 2023. Por último, se observaron emisiones menores de hidroclorofluorocarbonos (HCFC) y hidrofluorocarbonos (HFC).

Aunque sus emisiones son mucho más bajas que las del CO₂, los HFC alcanzaron un máximo de 29,932 toneladas de CO₂e en 2021, y 20,716 toneladas de CO₂e en 2023, lo que refleja el uso de estos gases en procesos industriales. Los HCFC, por su parte, mostraron niveles bajos pero constantes, con 3,035 toneladas de CO₂e en 2023. En resumen, aunque el dióxido de carbono sigue siendo el GEI predominante, los incrementos en otros gases como el óxido nitroso y el metano reflejan una creciente diversidad en las fuentes de emisiones.

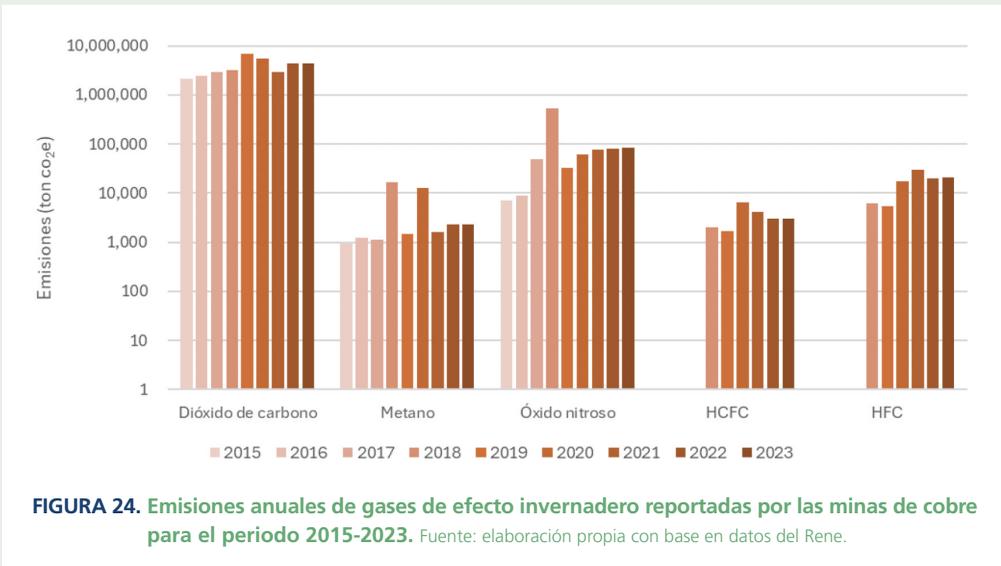


FIGURA 24. Emisiones anuales de gases de efecto invernadero reportadas por las minas de cobre para el periodo 2015-2023. Fuente: elaboración propia con base en datos del Rene.

Este análisis de las emisiones en la minería de cobre en México revela una tendencia preocupante hacia un aumento significativo en la intensidad de carbono de las operaciones. Aunque la producción de cobre se ha mantenido estable, las emisiones por tonelada producida han crecido más del doble en menos de una década, lo que refleja las ineficiencias energéticas y los retos que enfrenta el sector para reducir su impacto ambiental.

3.6 Impacto sobre la salud

La extracción y procesamiento de cobre en México genera diversas sustancias tóxicas que con regularidad son transferidas al suelo, agua y aire. La roca mineralizada se puede extraer de forma subterránea o, más comúnmente, a cielo abierto. Esta última tiene como consecuencia el fenómeno conocido como drenaje ácido de mina (DAM), ya que deja enormes tajos de roca expuesta al exterior, misma que, al oxidarse y reaccionar con el agua y el oxígeno atmosférico, produce otros derivados químicos —entre ellos el ácido sulfúrico— que se lixivian al subsuelo, contaminando el suelo y los cuerpos de agua. Este medio ácido promueve la proliferación de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, la cual intensifica la acidificación de los lixiviados y la infiltración de metales pesados (Salas *et al.*, 2020).

En el caso del proceso de separación —ya sea por flotación, precipitación o lixiviación—, se utilizan diversos solventes y reactivos cuyos desechos son depositados en las llamadas presas de jales, desde las cuales las sustancias tóxicas pueden infiltrarse al subsuelo y mantos freáticos o bien desbordarse por saturación ocasionando serios derrames que terminan contaminando suelos y cuerpos de agua cercanos. Además, muchos yacimientos son polimetálicos, por lo que no sólo se liberan las sustancias resultantes de los procesos de extracción y separación, sino los minerales asociados que no son de interés —por su baja concentración o poco mercado— y terminan en los desechos o escoria, como el cadmio y el plomo (Pereira *et al.*, 2021).

De acuerdo con Volke *et al.* (2005), las sustancias tóxicas resultantes de la suma tanto del proceso de extracción y separación como del tipo de yacimiento, que suelen ser liberadas al ambiente por la minería de cobre, son: plomo, arsénico, cadmio, cobalto, cobre, ácido sulfúrico, sulfato de cobre, zinc y manganeso. Esta industria también genera severas emisiones a la atmósfera que perjudican la calidad del aire (ver sección 3.4). El uso de explosivos y combustibles, la excavación y transporte de materiales, así como los procesos de trituración, separación y fundición liberan GEI, partículas suspendidas y otras emisiones tóxicas como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, arsénico, plomo, bismuto y polvo tanto de cobre como de otros metales (Norgate y Haque, 2010; Schlesinger *et al.*, 2011).

Estas sustancias tóxicas y metales pesados son absorbidos por los cultivos y el ganado, y son inhalados o ingeridos por las personas de comunidades

locales, para quienes el agua potable es uno de los principales vectores. Se ha reportado que están asociados a alteraciones renales, hepáticas, en el sistema nervioso, en el tejido pulmonar y en el sistema endócrino, así como que pueden producir gastroenteritis, enterocolitis, asma y rinoconjuntivitis, entre otras afectaciones a la salud (He *et al.*, 1997; Ndilila *et al.*, 2013; Herrera *et al.*, 2018).

El cadmio, por ejemplo, es tóxico para todos los organismos vivos, ya que se acumula en hígado, riñones y huesos, además de ser cancerígeno por inhalación, afectar el sistema de filtración de la sangre de los riñones y provocar la excreción de proteínas en la orina (ATSDR, 2016). Los elevados niveles de plomo en la sangre tienen severos efectos en la salud: atacan el sistema nervioso y ocasionan disfunción cognitiva; producen anemia, hipertensión, problemas renales y reproductivos; y en mujeres embarazadas aumentan el riesgo de abortos espontáneos y partos prematuros, además de afectar el desarrollo del sistema nervioso del feto (Poma, 2008). Hay estudios que asocian los elevados niveles de cadmio y plomo en la sangre con la cercanía a minas de cobre (He *et al.*, 1997), así como la incidencia de estos niveles en el aumento de abortos espontáneos (Kaur *et al.*, 2021).

En México existe el caso del estudio realizado en consecuencia del derrame tóxico de 40 millones de litros de sulfato de cobre acidulado en los ríos Sonora y Bacanuchi en 2014. Se tomaron muestras de sangre en 2022 en siete municipios de Sonora, mismas que superaron el valor criterio de plomo establecido en la NOM-199-SSA1-2000 sobre salud ambiental y niveles de plomo en sangre, que es de 10 a 25 microgramos por decilitro ($\mu\text{g}/\text{dL}$), al registrar valores mayores a 40 $\mu\text{g}/\text{dL}$ (Comités de Cuenca del Río Sonora, 2022). En torno a este mismo caso, en 2017 profesionales de la salud de distintas dependencias federales —incluida la Dirección General de Epidemiología— realizaron un estudio en los municipios de Sonora donde hay minas metálicas de cobre y riego agrícola; revisaron la prevalencia de defectos de nacimiento, del tubo neuronal y del bajo peso al nacer, y encontraron que estas afectaciones y la contaminación por metales pesados eran mayores al promedio (Valdés *et al.*, 2017).

Es evidente que la extracción y procesamiento de cobre no sólo representa una fuente importante de contaminación ambiental, sino también un riesgo para la salud de las comunidades cercanas a las zonas mineras. La liberación de contaminantes potencialmente tóxicos al entorno es inminente y tienen efectos adversos en la salud humana, ya que afecta los sistemas respiratorio, nervioso, renal y reproductivo, además de aumentar el riesgo de enfermedades

crónicas y defectos congénitos, en especial en poblaciones vulnerables como mujeres embarazadas, niñas y niños. La falta de un control efectivo y la bioacumulación de estos elementos en el entorno y en las personas agravan las consecuencias a largo plazo, que son subestimadas por las pruebas de daño durante la operación minera, lo que hace evidente la urgente necesidad de proteger la salud y el bienestar de las comunidades expuestas a estas actividades extractivas más allá de la vida útil de la mina.

4. Estimaciones del uso de cobre a futuro





4. Estimaciones del uso de cobre a futuro

4.1 Aumento previsto a nivel internacional

A pesar de ciertas diferencias en las estimaciones, las distintas fuentes internacionales existentes coinciden en un drástico aumento de la demanda de un conjunto de minerales en las próximas décadas por las necesidades de las políticas de transición energética. Según las estimaciones de la *IEA*, la demanda de minerales relacionados con la implementación de tecnologías para esas políticas —centrales de energías renovables, líneas de transmisión, vehículos eléctricos, baterías de almacenamiento, etc.— tendrá un aumento entre 2.5 y 3.7 veces entre 2023 y 2050 (figura 25). La figura 25 permite constatar el gran peso que tiene el cobre en esta demanda por ser el único mineral que se requiere en volúmenes importantes para todas esas tecnologías.

Según la *IEA*, la demanda total mundial de cobre —incluyendo los otros usos no relacionados con las políticas de transición energética— pasará de un poco menos de 26 millones de toneladas en 2023 a 37.6 millones en 2050 en el escenario de las políticas establecidas. En el escenario de las promesas anunciadas, la demanda mundial en 2050 podría alcanzar los 39.4 millones de toneladas y los 40.7 millones en el escenario de zero emisiones. Este aumento se debe sobre todo a las tecnologías asociadas a los procesos de transición energética que representan en la actualidad el 25 % de la demanda total de cobre, y que podrían representar entre el 34 % y 47 % de la demanda total de dicho mineral dependiendo de los escenarios (figura 26).

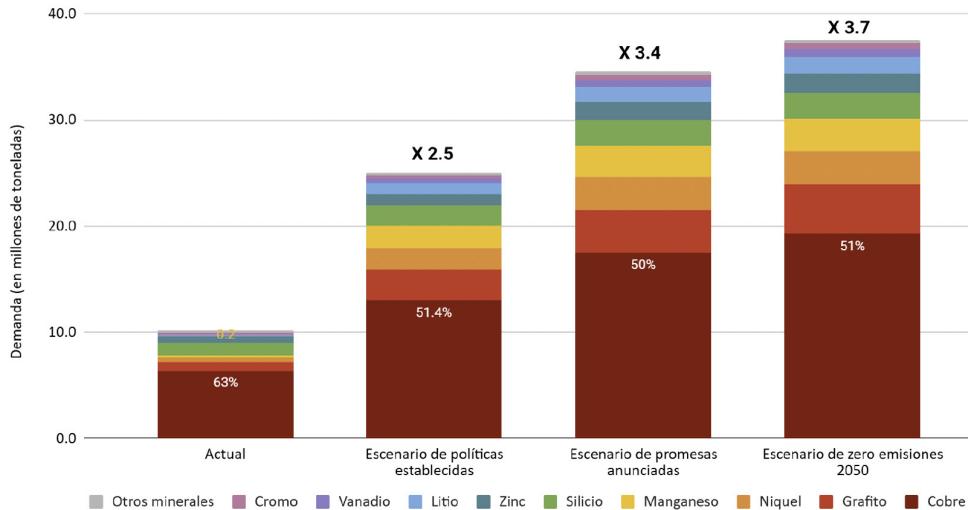


FIGURA 25. Demanda de minerales actual y para 2050 para las tecnologías “limpias” según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA (2024b).

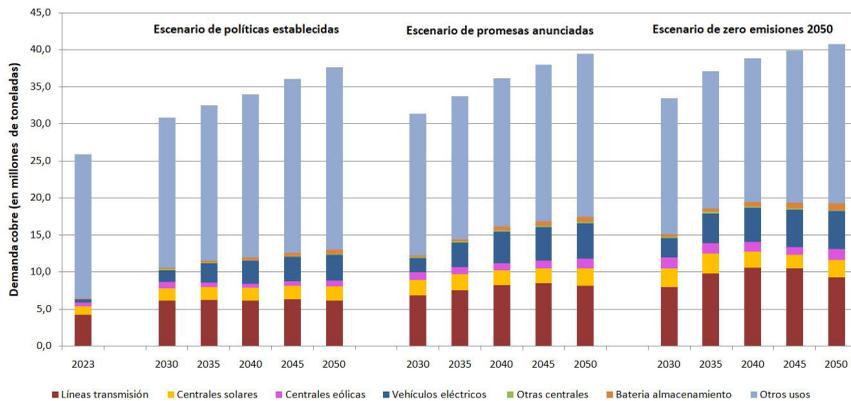


FIGURA 26. Aumento previsto de la demanda de cobre entre 2023 y 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía en volúmen y por tipo de uso final. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA (2024b).

En la figura 27 se observa el aumento significativo de la demanda de cobre relacionada con las políticas de transición energética de 2023 a 2050 en los distintos escenarios, donde las nuevas redes eléctricas representarían la mayor demanda de este mineral. Eso se debe a la construcción de centrales renovables ubicadas en las zonas con buen potencial en el recurso natural —viento, sol, agua o biomasa—, que en muchos casos no coinciden con las zonas de alto consumo eléctrico. Por otro lado, el bajo factor de planta de las fuentes eólicas y fotovoltaicas implica construir una mayor cantidad de centrales para proporcionar la misma cantidad de electricidad de las centrales basadas en combustibles fósiles, lo que redonda también en un mayor uso de cableado y redes eléctricas.

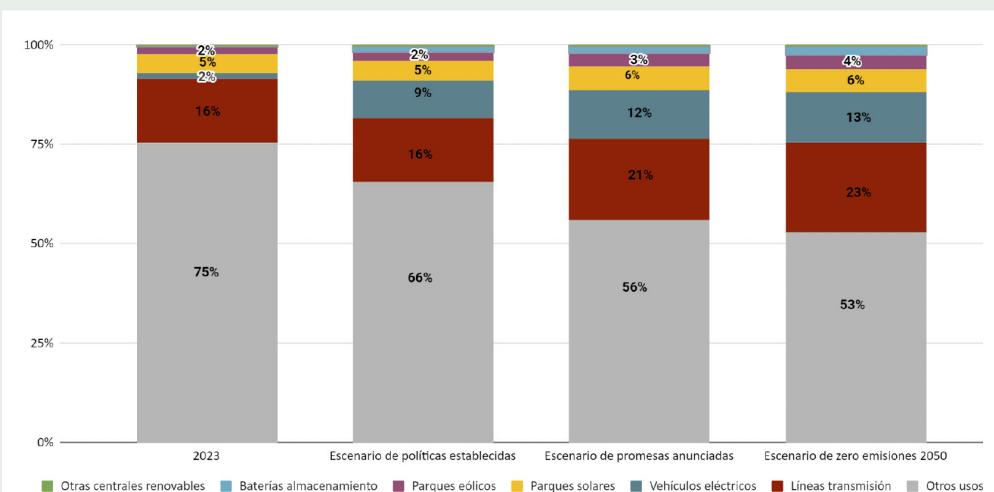


FIGURA 27. Demanda de cobre por tipo de uso en 2023 y 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA (2024b).

Por otro lado, la llegada progresiva de los vehículos eléctricos implica también un gran despliegue de redes para los puntos de recarga. Un estudio estima que el número de puntos de carga a nivel mundial pasará de 3.2 millones en 2021 —lo que requiere 43 mil toneladas de cobre— a 152.3 millones en 2040 —con un aumento previsto de 978 mil toneladas— (ICA, 2022). Además de los puntos de carga, los coches eléctricos implican también casi cuadruplicar

la demanda de cobre por su propia construcción, ya que un coche convencional que funciona con gasolina o diésel contiene en promedio 23 kg de cobre, mientras que un coche híbrido requiere 40 kg y un coche con batería eléctrica necesita 83 kg (ICA, 2017).

A lo anterior se suman nuevas demandas de cobre, como la relacionada con la emergencia de la inteligencia artificial y los centros de datos que se estima necesitará alrededor de 1 millón de toneladas en 2030 (Forbes, 2024); esto representa el doble de la demanda actual mundial para la implementación de parques eólicos: 502 mil.

En conjunto, estas estimaciones representan tasas de crecimiento entre 45.2% y 57.1% según los escenarios en tan sólo 27 años (figura 28). Los porcentajes muestran la contradicción de las propuestas de “crecimiento verde” basadas en el despliegue masivo de tecnologías “limpias”, ya que siempre están asociadas a un incremento de la demanda energética y de materias primas, lo que provoca una expansión continua del modelo extractivo, con todas las consecuencias socioambientales que ello implica.

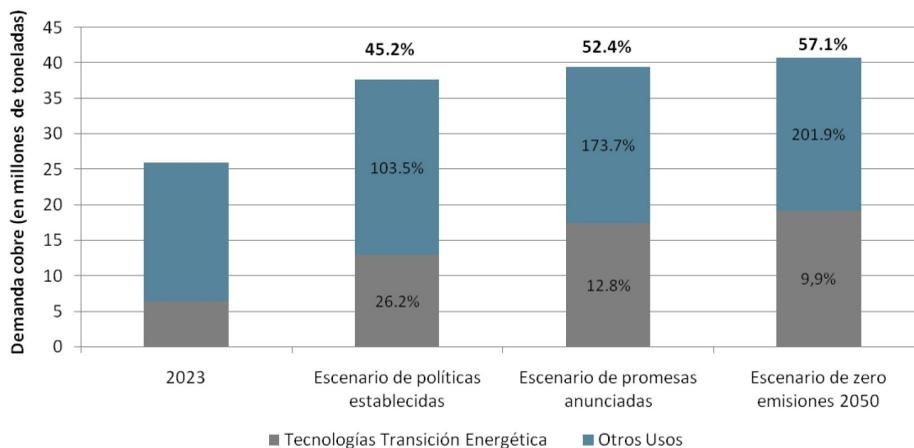


FIGURA 28. Aumento previsto de la demanda de cobre entre 2023 y 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía en volúmen y tasa de crecimiento.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de IEA (2024b).

Aunque varios estudios han documentado la inviabilidad geológica y técnica de estos escenarios (Michaux, 2021; Valero *et al.*, 2021), continúa su incorporación en las políticas climáticas y ambientales de agencias internacionales, en los informes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (*IPCC*, por sus siglas en inglés), así como en diversos gobiernos del norte global. Por este motivo, la mayor demanda de tecnologías e infraestructura de energía renovable impulsará el incremento del área afectada por la minería a nivel global y, sobre todo, en el sur global, donde se encuentra la mayoría de los elementos críticos para estas tecnologías. En este sentido, las amenazas mineras a la biodiversidad aumentarán a medida que más minas apunten a materiales para la producción de energía renovable (Sonter *et al.*, 2020).

4.2 Aumento previsto en México

Resulta difícil estimar el papel que podría tener México en este contexto de crecimiento mundial de la demanda de cobre expuesta en el punto 4.1. Si México mantiene su participación en la producción mundial en el 3.4% actual, la producción pasará de las 750 miles de toneladas en 2023 a un rango estimado entre 1,050 y 1,137 toneladas en 2030, según los escenarios de aumento de demanda internacional de la *IEA*. Esto significa un aumento de la producción de mínimo 300 mil toneladas en tan sólo 7 años, es decir, un aumento de 40 mil toneladas por año. En el caso del escenario de cero emisiones netas, esto implicaría casi duplicar la producción actual de cobre hasta 2050. El historial de producción en México nos muestra una dinámica de producción distinta, ya que para lograr un aumento de 300 mil toneladas pasaron 13 años desde la producción de 443 miles de toneladas en 2011, mientras que desde 2016 la producción se ha estabilizado en alrededor de 750 mil toneladas anuales sin experimentar cambios significativos (figura 29).

Mantener la posición de México dentro del mercado mundial de cobre implicaría entonces una fuerte aceleración de la extracción de cobre en los próximos años, con todas las consecuencias sociales y ambientales que ello conlleva.

Resulta interesante analizar cuáles son las verdaderas posibilidades para aumentar de manera tan significativa la producción de cobre en México. Para que eso sea posible, se tendría que mantener la producción en las minas actuales y, adicionalmente, desarrollar proyectos de ampliación de minas o de apertura de nuevas minas para permitir el crecimiento de la producción.

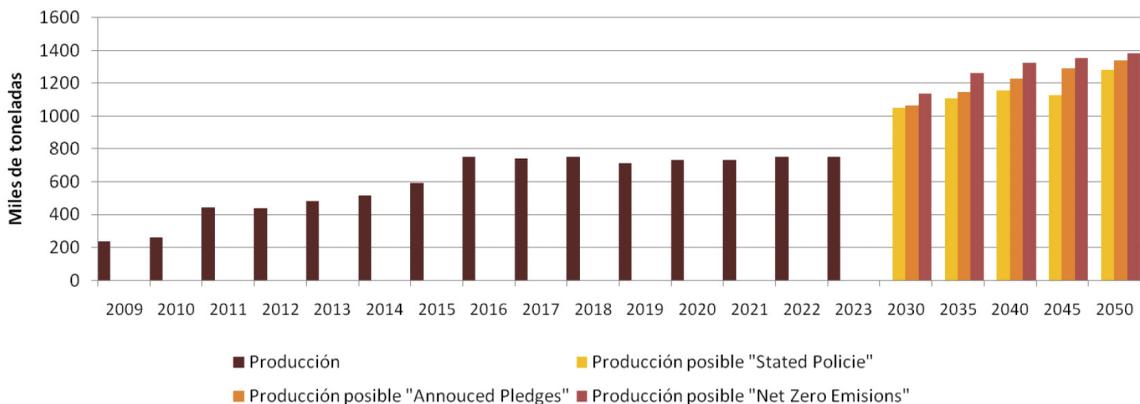


FIGURA 29. Producción de cobre de 2009 a 2023 en México y producción necesaria para cumplir con los escenarios de aumento de la demanda de la Agencia Internacional de Energía. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras, del Inegi y de los datos de IEA (2024b).

Si analizamos las posibilidades de mantener la producción en las minas actualmente en operación, encontramos una primera limitación en razón de lo analizado en la sección 2.6 sobre el decrecimiento de las leyes. Además, en relación al comportamiento de producción de las cinco minas principales —que representan el 86% de la producción nacional— en los últimos 5 años, se observa por ejemplo que las dos minas más importantes del país, Buenavista de Cobre y La Caridad, han disminuido su producción desde 2019 (figura 30).

Otro factor a considerar es la duración estimada de las minas en fase de explotación. En la tabla 10 se muestra un cálculo de la vida útil de las principales minas a partir de los datos publicados por las empresas tanto sobre sus reservas probadas y probables como sobre la producción actual. En general, la vida útil calculada de esta forma difiere de la anunciada en otros documentos de las empresas. Esto se puede explicar si se prevé tener un incremento de la producción en algunas minas y/o por la incertidumbre acerca de la cantidad económicamente extraíble de las reservas probables. Si nos basamos en la vida útil declarada por las empresas, las minas en operación tienen una vida útil restante inferior a los 20 años.

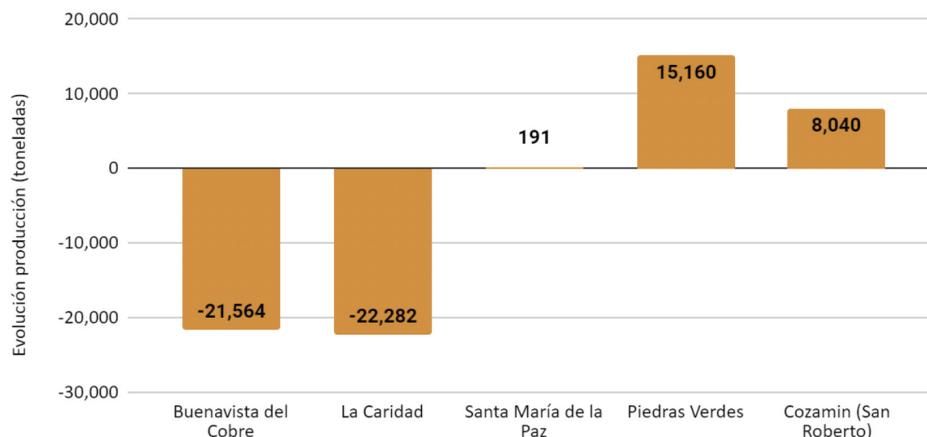


FIGURA 30. Evolución de la producción de cobre en las cinco minas principales de México de 2019 a 2023. Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.), de las empresas mineras y del Inegi.

TABLA 10. Producción, reservas y vida útil de las diez principales minas de cobre en México

Nº	Proyecto	Producción 2023	Reservas	Años de vida útil (cálculo)	Años de vida útil (documentos de empresas)
1	Buenavista del Cobre	416,506	10,680,000	25.6	Sin dato
2	La Caridad	110,808	4,460,000	40.2	Sin dato
3	Santa María de la Paz	25,791	Sin dato	Sin dato	Sin dato
4	Piedras Verdes	24,360	934,000	38.3	17
5	Cozamin (San Roberto)	24,340	272,000	11.2	17
6	Tayahua	21,754	Sin dato	Sin dato	Sin dato
7	Aranzazú	16,507	199,000	12.1	8
8	El Boleo	13,880	25,630	1.8	16
9	Milpillas	13,676	31,987	2.3	2
10	Bolívar	11,690	679,250	58.1	Sin dato

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de los informes anuales de Camimex (s.f.) y de documentos oficiales de las empresas mineras.

En las minas en operación se observa una tendencia a la estabilización o baja de la producción, en combinación con el hecho de que durante las dos próximas décadas la mitad de las diez principales minas en operación llegará al fin de su vida útil: Piedras Verdes, Cozamin, Aranzazú, El Boleo y Milpillás. Lo anterior representa una pérdida de producción anual de alrededor de 92 mil toneladas, con base en su producción actual.

En cuanto a los proyectos de ampliación o apertura de nuevas minas, según los datos recopilados por la Camimex en su informe anual de 2024, existen 12 proyectos de cobre que planean iniciar su producción entre 2024 y 2030 (tabla 11). En total, se estima que esos nuevos proyectos tendrán la capacidad de aportar alrededor de 361 mil toneladas de cobre al año, lo que representa un poco más de la mitad de la producción nacional en 2023, que fue de 699 mil toneladas. Dentro de esos proyectos se sigue manteniendo el mismo monopolio de Grupo México que representa el 74 % de la producción total en proyecto, con 4 proyectos y una producción total estimada de 271 mil toneladas.

TABLA 11. Nuevos proyectos de cobre previstos en México

Proyecto	Empresa	Estado	Inversión (mdd)	Años de vida útil	Producción anual (toneladas)	Año de inicio
El Arco	Grupo México	Baja California	-	40	190,000	2030
San Nicolás	Agnico Eagle-Teck	Zacatecas	-	15	63,000	2026
El Pilar	Grupo México	Sonora	310	13	36,000	2026
Buenavista Zinc	Grupo México	Sonora	416	15	35,000	2024
Media Luna	Torex Gold	Guerrero	-	11,8	15,000	2025
Angangueo	Grupo México	Michoacán	248	18	10,000	-
San Javier	Barksdale Resources	Sonora	116.8	13	7,300	-
ECO120	Americas Gold and Silver	Sinaloa	24.9	5	2,040	2024
La Fortuna	Minera Alamos	Durango	-	5	1,000	2027
Tahuehueto	Luca Mining	Durango	-	11,9	830	2024
Los Ricos Norte	GoGold Silver and Gold	Jalisco	-	13	800	2025
Los Ricos Sur	GoGold Silver and Gold	Jalisco	-	11	560	2025
Total			1138.7		361,530	

Fuente: elaboración propia a partir de Camimex (2024).

Más de la mitad de este posible aumento de producción se relaciona con el proyecto El Arco de Grupo México que se ha anunciado desde hace muchos años. Este proyecto ha provocado conflictos con la población y organizaciones locales por las afectaciones que podría generar (EJAtlas, 2022). Además, al estar ubicado dentro de dos áreas naturales protegidas —el área de protección de fauna y flora Valle de los Cirios y la reserva de la biósfera El Vizcaíno—, la continuidad de este proyecto se encuentra en incertidumbre por las reformas a la Ley de Minería aprobadas en mayo de 2023, la cual ahora estipula en su artículo 20: “Quedan prohibidas las obras y trabajos de exploración, explotación y beneficio minero dentro de las áreas naturales protegidas” (Decreto, 8 de mayo de 2023).

4.3 Estimación de los impactos del aumento de la demanda de cobre en México

Con los hallazgos de las secciones 3.2 hasta la 3.5 de este documento, es posible tener un estimado promedio de la huella de la extracción de cobre en México sobre algunos aspectos relacionados con el territorio y el medioambiente. La tabla 12 muestra los indicadores promedio de impactos por tonelada de cobre extraída.

TABLA 12. Impactos promedio de la extracción de una tonelada de cobre en México en 2023

Indicadores de impactos (promedio por tonelada)	
Ocupación territorial	0,04 ha
Consumo de agua	183 m ³ / año
Emisiones CO ₂ e	9.4 toneladas de CO ₂ e / año
Electricidad	27.41 GJ / año
Diésel	18.88 GJ / año
Gas natural	7.04 GJ / año

Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que los datos de la tabla 12 son una estimación promedio que puede variar de una mina a otra en función de distintos factores. Además, los promedios calculados para 2023 aumentarán en el tiempo en razón de la disminución de la ley mineral. A su vez, se debe aclarar que éstos son sólo algunos indicadores seleccionados, ya que el impacto de la actividad minera es mucho más amplio que el aquí representado, pues implica entre otros daños graves: impactos a la salud (ver sección 3.6), ruptura del tejido social, aumento de la violencia, despojo y desplazamiento forzado, por mencionar algunos ejemplos.

Incluso con estas limitaciones, los promedios obtenidos pueden servir para generar una estimación de lo que implicaría mínimamente la extracción de los volúmenes de cobre de los proyectos mineros presentados en la sección 4.2, y de las reservas totales estimadas en México. Este cálculo se presenta en la tabla 13.

TABLA 13. Estimaciones de los impactos promedio de la extracción de los proyectos y reservas de cobre en México

	Minas en proyecto (361,530 toneladas de cobre)	Reservas (53 millones toneladas de cobre)
Ocupación territorial	144.6 km ²	21,200 km ²
Consumo de agua	66.15 hm ³ / año	9,699 hm ³ / año
Emisiones CO₂e	3.39 millones de toneladas de CO ₂ e	498 millones de toneladas de CO ₂ e
Electricidad	9.91 millones de GJ / año	1,452 millones de GJ / año
Diésel	6.83 millones de GJ / año	1,000 millones de GJ / año
Gas natural	2.55 GJ / año	373 millones de GJ / año

Fuente: elaboración propia.

Aunque estos cálculos son tan sólo indicativos, nos dan una idea de la inviabilidad de seguir apostando al crecimiento frenético del extractivismo. Por ejemplo, el consumo eléctrico del conjunto de proyectos mineros equivaldría cada año al consumo eléctrico total actual de un estado como Zacatecas. Más aún, explotar todas las reservas de cobre existentes en México implicaría la destrucción de un territorio similar a la superficie total del estado de Hidalgo. En el caso del agua, hay que recordar que las áreas con potencial minero de cobre se encuentran en la región más árida del país, que en muchos casos ya experimenta estrés hídrico.

5. Conclusiones





5. Conclusiones

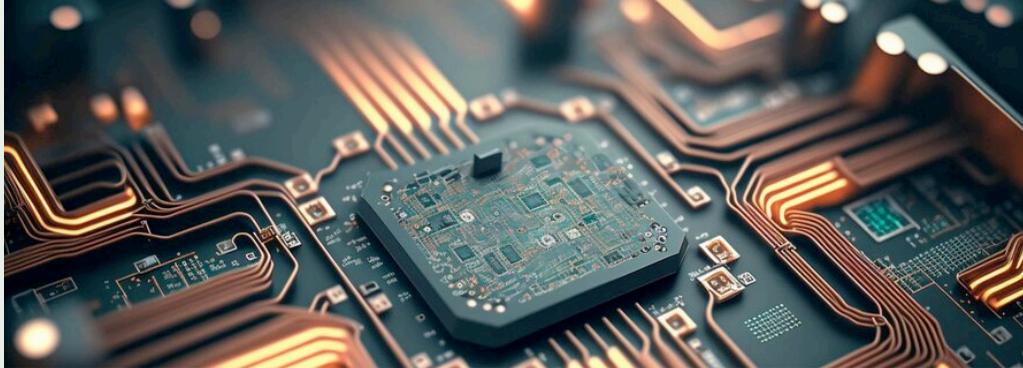
En este trabajo hemos analizado de manera general la situación de la extracción de cobre a nivel global y, de manera particular, en México. El cobre es un mineral fundamental del sistema industrial moderno, y su extracción enfrenta varios desafíos en el contexto de la llamada transición energética hegemónica. La demanda de cobre está en aumento debido a su papel esencial en la electrificación y el despliegue masivo de fuentes renovables impulsadas en los escenarios de crecimiento verde de las agencias internacionales y algunos gobiernos del norte global. La minería y el procesamiento de cobre son altamente intensivos en energía y requieren grandes volúmenes de agua, además de tener un alto impacto ambiental y sobre la salud de las comunidades aledañas a las minas.

El incremento de la demanda ocurre en un momento en que la industria minera en todo el mundo enfrenta una disminución de la ley mineral, debido a que los yacimientos más ricos y accesibles se descubren y agotan primero, dejando depósitos más profundos o menos ricos en el metal para la etapa siguiente de la explotación. La baja en la ley del cobre tiene como consecuencia un aumento de los costos de producción y mayores impactos ambientales. Con menor concentración de cobre, se necesita procesar más material para obtener la misma cantidad de metal, lo que implica mayores costos en energía, agua y reactivos químicos. Por otro lado, procesar un mayor volumen de material genera más residuos tóxicos, requiere más uso de agua y una mayor ocupación territorial.

Estas tendencias generales se observan con claridad en México, donde —a pesar de que la producción se ha estabilizado desde 2016— la ocupación territorial, el consumo de energía y las emisiones de GEI van en aumento.

Mantener la posición de México dentro del mercado mundial de cobre en el contexto del incremento de la demanda que plantean los escenarios de emisiones netas cero para 2050 implicaría una fuerte aceleración de la extracción de cobre. Esto no es viable, tanto por las condiciones geológicas y económicas —como el incremento de los costos sólo para mantener la producción—, como por los crecientes impactos socioambientales asociados —tales como la expansión de la minería a cielo abierto, incluso en áreas naturales protegidas, y los altos volúmenes de agua requeridos en regiones que ya experimentan estrés hídrico.

En México, al igual que en otros países de América Latina, gran parte del cobre es exportado para ser utilizado en países del norte global y China, sin representar un beneficio económico sustantivo para el país, ya que la industria minera extractiva en su conjunto representó el 1.12% del PIB y el 1% de la recaudación fiscal en 2023. En este contexto, en lugar de impulsar la exploración y explotación minera para competir en un mercado global de *commodities* o materias primas, que sin agregar valor sólo deja las externalidades en los países de extracción, es fundamental reformar la legislación minera nacional. Esta reforma debe enfocarse en minimizar los impactos sociales y ambientales, así como en incorporar estos costos en los impuestos y derechos que deban pagar las empresas mineras, para asegurar así que asuman a plenitud las consecuencias de sus actividades. Las necesidades tecnológicas de una transición “verde” no deben ser usadas como justificación para un renovado impulso al extractivismo minero. Es impostergable pasar de un modelo de desarrollo basado en un crecimiento continuo a una economía de la suficiencia que implique una extracción cada vez menor de materiales, una mayor tasa de reciclaje, un impacto decreciente sobre el territorio y la naturaleza, y una distribución más equitativa de los beneficios.



Listado de tablas

- TABLA 1.** Características de los yacimientos de cobre | 11
- TABLA 2.** Producción de cobre por país en 2023 | 16
- TABLA 3.** Reservas de cobre por país en 2022 en miles de toneladas | 21
- TABLA 4.** Producción de cobre por mina en 2023 | 30
- TABLA 5.** Cobertura del suelo en 2010 de la superficie ocupada por minas de cobre en 2023 | 37
- TABLA 6.** Consumo de electricidad y combustibles de 2020 a 2023 de la división minera de Grupo México en el país en gigajoules | 40
- TABLA 7.** Intensidad energética por fuente de energía de la división minera de Grupo México en el país de 2020 a 2023 en gigajoules/tonelada de cobre | 41
- TABLA 8.** Consumo energético de la división minera de Grupo México en el país y de la minería de cobre en Chile | 42
- TABLA 9.** Relación promedio entre emisiones y producción por mina de cobre para el periodo 2015-2023 | 50
- TABLA 10.** Producción, reservas y vida útil de las diez principales minas de cobre en México | 65
- TABLA 11.** Nuevos proyectos de cobre previstos en México | 66
- TABLA 12.** Impactos promedio de la extracción de una tonelada de cobre en México en 2023 | 67
- TABLA 13.** Estimaciones de los impactos promedio de la extracción de los proyectos y reservas de cobre en México | 68



Listado de figuras

- FIGURA 1.** Principales yacimientos de cobre en el mundo y su entorno geológico | 12
- FIGURA 2.** Producción de cobre por país de 2009 a 2023 en miles de toneladas | 16
- FIGURA 3.** Porcentaje de la producción mundial de cobre por país de 2009 a 2023 | 17
- FIGURA 4.** Evolución del precio del cobre de 1960 a 2023 con ajustes por la inflación | 18
- FIGURA 5.** Demanda de cobre por país en 2023 | 20
- FIGURA 6.** Reservas de cobre por país de 2009 a 2022 en miles de toneladas | 22
- FIGURA 7.** Reservas de cobre por país de 2009 a 2022 en porcentaje de las reservas totales | 22
- FIGURA 8.** Ubicación geográfica de las reservas mundiales de cobre y porcentaje de producción para 2019 | 23
- FIGURA 9.** Extracción y reciclaje de cobre en 2023 | 24
- FIGURA 10.** Disminución de la ley de cobre de la Corporación Nacional del Cobre de Chile de 1993 a 2022 | 26
- FIGURA 11.** Producción de cobre por minas en México de 2010 a 2023 | 29
- FIGURA 12.** Principales minas y producción de cobre por municipio en México en 2023 | 32
- FIGURA 13.** Producción de cobre por entidad federativa en 2023 | 32
- FIGURA 14.** Producción de cobre por empresas en 2023 | 33
- FIGURA 15.** Producción minera por municipio | 34
- FIGURA 16.** Superficie ocupada por minas de cobre y producción anual | 35
- FIGURA 17.** Toneladas de cobre promedio extraídas por hectárea en México | 36
- FIGURA 18.** Cobertura del suelo en 2010 de la superficie ocupada por minas en 2023 | 38

FIGURA 19. Consumo energético de la división minera de Grupo México en el país en 2023 | 40

FIGURA 20. Comparación de la intensidad energética de la división minera de Grupo México en el país y de la minería de cobre en Chile de 2020 a 2022 en gigajoules/tonelada de cobre | 43

FIGURA 21. Distribución del consumo promedio de agua por tonelada de cobre extraída para el periodo 2010-2023 | 45

FIGURA 22. Volumen vigente de agua concesionada y producción anual de cobre | 47

FIGURA 23. Relación entre producción de cobre y emisiones totales para el periodo 2015-2023 | 52

FIGURA 24. Emisiones anuales de gases de efecto invernadero reportadas por las minas de cobre para el periodo 2015-2023 | 54

FIGURA 25. Demanda de minerales actual y para 2050 para las tecnologías “limpias” según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía | 60

FIGURA 26. Aumento previsto de la demanda de cobre entre 2023 y 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía en volúmen y por tipo de uso final | 60

FIGURA 27. Demanda de cobre por tipo de uso en 2023 y en 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía | 61

FIGURA 28. Aumento previsto de la demanda de cobre entre 2023 y 2050 según los distintos escenarios de la Agencia Internacional de Energía en volúmen y tasa de crecimiento | 62

FIGURA 29. Producción de cobre de 2009 a 2023 en México y producción necesaria para cumplir con los escenarios de aumento de la demanda de la Agencia Internacional de Energía | 64

FIGURA 30. Evolución de la producción de cobre en las cinco minas principales de México de 2019 a 2023 | 65



Referencias

- ATSDR (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades) (2016). Resúmenes de salud pública. *Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs5.html#:~:text=Respirar%20aire%20con%20niveles%20muy,altos%20puede%20producir%20enfermedad%20renal
- Banco Mundial. (2024). *World Bank Commodities Price Data (The Pink Sheet)* [Archivo de datos]. Recuperado de <https://thedocs.worldbank.org/en/doc/5d903e848db1d1b83e0ec8f744e55570-0350012021/related/CMO-Historical-Data-Annual.xlsx>
- Camimex (Cámara Minera de México) (s.f.). Informe anual. *Camimex*. <https://www.camimex.org.mx/index.php/publicaciones/informe-anual>
- _____. (2024). *Informe Anual Camimex 2024. Minería mexicana: Impulsando el presente, construyendo el futuro*. Camimex. https://www.camimex.org.mx/application/files/4417/2296/7578/00_InfoCamimex2024-completo-2.pdf
- Cochilco (Comisión Chilena del Cobre) (2024). *Informe de Tendencias del Mercado del Cobre. Proyecciones 2024-2025. Primer trimestre de 2024*. Cochilco. <https://www.cochilco.cl/web/download/865/2024/11605/informe-de-tendencias-del-mercado-del-cobre-proyecciones-2024-2025-primer-trimestre-de-2024.pdf>
- _____. (2022). *Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2022*. Cochilco. <https://www.cochilco.cl/web/sustentabilidad/>
- _____. (s.f.). Publicaciones - estudios especializados - metales e insumos críticos. *Cochilco*. <https://www.cochilco.cl/web/sustentabilidad/>

- Codelco-Cochilco (Corporación Nacional del Cobre de Chile y Comisión Chilena del Cobre) (2024). *Ex-Ante*. La caída de la producción de cobre y el desafío del sector. <https://www.ex-ante.cl/la-caida-de-la-produccion-de-cobre-y-el-desafio-del-sector-por-maria-cristina-betancour/>
- Comités de Cuenca del Río Sonora (2022). El camino hacia la verdad tras 8 años de impunidad en el Río Sonora. *Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (Poder) Latam*. <https://poderlatam.org/2022/08/el-camino-hacia-la-verdad-tras-8-anos-de-impunidad-en-el-rio-sonora/>
- Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Minera, de la Ley de Aguas Nacionales, de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, en materia de concesiones para minería y agua (8 de mayo de 2023). Diario Oficial de la Federación, 8 de mayo de 2023. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5688050&fecha=08/05/2023#gsc.tab=0
- EJAtlas (2022). Mina “El Arco” de Grupo México en El Valle de los Cirios, Baja California, México. *EJAtlas*. <https://ejatlas.org/conflict/mina-de-grupo-mexico-en-el-valle-de-los-cirios-baja-california-mexico>
- Ferrari, L. (2020). Pico del petróleo y fin del crecimiento: Una mirada retrospectiva. *América Latina en Movimiento* 550, 15-18. <https://www.alainet.org/es/articulo/209972>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Bryan, S.E., Lopez-Martinez, M. y Silva-Fragoso, A. (2018). Cenozoic magmatism and extension in western Mexico: Linking the Sierra Madre Occidental silicic large igneous province and the Comondú Group with the Gulf of California rift. *Earth-Science Reviews* 183, 115-152.
- Forbes (2024). La IA puede incrementar la demanda de cobre en un millón de toneladas para 2030: Trafigura. *Forbes*. <https://www.forbes.com.mx/la-ia-puede-incrementar-la-demanda-de-cobre-en-un-millon-de-toneladas-para-2030-trafigura/>
- Grupo México (s.f.). Informes y folletos. *Grupo México*. <https://www.gmexico.com/Pages/Desarrollo.aspx>
- Hammarstrom, J.M., Zientek, M.L., Parks, H.L. y Dicken, C.L. (2021). *Assessment of undiscovered copper resources of the world, 2015*. United States Geological Survey (USGS), Scientific Investigations Report, 2018-5160, versión 1.2, December 2021. <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20185160>

- Hayes, T.S., Cox, D.P., Piatak, N.M. y Seal, R.R. (2015). *Sediment-hosted stratabound copper deposit model*. USGS. Scientific Investigations Report, 2010-5070-M. <https://pubs.usgs.gov/publication/sir20105070M>
- He, M., Wang, Z. y Tang, H. (1997). Spatial and temporal patterns of acidity and heavy metals in predicting the potential for ecological impact on the Le An river polluted by acid mine drainage. *Science of The Total Environment* 206(1), 67-77. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(97\)00217-9](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(97)00217-9)
- Herrera, R., Berger, U., Von Ehrenstein, O., Díaz, I., Huber, S., Moraga Muñoz, D. y Radon, K. (2018). Estimating the Causal Impact of Proximity to Gold and Copper Mines on Respiratory Diseases in Chilean Children: An Application of Targeted Maximum Likelihood Estimation. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010039>
- ICA (International Copper Association) (2017). The electric vehicle market and copper demand. *International Copper Association*. <https://internationalcopper.org/wp-content/uploads/2017/06/2017.06-E-Mobility-Factsheet-1.pdf>
- ____ (2022). Copper: the material of choice for vehicle manufacturers. *International Copper Association*. <https://internationalcopper.org/resource/copper-the-material-of-choice-for-vehicle-manufacturers/>
- IEA (International Energy Agency) (2024a). *Global Critical Minerals Outlook 2024*. IEA Publications. <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2024>
- ____ (2024b). *Critical Minerals Dataset*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/critical-minerals-dataset>
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua) (2023). El agua de laboreo en el contexto de la actividad minera en México. *Agua y Minería*. IMTA. <https://aguaymineria.imta.mx/mineria/laboreo>
- Izidorczyk, G., Mikula, K., Skrzypczak, D., Moustakas, K., Witek-Krowiak, A. y Chojnacka, K. (2021). Potential environmental pollution from copper metallurgy and methods of management. *Environmental Research* 197, 111050. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111050>
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray, Floyd, Graybeal, F.T., Mars, J.C., McPhee, D.K., Seal, R.R., Taylor, R.D. y Vikre, P.G. (2010). Chapter B of Mineral deposit models for resource assessment. *Porphyry copper deposit model*. USGS. Scientific Investigations Report, 2010-5070-B. <http://pubs.usgs.gov/sir/2010/5070/b/>

- Kaur, M., Sharma, P., Kaur, R. y Khetarpal, P. (2021). Increased incidence of spontaneous abortions on exposure to cadmium and lead: a systematic review and meta-analysis. *Gynecological Endocrinology* 38(1), 16-21. <https://doi.org/10.1080/09513590.2021.1942450>
- Michaux, S.P. (2021). *The mining of minerals and the limits to growth*. Espoo: Geological Survey of Finland. https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/16_2021.pdf
- Mudd, G.M. (2009). *The sustainability of mining in Australia: key production trends and their environmental implications for the future*. Melbourne: Department of Civil Engineering, Monash University and Mineral Policy Institute.
- Mudd, G. y Weng, Z. (2012). Base Metals. En: Letcher, T.M. y Scott, J.L. (eds.), *Materials for a Sustainable Future*. Londres: Royal Society of Chemistry, 11-59. <https://doi.org/10.1039/9781839168949>
- Ndilila, W., Callan, A.C., McGregor, L.A., Kalin, R.M. y Hinwood, A.L. (2013). Environmental and toenail metals concentrations in copper mining and nonmining communities in Zambia. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 217(1), 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2013.03.011>
- Norgate, T. y Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production* 18(3), 266-274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.020>
- Nuss, P. y Eckelman, M.J. (2014). Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PLoS One* 9(7), e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>
- Park, J.W., Campbell, I.H., Chiaradia, M., Hao, H. y Lee, C.T. (2021). Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nature Reviews Earth & Environment* 2(8), 542-557. <https://www.nature.com/articles/s43017-021-00182-8>
- Pereira, W., Junio, S., Da Silveira, W., Santos, E., Caixeta, G., Marques, O., Bastos, C., Nunes, Y. y Rodrigues, A. (2021). Impact of copper mining wastes in the Amazon: Properties and risks to environment and human health. *Journal of Hazardous Materials* 421. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126688>
- Poma, P.A. (2008). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de la Facultad de Medicina* 69(2), 120-126. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1025-55832008000200011&lng=es&tling=es

- Salas, F.B., Guadarrama, P., Fernández, G. y González, J.F. (2020). Predicción de drenaje ácido de mina, jales de la mina La Prieta, Chihuahua, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 36(4), 825-834. <https://doi.org/10.20937/rica.53523>
- Schlesinger, M., King, M., Sole, K. y Davenport, W. (2011). *Extractive Metallurgy of Copper* (5ta ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Shaheen, N., Ahmed, K. e Islam, S. (2016). Health risk assessment of trace elements via dietary intake of 'non-piscine protein source' foodstuffs (meat, milk and egg) in Bangladesh. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 7794-7806. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-6013-2>
- Sonter, L.J., Dade, M.C., Watson, J.E. y Valenta, R.K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature communications* 11(1), 4174. <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17928-5>
- USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos) (2024). Copper. *Mineral Commodity Summaries*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-copper.pdf>
- ____ (2022). Copper. *Mineral Commodity Summaries*. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-copper.pdf>
- Valdés, J., Reyes, A.E., Navarrete, E. y Canún, S. (2017). Bajo peso al nacer y defectos congénitos en relación con sitios mineros y campos agrícolas en Sonora, México. Prevalencia 2008-2012. *Región y Sociedad* no. especial 5. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.0.a290>
- Valero, A., Valero, A. y Calvo, G. (2021). *Material limits of the energy transition*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78533-8>
- Volke, T., Velasco, A. y De la Rosa, A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. Ciudad de México: INE.

