



Desentrañando la Industria del Cobre: Fundición, Refinería y Desafíos Futuros

**Centro de Estudios Mineros y
Documentación SONAMI - CEMS**

Junio 2024

SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA



SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

La propiedad intelectual de este documento corresponde a la Sociedad Nacional de Minería F.G.(SONAMI). Cualquier forma de explotación de esta obra, en especial su uso, reproducción, distribución, comunicación pública o transformación, solo puede ser realizada con la autorización de su titular, salvo las excepciones previstas por la ley. La Sociedad Nacional de Minería F.G. se reserva el ejercicio de las acciones legales correspondientes para el caso de incumplimiento de la Ley N° 17.336 de Propiedad Intelectual.

En nuestra vida diaria, utilizamos una gran variedad de metales como el cobre, la plata y el oro, los cuales provienen de yacimientos minerales bajo tierra. Estos recursos son extraídos mediante distintos métodos y luego procesados en plantas especializadas, donde se someten a procesos de reducción de tamaño, molienda y flotación para obtener concentrados con contenidos de cobre, plata y oro. Estos materiales son sometidos a los procesos de fundición y refinación para capturar los minerales. **Este complejo proceso se lleva a cabo gracias a la metalurgia extractiva**, una disciplina que se encarga de estudiar y desarrollar métodos para separar y concentrar selectivamente los metales de interés, listos para su posterior utilización.

En este artículo, nos enfocaremos en profundizar en los procesos de metalurgia extractiva del cobre, el metal emblemático de Chile, además de ofrecer una visión general de la industria de fundición y refinación tanto a nivel nacional como internacional. Desde el concentrado hasta los distintos grados de pureza, como el cobre blíster, ánodos y cátodos, la cartera de productos derivados de la minería del cobre será abordada en detalle.

La metalurgia extractiva corresponde a una disciplina crucial en la industria minera y tiene como objetivo la obtención de metales a partir de distintos minerales. En el caso del cobre, lo más común es encontrarlo en minerales oxidados y sulfurados, los cuales difieren en sus procesos de concentración debido a la naturaleza de su composición química. De manera general, **existen 2 líneas de procesamiento: la hidrometalurgia, que se emplea para minerales oxidados, y la pirometalurgia, que es el proceso utilizado en minerales sulfurados.**

Conminución de minerales: el común denominador

El proceso metalúrgico comienza con la conminución del mineral. El chancado, como parte integral de este proceso, tiene por objetivo principal la reducción primaria del tamaño del mineral extraído de la mina, el cual puede presentar una granulometría variada, desde unos milímetros, a más de 40 pulgadas. Generalmente, el chancado se lleva a cabo en tres etapas: primaria, secundaria y, en casos específicos, terciaria. En la etapa primaria, el mineral se reduce a un tamaño aproximado de 8 pulgadas. Luego, en la etapa secundaria, se reduce aún más el tamaño a alrededor de 3 pulgadas. Finalmente, si es necesario, en la etapa terciaria, se reduce el tamaño del mineral a aproximadamente $\frac{1}{2}$ pulgada.

Una vez se ha obtenido el mineral chancado con la granulometría deseada, continúa su proceso según su tipo de mineralogía y los métodos de procesamiento específicos requeridos.

Hidrometalurgia – el camino del mineral oxidado

Los minerales oxidados siguen la línea hidrometalúrgica en su proceso de extracción de cobre. Una vez chancado, el mineral se somete al proceso de aglomerado y apilado. Dependiendo del tamaño y producción de la operación minera, estas pilas varían en extensión,

y pueden llegar a apilarse desde 300 hasta 150.000 toneladas de mineral por día, como es el caso de grandes operaciones como Radomiro Tomic y El Abra.

Las pilas de lixiviación son regadas con una solución acuosa compuesta principalmente por agua y ácido sulfúrico, que disuelve el cobre formando una solución rica llamada *Pregnant Leach Solution*, o PLS. Esta solución puede tener una concentración fuerte de cobre (30-50 gramos de cobre por litro), la cual pasa directamente a electro obtención, o una concentración débil (<10 gramos de cobre por litro), que requiere una etapa adicional de concentración. El tamaño de la partícula de mineral influye en el tiempo que tarde el metal en disolverse en la solución lixivante (CODELCO EDUCA, 2024).

La concentración adicional se realiza mediante extracción por solventes, proceso en el cual se lleva a cabo un intercambio iónico líquido utilizando un agente orgánico inmiscible con el agua, como benceno, kerosene o cloroformo. Esta solución ya tiene la concentración necesaria para continuar a la siguiente etapa.

La solución obtenida de la extracción por solventes, con un alto contenido de sulfato de cobre, y la solución PLS con concentración fuerte se depositan en celdas electrolíticas que contienen en su interior un ánodo y cátodo por los cuales circula una corriente eléctrica de baja intensidad, lo que provoca la electrólisis. De este modo, el cobre se deposita en el cátodo, alcanzando pureza del 99,5 a 99,99% de cobre al final del proceso (CODELCO EDUCA, 2024). Este proceso se conoce como *Electrowinning*, o EW.

Pirometalurgia – el camino del mineral sulfurado

La pirometalurgia es el proceso tradicional para el procesamiento de minerales sulfurados. A diferencia de la hidrometalurgia, comprende varios subprocesos que incluyen la concentración del mineral, la fundición del concentrado y la refinación del metal. Estos subprocesos están diseñados para producir cátodos de cobre con una pureza excepcional del 99,99%.

Etapas clave de la Concentración: Molienda y Flotación

Después del chancado, los minerales sulfurados continúan su proceso metalúrgico con la molienda. El objetivo de esta etapa es continuar reduciendo el tamaño del mineral para lograr una mayor liberación del metal. Esta etapa se realiza al interior de molinos (de barras, bolas o SAG), a los cuales se les agrega agua para lograr una granulometría cercana a los 0,18 milímetros y un contenido de sólidos del 65-70%. Una vez alcanzados estos parámetros, la mezcla resultante se acondiciona hasta obtener una pulpa con un contenido de sólidos entre el 25-35%.

La pulpa resultante del proceso de molienda ingresa a la planta de concentración. En esta se busca aumentar la concentración del metal de interés, en este caso el cobre. Para esto, se utiliza

la flotación, un proceso fisicoquímico que implica el uso de distintos tipos de celdas o columnas en las cuales ingresa la pulpa y, además, se inyecta aire. La idea es generar burbujas para que las partículas de cobre que se encuentran disueltas en la pulpa se adhieran a estas y logren flotar hacia la superficie.

La capacidad de adhesión a las burbujas depende de las propiedades hidrofílicas (afinidad con el agua) y aerofílicas (afinidad con el aire) de las partículas, las cuales son influenciadas por reactivos como colectores (que otorgan propiedades hidrófobas, favoreciendo la flotación), depresores (con efecto contrario al de los colectores, para minerales no deseados) y espumantes (que generan burbujas estables). El resultado es un concentrado con un contenido de cobre cercano al 30%, acompañado de otros metales de gran valor, como el molibdeno, oro y plata, entre otros (CODELCO EDUCO, 2024). Este concentrado es uno de los principales productos de exportación de la minería del cobre chilena.

El consumo de agua en este proceso de concentración es de gran relevancia. En la actualidad, el 33% del agua utilizada en los procesos mineros proviene de plantas desalinizadoras, mientras que un 66% corresponde aguas continentales. Dadas las condiciones de sequía que atraviesa actualmente el país, las empresas mineras han disminuido el uso de agua continental en sus operaciones (COCHILCO, 2023). Resultaría interesante explorar el impacto en el consumo energético y en los costos operacionales, de la posibilidad de emplear agua de mar sin tratamiento previo.

Al residuo de la concentración se le llama relave. En la actualidad, los relaves son objeto de investigación con el fin de encontrar nuevos usos que permitan su reutilización. Estos van desde la recuperación de metales remanentes y agua, hasta la creación de materiales para la construcción, entre otras aplicaciones. Ejemplos de esto incluyen operaciones como las de Minera Valle Central, que procesan relaves provenientes de División Teniente, y proyectos como T2Cm, que buscan transformar los relaves mineros en materiales de construcción seguros y sostenibles.

Es importante prestar atención a los retos que afrontan las plantas concentradoras, como la “permisología” ambiental, mejora operacional, gestión del recurso humano y la gestión de recursos críticos como energía y agua. Esto resulta de particular interés al considerar que se espera un aumento de la producción de concentrado a nivel nacional, debido principalmente a la disminución de minerales oxidados y a la mayor presencia de minerales sulfurados en los yacimientos mineros.

Fundición y Refinería: FURE

Una vez obtenido el concentrado, se lleva a cabo la etapa de fundición, que comienza con la toma de muestras para determinar ciertas características de este, como su contenido de cobre, hierro, azufre y humedad, entre otros. El concentrado se seca para eliminar la mayor cantidad de humedad, alcanzando valores cercanos al 0,1% de humedad.

Después, avanza a la fase de fusión, donde se expone a una temperatura de alrededor de 1200°C. Esto da lugar a una fase líquida en la que, gracias a las variadas densidades de los metales, se produce una separación natural de las fases. Dado que el cobre es más denso, tiende a depositarse en el fondo.

Posteriormente, se procede a la conversión, durante la cual, mediante la adición de reactivos, se logra separar aún más el cobre, obteniendo cobre blíster con una pureza de aproximadamente 95-96%, junto con una escoria. Esta última a menudo continúa su proceso en un Horno de Limpieza de Escoria (HLE) para recuperar el cobre u otros metales de valor aún presentes (CODELCO EDUCO, 2024). A pesar de que los HLE continúan recuperando valor de la escoria, esta sigue representando un volumen considerable como subproducto. Por lo tanto, es necesario continuar investigando y buscando nuevos usos para este subproducto, a través de la investigación, el desarrollo y la innovación (I+D+i). Hasta el momento, se tienen proyectos de investigación, como el uso de escorias de cobre en mezclas asfálticas en caliente (Nazer, Castillo, López, Ortiz, & Pavez, 2021), así como proyectos para recuperar el hierro presente en la escoria, un material ampliamente utilizado (Minería Chilena, 2022).

En cuanto al cobre blíster obtenido, continúa su proceso con la refinación, la cual se divide en dos partes. Primero, se lleva a cabo la pirometalurgia, donde el blíster se somete a los hornos anódicos para reducir el oxígeno presente en el metal fundido, obteniendo ánodos con una pureza de 99,5-99,7%. Posteriormente, para obtener cátodos con una pureza del 99,99%, se realiza una segunda etapa de refinación conocida como electrolisis. En este proceso, el ánodo se disuelve mediante la aplicación de una corriente eléctrica en celdas electrolíticas, donde se disponen de manera intercalada ánodo y cátodo, permitiendo que el cobre se deposite en forma de cátodo listo para su comercialización (CODELCO EDUCO, 2024). Como subproducto, se genera barro anódico.

Las fundiciones en diferentes partes del mundo utilizan el barro anódico para la recuperación de metales nobles como el cobre, oro, plata y selenio, entre otros. Sin embargo, es crucial investigar y determinar cómo se maneja este subproducto a nivel nacional. La recuperación del valor presente en estos barros y el pago del contenido valioso resultante al exportar el concentrado son aspectos que necesitan ser evaluados con mayor detalle en las prácticas industriales y comerciales del sector minero chileno.

En la actualidad, se están explorando líneas de investigación en procesos alternativos, como la lixiviación clorada, que permite el procesamiento de sulfuros mediante la hidrometalurgia, y la biolixiviación, que emplea bacterias en la extracción de metales de los minerales (Minería Chilena, 2022). Estas innovaciones podrían conducir a una minería más limpia y sustentable al optimizar el uso de recursos críticos como la energía y el agua. Un ejemplo destacable es el proyecto de biolixiviación de sulfuros llevado a cabo por BHP, en Minera Escondida, que resultó en una producción de 36.000 toneladas de cátodos, en 2006 (Revista Nueva Minería y Energía, 2021). Además, permitiría utilizar la capacidad instalada para procesar minerales de cobre

oxidados que podría quedar sin uso debido a la caída en la explotación de óxidos de cobre y al aumento de los minerales sulfurados.

Chile en la industria de fundición y refinería

La posición de Chile como el principal productor mundial de cobre mina, respaldada por sus vastas reservas de este metal, le confiere una posición estratégica en la industria del cobre, especialmente en el contexto de la transición hacia una economía más sostenible y la lucha contra el cambio climático. Según estudios como "The Future of Copper" (2022) de S&P Global, se espera un aumento significativo en la demanda de cobre, estimada en 49 millones de toneladas métricas en 2035 y 53 millones de toneladas en 2050. Esto implica la necesidad de incrementar la producción de manera acelerada para satisfacer dicha demanda proyectada.

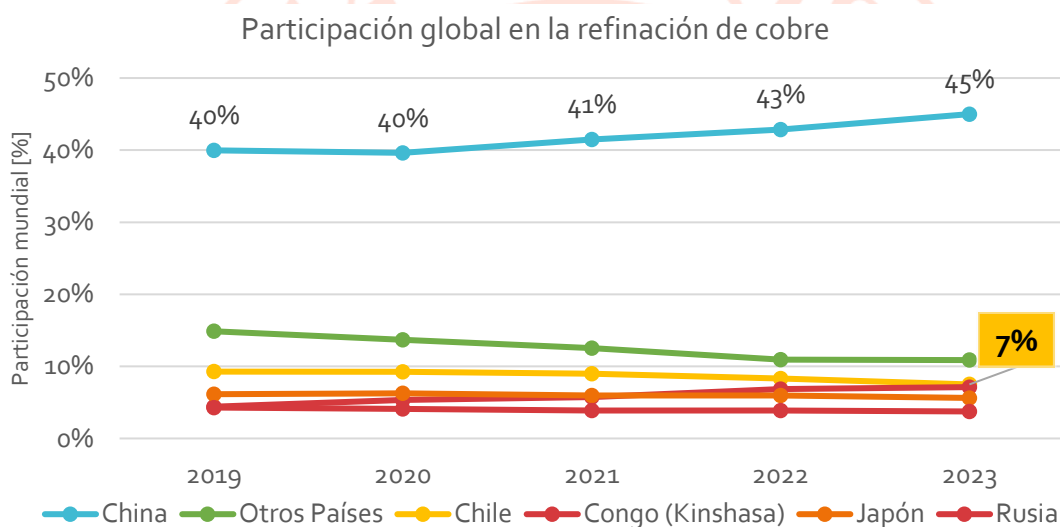
Por otro lado, según la publicación de CESCO "Cobre Refinado- un buen negocio para Chile" (2020), se estima que para 2035, aproximadamente el 5% de la producción de cobre nacional provendrá de minerales oxidados, en comparación con el 28% que representaban en 2019. Este cambio sugiere un aumento significativo en la producción de cobre a partir de minerales sulfurados, los cuales son tratados mediante la vía pirometalúrgica. Esta transformación en la composición de los minerales procesados, resalta la necesidad de desarrollar y fortalecer la industria de fundición y refinería en Chile, así como de explorar alternativas al procesamiento de minerales sulfurados, como la biolixiviación o la lixiviación en distintos tipos de medio.

Sin embargo, este potencial aumento en la extracción de minerales sulfurados también plantea desafíos significativos, especialmente en términos del uso de recursos como el agua y la energía. El proceso de concentración del mineral, que incluye las etapas de chancado, molienda, flotación, clasificación y espesamiento, consume una cantidad considerable de agua y energía. Según COCHILCO en 2022, el proceso de concentración representó el 76,2% del consumo total de agua en la minería de cobre, con un flujo promedio de 13,78 metros cúbicos por segundo, y el 28% del consumo total de energía (combustible y electricidad) en el sector, siendo responsables del 52% de la electricidad total utilizada en la minería. Estos desafíos deben abordarse con suma urgencia para asegurar una producción sostenible y eficiente de cobre en el futuro.

SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

A primera vista, podría parecer que Chile es un líder destacado en la industria de la fundición y refinación debido a su posición como uno de los principales productores de cobre en el mundo. Si se observa el ranking, esto pareciera confirmarse, ya que desde al menos 2019 ha mantenido consistentemente el tercer lugar en la producción de cobre refinado, según cifras de USGS (2024). Sin embargo, es importante analizar su participación en términos porcentuales respecto al total de cobre refinado producido a nivel mundial. Resulta impactante observar que su participación ha disminuido del 9%, en 2019, al 7% en, 2023, como se observa en la Figura 1.

Figura 1. Porcentaje de participación global en la refinación de cobre top 6 países productores de cobre refinado periodo 2019-2023.



Fuente: Elaboración propia en base a USGS.

Esta disminución es aún más notable cuando se compara con la producción de China, que ha aumentado del 40% al 45%, en el mismo periodo. Además, la R. D. del Congo ha experimentado un aumento del 4% al 7%, cifras que resultan interesantes, especialmente considerando que su producción de cobre mina también ha aumentado rápidamente, acercándose a la producción de Perú.

La posición de China resulta ser dominante en lo que respecta capacidad de fundición y refinación. De acuerdo con la actualización de 2022 del “Informe de mercado de Fundiciones” de COCHILCO y su “Anuario de estadísticas del cobre y otros metales”, los cargos de tratamiento (TC) y cargos de refinación (RC) en China son los más bajos a nivel mundial, con un costo directo de 59 dólares por tonelada de concentrado, muy por debajo de la media mundial de 114 dólares por tonelada de concentrado. Esto es aún más notable frente a los 211 dólares por tonelada de concentrado en Chile. Además, cabe destacar que China importa el 56% del cobre que se comercializa a nivel internacional (Ministerio de Minería, 2023).

Estos datos no son sorprendentes si consideramos que China cuenta con 25 fundiciones que, además, están equipadas con tecnología avanzada y se mantienen a la vanguardia en los procesos de pirometalurgia (Ministerio de Minería, 2023). Con una capacidad instalada de 29

millones de toneladas métricas de concentrado anual, China supera considerablemente a Chile, que cuenta con solo 5 fundiciones (Chuquicamata, Caletones y Potrerillos, de CODELCO; Hernán Videla Lira, de Enami; y las privadas Chagres, de Anglo American, y Altonorte, de Glencore), con un costo promedio de 222 dólares por tonelada de concentrado para las fundiciones estatales (Ministerio de Minería, 2023).

Resulta significativo destacar que dos fundiciones en Chile han sido paralizadas recientemente. Ventanas apagó sus hornos y calderas de manera permanente el 31 de mayo del 2023, principalmente debido al impacto ambiental declarado en la zona de Quintero. Posteriormente, la fundición Hernán Videla Lira detuvo sus operaciones el 23 de febrero pasado, a la espera de la aprobación de su proyecto de modernización. Este proyecto contempla duplicar su capacidad instalada hasta alcanzar las 192.000 toneladas de ánodos de cobre anuales y 700.000 toneladas de concentrados anuales, junto con la implementación de equipos de última tecnología en eficiencia y captura de gases (ENAMI, 2024).

Desafíos y oportunidades

La “Estrategia Nacional para el Fortalecimiento de la Capacidad de Fundición y Refinería” (FURE) en Chile, publicada en 2023 (Ministerio de Minería, 2023), es una iniciativa clara que reconoce el valor estratégico de esta industria para el país. El fortalecimiento de la capacidad de FURE no solo impulsa la creación de empleo y los encadenamientos productivos, sino que también agrega valor a la industria minera nacional. Es importante destacar que el cobre desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático y la transición energética, lo que aumenta la relevancia de esta estrategia.

Es fundamental considerar el riesgo asociado a la alta concentración de la producción de cobre refinado en pocos actores a nivel mundial. Fortalecer la posición y capacidad de FURE en Chile no solo contribuiría a mitigar este riesgo, sino que también promovería la inversión en tecnologías sostenibles, lo que resultaría en una industria más ambiental y socialmente responsable.

Chile debe asumir una postura respecto a las fundiciones existentes, ya que estas operan principalmente según los intereses de las empresas propietarias, sin considerar que al menos 350,000 toneladas de cobre provenientes de la mediana y pequeña minería quedarían sin opciones de fundición nacional. Además, muchas de estas fundiciones son instalaciones antiguas con costos operativos más altos que los de sus competidoras internacionales, lo que las pone en riesgo de quedar fuera de competencia.

En este contexto, a mediano y largo plazo, el cobre chileno podría enfrentarse a costos de TC/RC mucho más altos que los actuales. Actualmente, los TC/RC representan aproximadamente \$0,25 por libra, lo que equivale al 6% del precio actual del cobre. Históricamente, la industria minera ha experimentado recargos en los TC/RC vinculados al precio del cobre (conocidos como "Price Participation"), que han encarecido significativamente estos

costos, llegando a representar entre un 10% y 12% del precio del cobre. La alta concentración de fundiciones en China podría llevar a que estas dominen el mercado global y se transformen en un "monopsonio" (mercado dominado por compradores), incrementando los TC/RC y capturando nuestra producción.

Además, el fortalecimiento de la capacidad de FURE en Chile podría abrir nuevas oportunidades para el desarrollo de la pequeña, mediana y gran minería nacional, así como para convertirse en una alternativa para fundir y refinar concentrados provenientes de otros países de América Latina, como Perú. Esto no solo reduciría la huella de carbono asociada al transporte de concentrados a las FURE en Asia, sino que también contribuiría a la eficiencia en términos hídricos y energéticos.

En resumen, fortalecer la capacidad de fundición y refinación en Chile es crucial para el desarrollo de la industria minera nacional. Esto no solo apoyará el crecimiento económico y la creación de empleo, sino que también permitirá que Chile mantenga una posición competitiva en el mercado global del cobre y un papel clave en la lucha contra el cambio climático.



SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

Referencias

- COCHILCO. (2023). Informe de actualización del consumo energético de la minería del cobre al año 2022.
- COCHILCO. (Agosto de 2022). Informe Mercado de Fundiciones Actualización 2022.
- COCHILCO. (2023). Agua en la minería del cobre, Actualización al año 2022. 16. Chile: Ministerio de Minería. Recuperado el Mayo de 2024, de <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Agua%20en%20la%20miner%C3%ADa%20del%20cobre.pdf>
- COCHILCO. (2023). *Emisiones GEI en la minería del cobre al 2022 y análisis del contexto actual*. Ministerio de Minería.
- CODELCO EDUCA. (11 de Marzo de 2024). *CODELCO Educa*. Obtenido de CODELCO Educa: <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/chancado.html>
- CODELCO EDUCA. (11 de Marzo de 2024). *CODELCO Educa*. Obtenido de CODELCO Educa: <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/lixivacion.html>
- CODELCO EDUCA. (11 de Marzo de 2024). *CODELCO Educa*. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- CODELCO EDUCA. (11 de Marzo de 2024). Electrorrefinación "Ánodos y cátodos se encuentran". Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/electrorrefinacion.html>
- CODELCO EDUCA. (11 de Marzo de 2024). Fundición. Obtenido de <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/fundicion.html>
- ENAMI (Dirección). (2024). *Proyecto Modernización Fundición Hernán Videla Lira* [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=5JrU2WwsEe8>
- Minera Valle Central. (11 de Marzo de 2024). MVC. Obtenido de <https://mineravallecentral.cl/>
- Minería Chilena. (27 de Diciembre de 2022). [+VIDEO] Proyecto apunta a recuperar hierro desde desechos de la fundición de cobre. Recuperado el 11 de Marzo de 2024, de <https://www.mch.cl/negocios-industria/video-proyecto-apunta-a-recuperar-hierro-desde-desechos-de-la-fundicion-de-cobre/>
- Minería Chilena. (16 de Febrero de 2022). *Minería Chilena Información confiable y oportuna*. Recuperado el 11 de Marzo de 2024, de <https://www.mch.cl/negocios->

industria/biolixiviacion-asi-funciona-la-tecnologia-que-utiliza-bacterias-para-extraer-metal/

Ministerio de Minería. (2022). *Política Nacional Minera 2050*. Biblioteca Nacional del Congreso.

Ministerio de Minería. (Julio de 2023). Estrategia Nacional para el fortalecimiento de la capacidad de Fundición y Refinería.

Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Recuperado el 2024, de <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Nazer, A., Castillo, M., López, A., Ortiz, L., & Pavez, O. (3 de Septiembre de 2021). Uso de escoria de cobre de un vertedero abandonado en mezclas asfálticas. *Use of copper slag from an abandoned landfill in asphalt mixes*. Recuperado el 11 de Marzo de 2024, de

Pontificia Universidad Católica de Chile. (28 de Diciembre de 2021). *Pontificia Universidad Católica de Chile- Noticias*. Recuperado el 11 de Marzo de 2024, de <https://www.uc.cl/noticias/investigadores-uc-transforman-relaves-del-cobre-en-materiales-de-construccion/>

USGS. (2024). Mineral Commodity Summaries, Copper.



SONAMI
SOC. NACIONAL DE MINERÍA

Trabajo elaborado por el Centro de Estudios y Documentación Mineros SONAMI (CEMS)

Patricio Monsalva
Analista Metalúrgico

Reinaldo Salazar
Subgerente de Estudios