



CIRCULARTEC®

**Análisis de Flujo
de Materiales
para la Minería
de Cobre en
Chile - Año 2023**
Octubre 2025



JEAN PAUL QUINTEROS BRISSO
PETAR OSTOJIC SALINAS
LUIS MARTÍNEZ CERNA





Centro Tecnológico de Economía Circular – CircularTec ©

Dirección: Serrano 145, oficina 301, edificio Econorte
Iquique-Chile
Tel: (+56) 552844097
www.circulartec.cl

Autores

Jean Paul Quinteros Brisso, economista y académico de la Facultad de Economía, Gobierno y Comunicaciones, Universidad Central

Petar Ostojic Salinas, fundador del Centro de Innovación y Economía Circular – CIEC – y CEO de Neptuno Pumps

Dr. Luis Martínez Cerna, director ejecutivo de CircularTec

Coordinación editorial

Marcela Mondaca Vera, CircularTec

Diseño

Alejandro Naves Tamborino, CircularTec

Cómo citar este documento:

Quinteros-Brisso, J., Ostojic, P., y Martínez-Cerna, L. (2025).
Análisis de flujo de materiales para la minería de cobre en Chile: año 2023. Santiago, Chile: CircularTec.

ISBN 978-956-08057-1-3 versión en línea

Las opiniones expresadas en esta publicación son de exclusiva responsabilidad de los autores y no representan necesariamente la postura de CircularTec.



**Análisis de Flujo
de Materiales
para la Minería
de Cobre en
Chile - Año 2023**
Octubre 2025

JEAN PAUL QUINTEROS BRISSO
PETAR OSTOJIC SALINAS
LUIS MARTÍNEZ CERNA

Contenido

Introducción	5
Contexto General	6
a. Economía Circular	6
b. Desafíos de los modelos económicos hacia la transición sostenible	11
c. Contexto y relevancia económica de la minería del cobre en Chile	12
Análisis de Flujo de Materiales (MFA)	13
a. MFA de recursos en la Minería de Cobre en Chile	13
b. Diagrama de Sankey	16
c. Principales resultados del MFA para la Minería de Cobre de Chile	18
d. Diagrama de Sankey - MFA de la Minería del Cobre de Chile año 2021	20
e. Remanufactura, industria 4.0 y el rol de los proveedores en la Economía Circular Minera	21
Comentarios Finales	22
Bibliografía	24



Introducción

La minería del cobre ha sido, históricamente, uno de los pilares estratégicos del desarrollo económico nacional, no solo por su contribución al producto interno bruto, sino también por su importancia en las exportaciones y en la generación de encadenamientos productivos con impacto territorial y social significativo. En el contexto actual global, marcado por el cambio climático, el endurecimiento regulatorio y los cada vez más crecientes requerimientos de sostenibilidad por parte de mercados e inversionistas, la industria enfrenta el desafío de evolucionar desde un modelo lineal de extracción, producción y disposición hacia esquemas más adelantados de gestión eficiente de recursos y economía circular.

Este espacio demanda métodos analíticos consistentes que permitan comprender el metabolismo físico de la minería del cobre y orientar decisiones estratégicas que fortifiquen la resiliencia, la competitividad y la integración de criterios ambientales, sociales y de gobernanza (ESG). En este sentido, el Análisis de Flujo de Materiales (Material Flow Analysis, MFA) se consolida como un método de referencia internacional para cuantificar, de forma sistémica y consistente, los flujos y existencias de materiales en sistemas complejos, tanto a nivel macroeconómico como sectorial. Aplicado a la minería del cobre en Chile, el MFA permite identificar, bajo el principio de conservación de la masa, las principales entradas de recursos (energía, agua, biomasa, metales, minerales y químicos), los procesos productivos clave (mina rajo y/o subterránea, concentradora, fundición, refinación, Lx/Sx/Ew y servicios) y las salidas asociadas a residuos, emisiones, aguas residuales y exportaciones. Este acercamiento, complementado con diagramas de Sankey, ofrece una visión integrada que facilita la detección de puntos críticos de ineficiencia material y de generación de externalidades ambientales a lo largo de la cadena de valor.

El análisis realizado desarrolla un MFA para la minería del cobre en Chile correspondiente al año 2023, a partir de la recopilación y análisis de información proveniente de fuentes oficiales y sectoriales, como la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), el Ministerio del Medio Ambiente, el Consejo Minero y otros organismos especializados. Sobre esta base, se cuantifican los flujos de materiales originados principalmente en la extracción doméstica, se evalúa su distribución entre los distintos procesos unitarios y se caracterizan los destinos finales, con especial énfasis en residuos sólidos, aguas residuales y emisiones de gases de efecto invernadero. La construcción del diagrama de Sankey permite sintetizar la complejidad del sistema en una representación visual, facilitando el análisis comparativo y la identificación de oportunidades de intervención prioritaria.

En conexión con la Política Nacional Minera 2050 y la Hoja de Ruta para la Economía Circular de Chile, esta investigación busca aportar evidencia cuantitativa y lineamientos analíticos que contribuyan al diseño de estrategias empresariales y políticas públicas orientadas a una minería baja en carbono, eficiente en el uso de recursos y socialmente responsable. El instrumento se ordena en secciones que abordan, en primer lugar, la mirada general de la economía circular y los desafíos de los modelos económicos frente a la transición sostenible; consecutivamente, se revisan los fundamentos teóricos y metodológicos del MFA y de los diagramas de Sankey; y, finalmente, se presentan los resultados del análisis aplicado a la minería del cobre en Chile, complementados con una reflexión sobre el papel de la remanufactura, la Industria 4.0 y los proveedores como facilitadores del cambio hacia la economía circular minera. Con ello, se aspira a que este estudio se transforme en un marco metodológico para la toma de decisiones estratégicas en empresas, organismos públicos y actores del ecosistema de innovación vinculados al sector minero.

Contexto General

a. Economía Circular

El cambio climático es uno de los desafíos más apremiantes que enfrenta la humanidad en el siglo XXI, cuyos efectos se extienden a diversas dimensiones de la vida, como la economía, la salud, el medio ambiente y la seguridad alimentaria.

Según el informe de Sir Nicholas Stern (2006), se estima que el costo de no tomar medidas para mitigar el cambio climático podría equivaler a una pérdida de al menos el 5% del PIB global anualmente, con proyecciones que podrían alcanzar hasta el 20% si se consideran riesgos más amplios (BioBilbao, 2023). Esta pérdida se debe a una combinación de factores, incluyendo desastres naturales, disminución de la productividad y aumento en el gasto en salud pública.

El cambio climático afecta directamente la productividad agrícola, dado que las variaciones en la temperatura y la precipitación pueden disminuir la producción de cultivos clave, lo que a su vez provoca un aumento en los precios de los alimentos. Por ejemplo, en América Latina, un aumento de 1°C en la temperatura media anual puede reducir la tasa de crecimiento del PIB per cápita en un punto porcentual (CEPAL, 2023). Esto es particularmente preocupante en países como Chile, donde la agricultura representa un sector económico relevante.



El aumento de las temperaturas y la contaminación del aire derivada del cambio climático están vinculados a un incremento en problemas de salud pública, por lo que se prevé que los gastos en salud aumenten significativamente debido a enfermedades relacionadas con el calor y condiciones respiratorias agravadas por la contaminación (BioBilbao, 2023). El Banco Mundial advierte que, si no se toman medidas urgentes, el cambio climático podría empujar a 100 millones de personas a la pobreza para el año 2030 (Iberdrola, 2019).

Los fenómenos climáticos extremos, como huracanes, sequías e inundaciones, están aumentando en frecuencia e intensidad debido al cambio climático, los cuales causan daños importantes a infraestructuras y economías locales. En Chile, por ejemplo, se estima que las pérdidas económicas por efectos climáticos podrían alcanzar hasta un 10% del PIB (Diario Financiero, 2024).

Sin perjuicio de lo anterior, es relevante considerar que el impacto del cambio climático no es uniforme, dado que los países más pobres son los más vulnerables y sufrirán pérdidas económicas

relevantes: se estima que los ingresos en los países pobres podrían caer un 61% más que en los países ricos como resultado del cambio climático (Instituto Potsdam, 2024).

Lo anterior plantea serias preocupaciones sobre la justicia climática y la necesidad de apoyo internacional para ayudar a las naciones más afectadas. Para enfrentar estos desafíos, es crucial implementar estrategias de adaptación y mitigación, tales como invertir en tecnologías sostenibles y prácticas agrícolas resilientes que puedan ayudar a reducir los impactos negativos del cam-

bio climático. Algunos estudios indican que invertir en mitigación costaría seis veces menos que las pérdidas asociadas con no actuar (Instituto Potsdam, 2024).

Dado la necesidad de innovación en base al contexto de cambio climático, la economía circular se presenta como un modelo alternativo al sistema lineal de producción y consumo vigente, el cual se sustenta fundamentalmente en la extracción, producción, uso y eliminación de recursos. Este nuevo paradigma busca optimizar el uso de los recursos, minimizar la generación de residuos y fomentar la sostenibilidad ambiental, dado el contexto de cambio climático que enfrenta el mundo de hoy, en donde la búsqueda de nuevos modelos económicos que den respuesta a aquello se vuelve cada vez más urgente.

En base a este nuevo enfoque innovador, la economía circular se fundamenta en tres principios básicos que sustentan su quehacer (Ellen MacArthur Foundation, 2023):

- **Eliminar Residuos y Contaminación:** Se busca diseñar productos y procesos que minimicen el desperdicio desde el inicio.
- **Circularidad de Productos y Materiales:** Los productos deben ser diseñados para ser reutilizados, reparados y reciclados, manteniendo su valor en el ciclo económico el mayor tiempo posible.
- **Regeneración de la Naturaleza:** Promueve el uso de recursos renovables y prácticas que restauren los ecosistemas naturales.

Complementario a lo anterior y desde una mirada estratégica orientada a la acción, la economía circular abarca tres ámbitos principales (Upcyclea, 2023):

- **Diseño:** Crear productos que faciliten su reutilización y reciclaje.
- **Consumo:** Fomentar un uso responsable de los recursos, incluyendo compartir, reparar y reutilizar.
- **Valorización de Residuos:** Transformar residuos en recursos mediante reciclaje o como materia prima para nuevos productos.

Aunque no hay una fecha exacta, se pueden identificar los comienzos del desarrollo de la economía circular a finales de los años 70. Durante este período, académicos y líderes de opinión comenzaron a aplicar conceptos relacionados con el reciclaje y la sostenibilidad en sistemas económicos modernos. El término “economía circular” fue utilizado por primera vez en la literatura occidental en 1980 por David W. Pearce y R. Kerry Turner, quienes lo definieron como un sistema cerrado que interrelaciona economía y medio ambiente (Espinoza, 2023).

A lo largo de las décadas, varios conceptos han sido fundamentales en el desarrollo de la economía circular (Allende Montero, 2023):

- **Cradle to Cradle (De Cuna a Cuna):** Introducido por el arquitecto suizo Walter Stahel en los años 70, este concepto enfatiza que todos los materiales utilizados en producción deben ser considerados nutrientes que pueden ser recuperados y reutilizados.

- **Ecología Industrial:** Este enfoque busca crear procesos de circuito cerrado donde los residuos son siempre reutilizables, promoviendo un metabolismo industrial más sostenible.

- **Biomímesis:** Inspirándose en la naturaleza, este concepto propone imitar procesos naturales para desarrollar soluciones sostenibles.

- **Economía Azul:** Promovida por Gunter Pauli, esta filosofía reúne casos prácticos donde se reutilizan recursos de manera eficiente.

Desde un enfoque económico y según un estudio del Banco Mundial, el costo ambiental asociado a prácticas lineales puede superar el 3% del PIB en muchos países (Ministerio de Industria y Turismo - España, 2023). En este contexto, se ha establecido que adoptar principios circulares puede generar beneficios económicos significativos, incluyendo reducción de costos operativos y creación de empleo.

En la actualidad, la economía circular se presenta como una solución viable ante desafíos globales como el cambio climático y la escasez de recursos, ya que su implementación no solo contribuye a mitigar impactos ambientales negativos, sino que también promueve un crecimiento económico sostenible. Además, la creciente presión social y regulatoria para adoptar prácticas sostenibles ha llevado a muchas empresas a reconsiderar sus modelos de negocio y a los países a establecer regulación y políticas con una perspectiva sostenible. Algunos de los países pioneros en la implementación de la economía circular son:



- Los Países Bajos se destacan como uno de los líderes mundiales en economía circular, en donde su gobierno ha establecido un ambicioso objetivo: lograr una economía completamente circular para el año 2050. En el año 2016, el gobierno lanzó el programa “Circular Dutch economy by 2050”, que establece acciones concretas para alcanzar este objetivo.

- Finlandia ha sido reconocida por su enfoque integral hacia la economía circular, especialmente en la industria textil, promoviendo la reutilización y reciclaje de todos los materiales, eliminando desechos nocivos. La iniciativa “Bio & Circular Finland” busca innovar en el sector textil mediante el uso de fibras recicladas y prácticas sostenibles.

- Alemania es otro referente en la implementación de la economía circular, con un fuerte enfoque en la gestión de residuos a través del modelo de las 3R (reducir, reutilizar, reciclar). El país ha desarrollado políticas que promueven el reciclaje y la eficiencia de recursos, aunque aún enfrenta desafíos para transformar completamente su economía hacia un modelo circular.

- China ha adoptado un enfoque proactivo hacia la economía circular desde su 11º Plan Quinquenal (2006), donde se integró como modelo de desarrollo nacional. La Ley de Promoción de la Economía Circular fue aprobada en 2008, marcando un hito en su política ambiental.

- Francia ha implementado diversas políticas para fomentar una economía circular, incluyendo el Programa Nacional para el Consumo Sostenible y estrategias para mejorar la gestión de residuos.

En el caso de América Latina y el Caribe, la economía circular ha ganado prominencia como un enfoque clave para el desarrollo sostenible, ofreciendo una alternativa al modelo económico lineal tradicional. En los últimos años, la economía circular ha cobrado importancia en estos países como un enfoque que favorece el desarrollo sostenible (Schroder, 2021).

Los países de la región han implementado o están planificando nuevas políticas, iniciativas públicas y hojas de ruta vinculadas a la economía circular. Este impulso responde a la necesidad de abordar deficiencias en la economía lineal y que la pandemia de COVID-19 ha exacerbado, como la vulnerabilidad de las cadenas de valor mundiales, el agotamiento de los recursos naturales y el aumento de las desigualdades sociales (Schroder, 2021).

En 2019, el concepto de economía circular cobró un fuerte impulso a nivel regional. En noviembre de ese año, durante el Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, se discutió la economía circular como una alternativa para cumplir con las responsabilidades internacionales de la región (Schroder, 2021).

Este impulso llevó al lanzamiento de la Coalición de Economía Circular para América Latina y el Caribe en febrero de 2021. Esta agrupación busca acelerar la transición hacia una economía circular en la región, aprovechando las más de 80 iniciativas de economía circular en las políticas públicas regionales y el creciente número de hojas de ruta y estrategias nacionales de economía circular en desarrollo (Coalición de Economía Circular, 2021).

Considerando los desafíos recientes en esta materia y el contexto latinoamericano, Chile ha comenzado a adoptar principios de economía circular en diversas áreas, impulsado por la necesidad de gestionar sus recursos naturales de manera sostenible. Es así como en el año 2016, el gobierno chileno lanzó la Hoja de Ruta para la Economía Circular, que establece un marco para promover prácticas circulares en sectores clave como la minería, la agricultura y la industria manufacturera (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

Estas nuevas políticas con una mirada sostenible, no sólo surgen como una forma de acoplarse a los desafíos internacionales en esta temática, sino que adicionalmente se relacionan con el estado

actual de nuestro país en materias de circularidad. Según el Ministerio del Medio Ambiente, se estima que Chile genera aproximadamente 19 millones de toneladas de residuos al año, con una tasa de reciclaje del 10% (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021).

Es relevante considerar que la implementación de estrategias circulares podría generar un ahorro significativo en costos operativos para las empresas chilenas; se estima que las prácticas circulares podrían representar una oportunidad económica de hasta USD 1,3 mil millones anuales (Banco Santander, 2023).

Considerando todo lo anterior, es que el gobierno chileno ha promovido diversas iniciativas para integrar la economía circular en su desarrollo económico y que se complementan con la Hoja de Ruta para la economía Circular. Una de ellas es la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), la cual obliga a los productores a hacerse responsables por el ciclo completo de vida de sus productos, fomentando el reciclaje y la reutilización (Biblioteca del Congreso Nacional, 2021).

b. Desafíos de los modelos económicos hacia la transición sostenible

La transición hacia un desarrollo sostenible representa uno de los mayores retos para los modelos económicos contemporáneos, ya que a medida que las preocupaciones sobre el cambio climático, la desigualdad social y la degradación ambiental aumentan, se ha vuelto esencial que las economías del mundo se adapten y evolucionen para enfrentar estos desafíos. Un reto significativo es la dependencia de los recursos naturales para su desarrollo.

La economía chilena, por ejemplo, ha estado históricamente centrada en la minería, especialmente en la extracción de cobre, que representa aproximadamente el 10% del PIB y más del 50% de las exportaciones totales (Erices García, 2024). Esta dependencia expone al país a vulnerabilidades económicas, como la fluctuación de precios en los mercados internacionales y el impacto del cambio climático.

Es relevante considerar que el cambio climático representa un reto crítico para aquellos modelos económicos que ven afectado su progreso dadas las consecuencias que este fenómeno produce. América Latina es particularmente vulnerable a

sus efectos, como sequías e inundaciones, lo que afecta tanto a la agricultura como a otros sectores económicos (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023).

Adicional a lo anterior, muchos países enfrentan problemas de debilidad institucional y corrupción, lo que socava la confianza en las instituciones y limita la efectividad de las políticas económicas (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2023), por lo que es clave fortalecer la gobernanza para crear un entorno propicio para el desarrollo sostenible.

Finalmente, la falta de conciencia pública sobre sostenibilidad también representa un obstáculo significativo, ya que muchos consumidores no están informados sobre cómo sus decisiones afectan el medio ambiente ni sobre las alternativas sostenibles disponibles (La Economía de los Consumidores, 2024). Fomentar una educación adecuada sobre sostenibilidad puede ayudar a cambiar hábitos de consumo y promover una mayor responsabilidad social.

c. Contexto y relevancia económica de la minería del cobre en Chile

La minería del cobre es un sector fundamental para la economía chilena, desempeñando de manera histórica un papel crucial en el desarrollo socioeconómico del país. Desde el siglo XIX, la minería ha sido un pilar de la economía chilena, y si bien en un inicio el enfoque estaba en la extracción de plata, el cobre comenzó a ganar relevancia con el paso del tiempo.

En la década de 1990, Chile experimentó un notable crecimiento en la producción de cobre, aumentando su producción anual en tres millones de toneladas en solo diez años (Meller, 2003). Antes de 1990, Chile representaba menos del 18% de la producción mundial de cobre; actualmente, produce aproximadamente el 35% (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023).

La minería del cobre representa alrededor del 10,9% del Producto Interno Bruto (PIB) de Chile y es responsable de aproximadamente el 40% de las exportaciones totales (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023). En términos monetarios, las exportaciones de cobre han crecido significativamente, pasando de US\$ 322 millones en 1960 a US\$ 7.334 millones en 2000 (Meller, 2003). En 2016, las exportaciones alcanzaron cifras récord, consolidando a Chile como el mayor productor mundial (International Copper Association, 2023).

El sector minero contribuye con un promedio del 7,8% a los ingresos fiscales del país. Esta cifra ha fluctuado a lo largo de los años, pero sigue siendo una fuente importante de financiamiento para el Estado chileno (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023). La Corporación Nacional del Cobre (CODELCO), empresa estatal, es responsable de aproximadamente el 60% de los ingresos tributarios generados por la minería (Zerene, 2014).

La minería también genera empleo de forma significativa: se estima que proporciona alrededor de 388.754 puestos de trabajo directos e indirectos (International Copper Association, 2023). Además, los efectos multiplicadores del sector pueden incrementar su contribución al PIB nacio-

nal hasta un 20% cuando se consideran los empleos generados en otras industrias relacionadas (Biblioteca del Congreso Nacional, 2023).

Desde finales de la década pasada, el Estado chileno ha establecido iniciativas de transición hacia estándares que acojan los desafíos propuestos por los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en base a la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible de la ONU suscrita en el año 2015, donde Chile es un país miembro.

Para la implementación de los ODS, en nuestro país se han establecido cuatro ejes que orientan su acción: 1) Alcanzar un desarrollo económico y social sostenible e inclusivo; 2) Disminuir la pobreza y la desigualdad; 3) Hacer frente al cambio climático, resguardando la diversidad biológica y de los recursos naturales, y promoviendo la innovación, y 4) Fortalecer las instituciones y la democracia.

En base a lo anterior, durante el año 2022 surge la nueva Política Nacional Minera 2050, entregada por el Ministerio de Minería, que busca hacerse cargo de algunos de los desafíos ambientales que enfrenta esta industria, como lo es trabajar en proyectos que apunten a lograr la neutralidad del carbono y la economía circular.

En ese contexto, el Análisis de Flujo de Materiales (MFA por sus siglas en inglés) constituye una herramienta interesante para dimensionar el flujo de materias primas en la minería de cobre en Chile, y así identificar puntos críticos a través de las diversas etapas y procesos involucrados que requieran estrategias específicas, para una transición integral hacia la sostenibilidad.

En las secciones siguientes del documento se presenta el MFA para la minería de cobre en Chile en el año 2023, donde se detalla el flujo de materiales desde la extracción doméstica e importaciones, pasando por los distintos procesos involucrados en el sector, hasta la generación de residuos, aguas residuales y exportaciones.



Análisis de Flujo de Materiales (MFAI)

a. MFA de recursos en la Minería de Cobre en Chile

El Análisis de Flujo de Materiales (MFA, por sus siglas en inglés) es una metodología sistemática que permite evaluar los flujos y existencias de materiales dentro de un sistema, convirtiéndose en una herramienta clave para la gestión sostenible de recursos y residuos. El MFA tiene sus raíces en el principio de conservación de la materia, postulado por los griegos hace más de 2.000 años, aunque su desarrollo como herramienta analítica comenzó mucho después.

Uno de los primeros usos documentados del análisis de flujos fue realizado por Santorio Santorio (1561-1636), un médico italiano que utilizó balances de masa para estudiar el metabolismo humano. Su trabajo sentó las bases para el análisis sistemático de entradas y salidas en sistemas cerrados (Colay Castro, 2015).

En el contexto del análisis de flujo de materiales, la ley de conservación de la masa implica que la cantidad total de materiales que ingresan a un sistema debe ser igual que la cantidad total de materiales que salen del sistema, considerando todas las etapas del ciclo de vida. Esto se conoce como balance de materiales.

Durante el siglo 20, el principio del balance de masas empezó a aplicarse en campos como la química, la ingeniería y la economía. La ley de conservación de la materia se utilizó para analizar procesos industriales, lo que marcó un hito en la evolución del MFA como herramienta práctica (Colay Castro, 2015). El MFA comenzó a consolidarse como una metodología formal en las últimas décadas del siglo pasado.

Específicamente, durante la década de 1970, los conceptos iniciales del MFA se vincularon con la ecología industrial, un campo emergente que buscaba integrar sistemas naturales y humanos. Durante este tiempo, se reconoció la necesidad

de evaluar los flujos materiales para entender mejor los impactos ambientales (SciELO, 2015).

Para el año 1991, Peter Baccini y Paul Brunner publicaron uno de los primeros estudios metodológicos sobre el MFA, aplicándolo al metabolismo regional. Este trabajo marcó un punto de inflexión al establecer un marco teórico sólido para el análisis sistemático de flujos materiales (SciELO, 2015). En la misma década, países como Alemania comenzaron a usar MFA para diseñar políticas ambientales más efectivas, enfocándose en la reducción de residuos y el uso eficiente de recursos (Gobierno de Uruguay, 2023).

Durante las últimas décadas del siglo XX, diversas industrias comenzaron a implementar MFA para optimizar procesos productivos, lo que permitió reducir costos operativos asociados al desperdicio material hasta en un 30% en algunos sectores. Adicionalmente, países como Japón y Alemania han utilizado MFA a nivel nacional para evaluar su metabolismo socioeconómico, identificando ineficiencias materiales que podrían representar

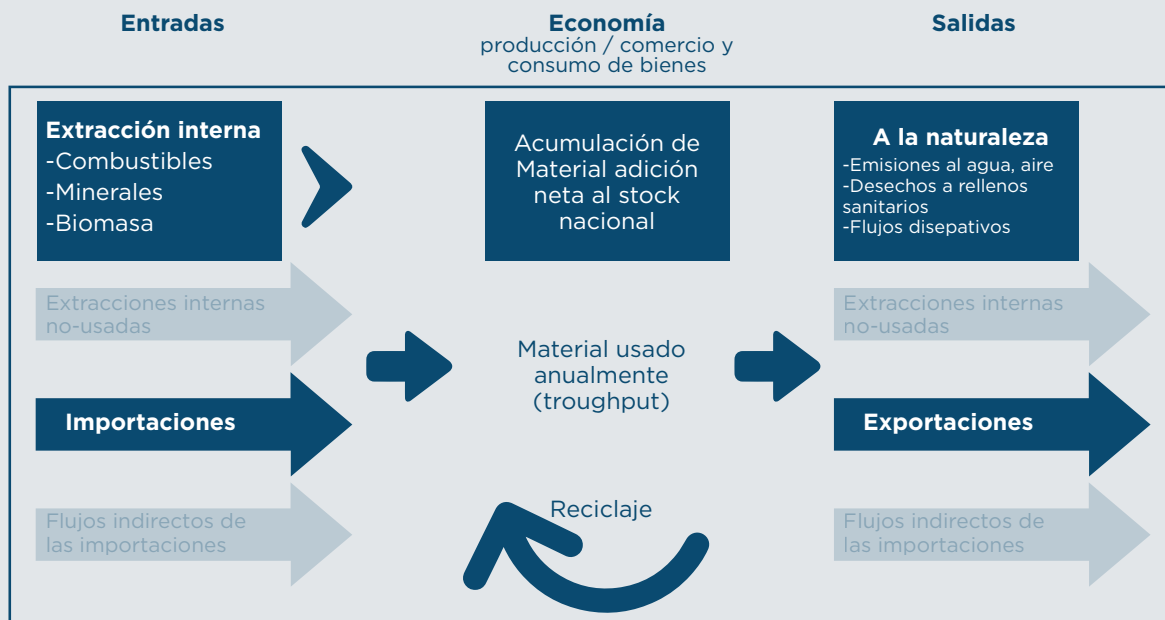
pérdidas económicas significativas si no se gestionan adecuadamente (Gobierno de Uruguay, 2023).

Con todo lo anterior, el MFA se ha vuelto una herramienta útil para analizar y evaluar el biometalismo físico de la sociedad, tanto a nivel micro como macro. A través de su análisis permite comprender la interacción existente entre el ambiente y la economía, principalmente materiales, y proveer indicadores cuantitativos agregados que se relacionan con temáticas ambientales.

En cada etapa se cuantifican los materiales que ingresan y salen, así como las pérdidas y desperdicios generados. Así, se logra conocer de dónde proviene la mayor cantidad de residuos y emisiones, lo que permite focalizar o dar prioridad a las actividades más contaminantes.

Desde esta perspectiva se busca evaluar cómo los materiales fluyen a través de un proceso productivo, y cómo se pueden optimizar dichos flujos para minimizar el impacto ambiental y promover la sostenibilidad. El MFA también evalúa

Figura 1
Ejemplo de Análisis de Flujo de Materiales



cómo las materias primas usadas se transforman en productos y vuelven al ecosistema como salidas, y sus principales objetivos son los siguientes:

- Observar el flujo de las materias primas para demostrar los vínculos en el proceso
- Averiguar de dónde provienen los residuos y emisiones
- Demostrar puntos débiles y/o críticos
- Elaborar las bases de la evaluación
- Presentar los datos para la toma de decisiones
- Dar prioridad a medidas razonables para la minimización de desechos y emisiones

Por lo tanto, el Análisis de Flujo de Materiales es una metodología utilizada para cuantificar los flujos y stocks de materiales dentro de un sistema, cuyo análisis es crucial para comprender el metabolismo económico y ambiental de diversas industrias y procesos, permitiendo identificar ineficiencias, optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental.

Desde una mirada procedimental, se pueden identificar los siguientes pasos para la elaboración de un MFA, siempre y cuando se cuente con la información necesaria para un correcto desarrollo del estudio (Gobierno de Uruguay, 2023):

- El primer paso en un MFA es definir el alcance y los objetivos del análisis. Esto implica especificar qué materiales se incluirán, los límites del sistema bajo estudio y las metas que se pretenden alcanzar con el análisis. Es crucial definir qué procesos y actividades se incluirán en el análisis, lo que puede basarse en actividades, equipos, unidades de producción o cualquier otro que sea de utilidad para el análisis.

- El siguiente paso es definir los límites del sistema que se va a analizar. Esto incluye identificar las entradas y salidas de materiales, así como los procesos internos que transforman estos materiales.

- Una vez definidos el alcance y los límites del sistema, se deben cuantificar los flujos y stocks de materiales. Esto implica medir las cantidades de cada material en diferentes puntos del sistema, así como establecer un período de tiempo representativo para el análisis.

- Luego de la cuantificación de materiales, es requerido que se realice un balance de materiales, lo que implica asegurar que la cantidad de material que entra en cada etapa del proceso sea igual a la cantidad que sale, considerando las transformaciones y los residuos generados.

- Posteriormente, es necesario elaborar un diagrama de flujo, el cual es una representación visual de los flujos de materiales a través del sistema y ayuda a identificar ineficiencias y áreas de mejora.

- Una vez completado el balance de materiales, se deben analizar los resultados para identificar patrones, ineficiencias y oportunidades de mejora.

Es necesario mencionar que, en el caso de la representación visual del MFA, existen una serie de herramientas y formatos de presentación que suelen utilizarse en el análisis de flujos.

En el presente documento se hará uso de una de las representaciones más utilizadas para graficar el MFA, el cual es el diagrama de Sankey y que aplicaremos para el flujo de recursos en la minería de cobre en nuestro país.



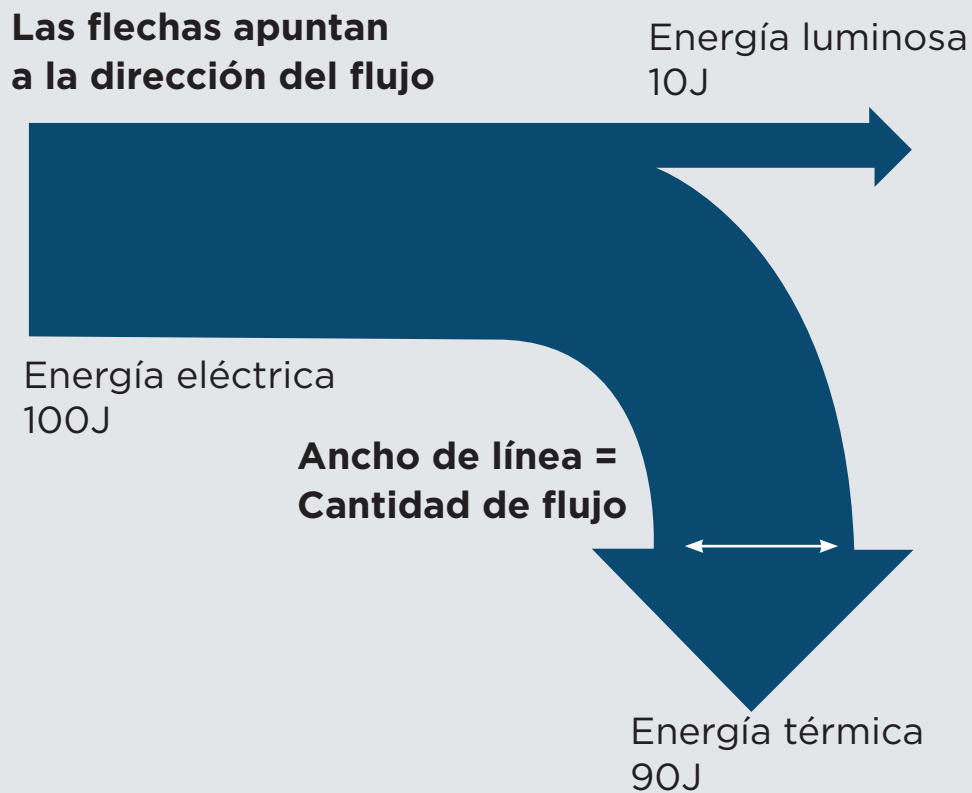
b. Diagrama de Sankey

El diagrama de Sankey es una representación gráfica que ilustra flujos y transferencias dentro de un sistema, destacando la magnitud de estos flujos mediante el ancho de las flechas. Esta herramienta se ha vuelto cada vez más popular en diversas disciplinas, incluyendo la economía, la energía y la gestión de recursos.

Este diagrama visualiza cómo se distribuyen los recursos, ya sean financieros, energéticos o materiales, a través de diferentes etapas o componentes de un sistema. Los principales elementos que componen un diagrama de Sankey son:

- **Flujos Proporcionales:** El ancho de las flechas representa la cantidad relativa de flujo; flujos más grandes se visualizan con flechas más anchas.
- **Nodos y Conexiones:** Los nodos representan las entidades o etapas en el sistema, mientras que las conexiones muestran cómo se relacionan entre sí.

Figura 2 Ejemplo de Diagrama de Sankey



Fuente: Data Visualisation Catalogue

El diagrama de Sankey fue nombrado en honor al ingeniero irlandés Matthew Henry Sankey, quien lo utilizó por primera vez en 1898 para mostrar el flujo en una planta de energía. Desde entonces, su uso se ha expandido a múltiples campos.

Uno de los usos más comunes del diagrama de Sankey es en el análisis energético, ya que se puede utilizar para representar cómo se generan y consumen diferentes fuentes de energía dentro de un país o región, ayudando a identificar dependencias energéticas y oportunidades para mejorar la eficiencia (Geeds, 2023).

En el ámbito financiero, los diagramas de Sankey son útiles para ilustrar cómo fluye el dinero a través de una empresa o economía. Permiten a los analistas visualizar ingresos, gastos y beneficios netos, facilitando la comprensión del estado financiero (CG Systems, 2023).

Los diagramas también son aplicados en la gestión de recursos naturales, mostrando cómo se extraen, procesan y utilizan los recursos en diferentes sectores económicos. Esto es crucial para desarrollar estrategias sostenibles que minimicen el desperdicio y optimicen el uso de recursos (Qlik, 2018).

El uso del diagrama de Sankey ha crecido con el aumento del interés por la sostenibilidad y la eficiencia económica. Según un informe del Banco Mundial, las visualizaciones como los diagramas Sankey han permitido a los países identificar ineficiencias en sus sistemas económicos que podrían ser mejoradas mediante políticas adecuadas (Banco Mundial, 2020).

En base a lo anterior, podemos plantear que el análisis de flujo de materiales (MFA) y los diagramas de Sankey son herramientas complementarias para estudiar el metabolismo económico y ambiental de sistemas complejos. Mientras el MFA cuantifica los flujos materiales en una economía, los diagramas de Sankey proporcionan una representación visual intuitiva de estas dinámicas, permitiendo identificar ineficiencias y patrones críticos.

c. Principales resultados del MFA para la Minería de Cobre de Chile

Considerando lo expuesto en las secciones anteriores, en esta sección se presenta el análisis de flujo de materiales realizado para la minería de cobre de Chile en el año 2023, junto con un detalle de los principales resultados obtenidos.

Como primer paso, fue necesario identificar los procesos asociados a la minería de cobre en nuestro país. Acorde a la información provista por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) en el año 2023, se identifican 6 procesos principales en la minería del cobre en nuestro país (Cochilco, 2024):

- Mina Rajo y/o Subterránea
- Concentradora
- Fundición
- Refinería
- Lx/Sx/Ew
- Servicios

Para cada uno de los procesos antes de escritos, en el proceso de entrada se identifican las cantidades de materiales que fluyen desde 2 categorías de entrada (extracción doméstica e importaciones) hacia los distintos procesos que componen la minería del cobre. Para un análisis preciso, se establecieron 6 categorías que componen la mayoría del flujo de los materiales en dicho sector y que se distribuyen en los procesos mineros antes descritos:

- Energía en toneladas
- Biomasa en toneladas
- Metales en toneladas
- Minerales y químicos en toneladas
- Emisiones en toneladas de CO2 equivalentes
- Agua en toneladas

Posteriormente, para el proceso de salida, se establecen 4 posibles categorías como resultado del proceso de producción:

- Procesamiento de residuos (Eliminación, recolección o revalorización)
- Emisiones de GEI
- Aguas residuales
- Exportaciones

Para poder realizar lo anterior, fue recopilada información de diversas fuentes nacionales donde los datos principales provienen de COCHILCO, el Ministerio del Medio Ambiente y el Consejo Minero, en donde se pudo recabar información suficiente para la realización del MFA. Luego de obtenido y analizados los datos finales para la minería de cobre, se pueden destacar los siguientes resultados:

- Mas del 99% de los materiales de entrada provienen de extracción doméstica.



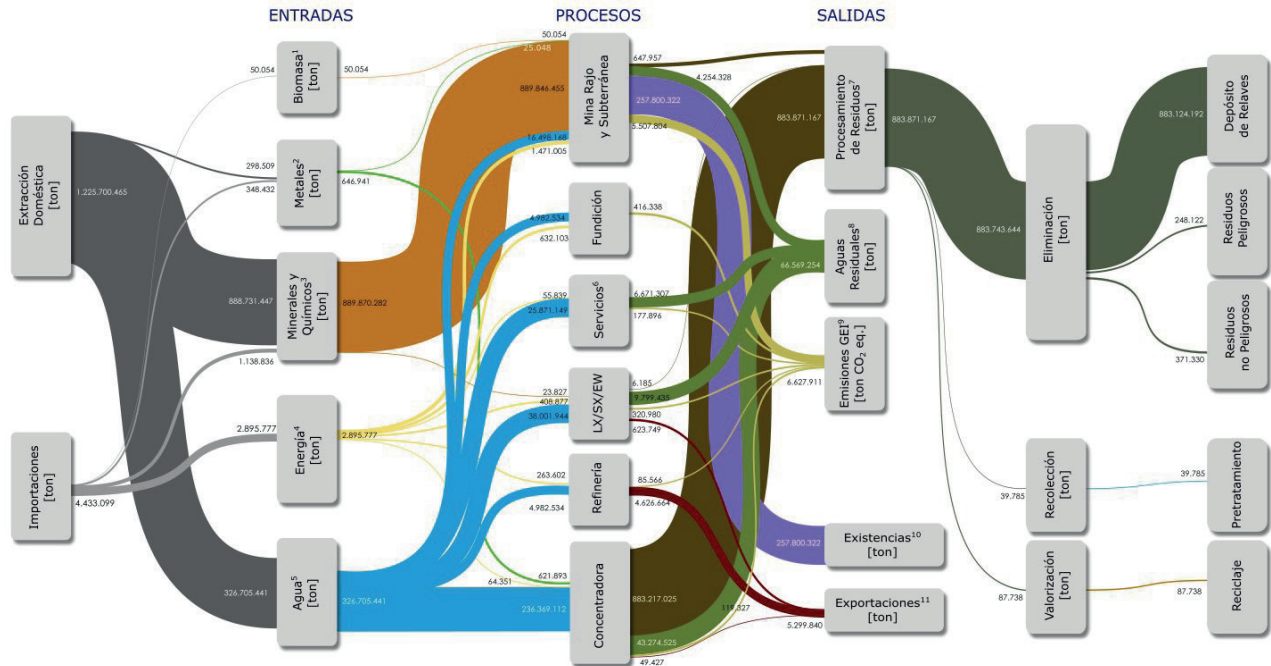
- Un 71% del total de agua que ingresa a la producción de cobre se convierte en aguas residuales, siendo el proceso de concentradora el que recibe mayor cantidad de agua y produce mayor cantidad de aguas residuales.
- El proceso de Mina (Rajo y Subterránea) es aquel que mayor cantidad de materiales recibe, con más del 70%.
- El proceso de Concentradora es aquel que produce mayor cantidad de residuos, con más del 99,9%.
- El procesamiento de residuos es la salida que mayor cantidad de materiales recibe, con más de un 69%. En cambio, las exportaciones son el proceso que menor cantidad de material posee, con menos de un 1% del total.
- Prácticamente la totalidad de los residuos que pasan por procesamiento pasan a eliminación, los cuales a su vez en casi la totalidad van a parar a depósitos de relave.

En la siguiente sección, se presenta el resultado final del MFA para la minería de cobre en Chile durante el año 2023, utilizando como representación visual el diagrama de Sankey, el cual detalla los flujos en toneladas desde las entradas hasta las salidas, pasando por las distintas etapas del proceso minero.



d. Diagrama de Sankey - MFA de la Minería del Cobre de Chile año 2023

ANÁLISIS DE FLUJO DE MATERIALES MINERÍA DE COBRE DE CHILE¹²



1: Asociada a caucho natural de neumáticos mineros (off the road-OTR).
 2: Asociado a equipo y maquinaria (bolas de molenda, camiones de extracción, perforadoras y palas de carga).
 3: Principalmente roca mineral, cal, floculantes y extractantes.
 4: Asociada a combustibles fósiles (principalmente diesel, gas natural y Encap 6).
 5: Agua continental considera aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas adquirida a terceros y/o industriales.
 6: Corresponde a la suma de aquellas actividades que no se encuentran incluidos dentro de los procesos de la cadena de valor principal, pero que son necesarias para llevar a cabo la producción minera, tales como el consumo asociado a campamentos y talleres e impulsión y desalación de agua, entre otros.
 7: Considera residuos industriales peligrosos, no peligrosos y relaves.
 8: Considera la recirculación del agua en todo el proceso.
 9: Emisiones directas, de alcance 1, asociadas a combustión de combustibles.
 10: Existencias = entradas - salidas - exportaciones.
 11: Considera exportaciones de producto final primario (cobre refinado y cobre SX-EW) y subproducto (molibdeno).
 12: El análisis fue realizado con datos del año 2023.



e. Remanufactura, Industria 4.0 y el Rol de los Proveedores en la Economía Circular Minera

El Análisis de Flujo de Materiales (MFA) no solo permite evaluar la entrada y salida de recursos en la minería del cobre, sino que también es una herramienta clave para identificar oportunidades de optimización, reducción de desperdicios y aplicación de estrategias de economía circular. En este contexto, los proveedores de la industria minera desempeñan un papel fundamental al introducir soluciones innovadoras basadas en remanufactura, digitalización e Industria 4.0, las cuales permiten maximizar la eficiencia de los materiales, prolongar su ciclo de vida y reducir la generación de residuos.

Actualmente, el sector minero en Chile cuenta con 8.700 proveedores, según la Subsecretaría de Relaciones Económicas Internacionales de Chile. Estos proveedores, conocidos como empresas de servicios y tecnología para la minería (METS), tienen un impacto económico y social significativo. En total, generan aproximadamente 1.160.086 empleos, lo que equivale a alrededor del 13% de la fuerza laboral nacional (Consejo Minero, 2023).

Su participación en la economía no solo se traduce en la provisión de bienes y servicios esenciales para las operaciones mineras, sino también en la creación de empleo altamente calificado y en la promoción de la innovación tecnológica dentro del sector. Además, su rol es clave en el desarrollo de encadenamientos productivos con otras industrias, fortaleciendo el ecosistema económico y fomentando la diversificación de la matriz productiva del país.

La remanufactura es una de las estrategias más efectivas dentro de la economía circular, permitiendo recuperar y restaurar equipos y componentes mineros para ser reutilizados con los mismos estándares de calidad y rendimiento que un producto nuevo. En Chile, el gasto en partes y piezas de maquinaria y equipos alcanzó los 4.100 millones de dólares en 2023, representando 17.7% del total de compras de insumos en la industria minera (Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), 2024). La implementación de programas de remanufactura en esta categoría permite reducir costos, minimizar la dependencia de nuevas im-

portaciones y disminuir la huella de carbono derivada de la producción de nuevos insumos.

El avance de la Industria 4.0 ha facilitado la digitalización de procesos mineros y la incorporación de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y la manufactura aditiva, que permiten mejorar la trazabilidad y el aprovechamiento de los materiales. En la minería chilena, el gasto en mantenimiento y reparación de maquinaria y equipos representó más de 3.500 millones de dólares en 2023 (Corporación Alta Ley, 2021), lo que demuestra la relevancia de los servicios de monitoreo en tiempo real, mantenimiento predictivo y remanufactura.

Gracias a sensores inteligentes y sistemas de análisis de datos, los proveedores pueden optimizar la gestión de insumos, detectar fallas antes de que ocurran y permitir un mantenimiento más eficiente, reduciendo la pérdida de materiales y evitando costos asociados a paradas operacionales. La integración de la remanufactura dentro de estos procesos digitales permite extender la vida útil de equipos y componentes, promoviendo un modelo más circular en la gestión de activos mineros.

El impacto de la Cuarta Revolución Industrial en la economía circular minera también se refleja en la automatización y el análisis de datos, herramientas que permiten optimizar el uso de insumos y reducir el desperdicio de materiales. La colaboración entre empresas mineras y proveedores es clave para acelerar la transición hacia modelos más sostenibles, incorporando principios de eficiencia de recursos, ecodiseño y optimización del ciclo de vida de los productos.

La integración de estas soluciones no solo responde a la necesidad de mejorar la competitividad y reducir costos, sino que también representa un paso esencial hacia una minería más resiliente, innovadora y alineada con los principios de la economía circular.

Comentarios Finales

El análisis de flujo de materiales realizado para la minería del cobre en Chile durante 2023 permite dimensionar, con precisión numérica, la dimensión de los recursos que sostienen la operación del sector y los puntos donde se agrupan los impactos más relevantes. Entre los descubrimientos, destaca que más del 99% de los materiales de entrada provienen de la extracción doméstica. Este dato confirma la fuerte dependencia de recursos naturales locales y plantea la premura de robustecer estrategias orientadas a la gestión sostenible del territorio y del capital natural. Asimismo, el proceso minero, tanto rajo como subterránea, concentra más del 70% de los materiales, mientras que la fase de concentración genera más del 99,9% de los residuos, configurando nodos críticos para priorizar labores de eficiencia y reducción de externalidades.

Asimismo, en materia hídrica, el estudio revela que cerca del 71% del agua que ingresa al sistema acaba como aguas residuales. La concentradora es el proceso que más agua recibe y, a la vez, el que más efluentes produce. Este escenario evidencia la necesidad de progresar en tecnologías y prácticas que favorezcan la recirculación, el reúso y el tratamiento avanzado del recurso hídrico, fundamentalmente en un país vulnerable a la escasez y al cambio climático. Por otra parte, se observa que el procesamiento de residuos establece la principal vía de salida de materiales, superando el 69% del total, mientras que las exportaciones representan menos del 1%. Esto confirma un metabolismo intensivo en residuos y un bajo porcentaje de materiales que se convierten en productos finales exportables.



Los resultados exponen que la minería del cobre enfrenta un doble desafío: mantener su papel como motor económico y, al mismo tiempo, reconfigurar sus operaciones hacia modelos más circulares, eficientes y bajos en emisiones. La evidencia del MFA indica oportunidades para reducir pérdidas, valorizar flujos residuales y mejorar la productividad de recursos mediante innovación tecnológica y organizacional. Cabe resaltar que la mayor cantidad de los residuos tratados termina en eliminación, principalmente en depósitos de relaves. Este hecho establece riesgos ambientales y sociales, pero también abre espacio para proyectos de reprocesamiento, recuperación de metales y nuevas aplicaciones industriales.

En esta situación, la remanufactura y la Industria 4.0 actúan como motores de la economía circular en la minería. En la misma línea, la elevada inversión en repuestos y mantenimiento pone de manifiesto un amplio margen que la remanufactura, el mantenimiento predictivo y la gestión de activos pueden aprovechar. Este enfoque permite no sólo ampliar la vida útil de componentes que son fundamentales, sino también reducir la demanda de componentes vírgenes y disminuir la huella de carbono. La integración de tecnologías digitales - sensorización, Big Data e inteligencia artificial - añade capacidades de monitoreo en tiempo real y de optimización de los procesos, solidificando la convergencia entre la eficiencia y la sostenibilidad.

A raíz de esta situación, la actividad de los proveedores tecnológicos (METS) tiene, por ello, un carácter estratégico, ya que no es sólo una alimentación para la operación, sino que asumen el rol de socios en fase de innovación, de diseño y de implementación de soluciones circulares. La magnitud del empleo y del gasto asociado a estos proveedores da cuenta que el desarrollo de una agenda activa de desarrollo de capacidades, de colaboración público-privada y de escalamiento tecnológico puede tener impactos sistémicos en la transformación del sector. A medida que las empresas vayan incorporando criterios de circularidad en sus compras, especificaciones técnicas y en sus modelos de negocios, se irá consolidando un ecosistema de innovación adaptado a la Política Nacional Minera 2050 y a la Hoja de Ruta.

En consecuencia, el estudio confirma que el MFA, complementado con diagramas de Sankey y una lectura estratégica empresarial, es una fuerte herramienta para el desarrollo de la sostenibilidad en la minería del cobre. En este sentido, más allá del diagnóstico, sus resultados pueden servir como base para definir metas concretas de reducción de residuos, optimización hídrica, disminución de emisiones y valorización de subproductos, tanto a nivel corporativo como en políticas públicas; así el sector minero chileno dispone de una plataforma de análisis que al ser actualizada de manera periódica, puede orientar su transición hacia un modelo de desarrollo que combine competitividad, innovación y responsabilidad socioambiental.

Bibliografía

Allende Montero, P. (2023). Economía circular: una aproximación conceptual. Obtenido de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/196088/Economia-circular-una-aproximacion-conceptual-a-la-economia-circular-y-el-derecho-internacional.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ayuda en Acción. (2024). Efectos del cambio climático en la economía mundial. Obtenido de <https://ayudaenaccion.org/blog/sostenibilidad/efectos-cambio-climatico-economia/>

Banco Central de Chile. (2023). Evolución reciente y perspectivas de la minería. Obtenido de <https://www.bcentral.cl/documents/33528/5031687/Recuadro-I1-evolucion-reciente.pdf/b7c3975e-0b63-efe2-ef7e-0af4802e01a8>

Banco Mundial. (2020). Reporte sobre el uso eficiente de recursos naturales. Obtenido de <https://landusefinance.org/wp-content/uploads/2019/12/LUFT-ANNEX-II-ES.pdf>

Banco Santander. (2023). Economía lineal y circular: diferencias clave. Obtenido de <https://www.santander.com/es/stories/economia-lineal-y-circular-a-que-se-refieren-cada-uno-de-estos-terminos-y-cuales-son-sus-diferencias#:~:text=De%20esta%20forma%20podr%C3%ADamos%20indicar,segunda%20apu%20esta%20por%20la%20sostenibilidad.>

BBVA. (2023). ¿Qué es la sostenibilidad económica y cuáles son sus implicaciones? Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-sostenibilidad-economica-y-cuales-son-sus-implicaciones/>



Biblioteca del Congreso Nacional. (2021).

Economía Circular: Conceptos e implicancias. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32826/1/Informe_BCN_Economia_Circular_concepto_FINAL.pdf

Biblioteca del Congreso Nacional. (2023). Impactos socioeconómicos de la minería en Chile. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F34140%2F1%2FInforme_N_04_23_Impactos_socioeconomicos_de_la_mineria_en_Chile.pdf

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2023). Desafíos económicos para América Latina. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio%2F10221%2F36466%2F1%2FDesafios_economicos_para_America_Latina.pdf

BioBilbao. (2023). Cómo afecta el cambio climático a la economía. Obtenido de <https://biobilbao.bilbao.eus/que-es-el-cambio-climatico/como-afecta-el-cambio-climatico-a-como-afecta-el-cambio-climatico-a-la-economia/>

CEPAL. (2023). Los efectos del cambio climático en la actividad económica en América Latina. . Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/67979-efectos-cambio-climatico-la-actividad-economica-america-latina-caribe>

CEUPE. (2023). ¿Qué son los flujos de materiales? Obtenido de <https://www.ceupe.com/blog/que-son-los-flujos-de-materiales.html>

CG Systems. (2023). Cómo interpretar los estados de resultados con diagramas Sankey. Obtenido de <https://cg-sys.com/home/como-interpretar-los-estados-de-resultados-de-una-empresa-con-diagramas-sankey-una-guia-para-principiantes/>

CMMSG. (2021). Minería en Chile: Un pilar para el desarrollo del país. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2448-718X2021000300831&script=sci_art-text

Coalición de Economía Circular. (2021). Economía circular en América Latina y el Caribe: Una visión compartida. Obtenido de <https://coalicioneconomicocircular.org/wp-content/uploads/2022/02/ESPAN%CC%83OL-Economia%CC%81a-circular-en-Ame%CC%81rica-Latina-y-el-Caribe.pdf>

Cochilco. (2022). Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2002-2021. Obtenido de <https://www.cochilco.cl/web/download/871/2021/9799/anuario-de-estadisticas-del-cobre-y-otros-minerales-2001-2020.pdf>

Colay Castro, G. (2015). Historia del análisis del flujo de materiales: principios y aplicaciones. Obtenido de <https://repositori.udl.cat/server/api/core/bitstreams/b602eac5-2bf0-48fb-96db-1dcb77c55901/content>

Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2024). Participación de Proveedores en Operaciones y Proyectos (Gasto 2023). Obtenido de <https://www.cochilco.cl/web/proveedores/>

Consejo Minero. (2023). 8.700 proveedores mineros en Chile. Obtenido de <https://consejomineiro.cl/mineriaconotrosojos/8-700-proveedores/>

Corporación Alta Ley. (2021). Benchmark: Programas de Desarrollo de Proveedores Mineros. Obtenido de https://www.corporacionaltaley.cl/wp-content/uploads/2023/04/Benchmark_METS_CorporacionAltaLey_nov2021.pdf

Delineando Estrategias. (2023). Principales retos para lograr el desarrollo sostenible. Obtenido de <https://www.delineandoestrategias.com.mx/blog-de/principales-retos-para-lograr-el-desarrollo-sostenible>

Diario Financiero. (2024). Cómo el cambio climático puede impactar a la economía local. Obtenido de <https://www.az.cl/como-el-cambio-climatico-puede-impactar-a-la-economia-local/>

Diario Sustentable. (2019). Qué es la economía circular y cuál es su historia. Obtenido de <https://www.diariosustentable.com/2019/08/que-es-la-economia-circular-y-cual-es-su-historia/>

Ellen MacArthur Foundation. (2023). Introducción a la economía circular. Obtenido de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/vision-general>.

Ellen MacArthur Foundation. (s.f.). América Latina y la economía circular. Obtenido de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/regiones/america-latina>

Enel. (2024). Qué es la economía circular: definición y beneficios. Obtenido de <https://corporate.enelx.com/es/question-and-answers/what-is-circular-economy>

Erices García, C. (2024). Desafíos y Oportunidades del Modelo Económico Chileno. Obtenido de <https://paginav.cl/2024/10/16/desafios-y-opportunidades-del-modelo-economico-chileno-dependencia-del-cobre-y-transicion-hacia-un-futuro-sostenible/>

Espinoza, A. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen. Obtenido de <https://revistas.uexternado.edu.co/index.php/ecoins/article/view/8848/14765>

FasterCapital. (2023). Análisis de flujo de materiales: Fluyendo hacia adelante. Obtenido de <https://fastercapital.com/es/contenido/Analisis-de-flujo-de-materiales--Fluyendo-hacia-adelante--Analisis-de-flujo-de-materiales-para-mejorar-la-productividad.html>

Foro Económico Mundial. (2020). ¿Cuáles son los desafíos para lograr que las economías sean más sostenibles?

Geeds. (2023). Análisis energético del modelo MEDEAS mediante diagramas Sankey. Obtenido de <https://geeds.es/news/analisis-energetico-del-modelo-medeads-mediante-diagramas-sankey/>

Gobierno de Uruguay. (2023). Guía práctica sobre análisis del flujo de materiales. Obtenido de https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/3_-_Analisis_del_flujo_de_materiales_1.pdf

Iberdrola. (2019). Impacto del Cambio Climático en la Economía y la Sociedad. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/impacto-del-cambio-climatico>



Instituto Potsdam. (2024). La economía mundial caerá de media un 19% por la crisis climática. Obtenido de <https://climatica.coop/economia-mundial-caera-19-por-ciento-2049/>

Intercoonecta. (s.f.). La economía circular en América Latina y el Caribe. Obtenido de <https://intercoonecta.aecid.es/Gestin%20del%20conocimiento/La%20econom%C3%ADa%20circular%20en%20Am%C3%A9rica%20Latina%20y%20el%20Caribe.pdf>

International Copper Association. (2023). El impacto socioeconómico de la minería del cobre en Chile. Obtenido de <https://internationalcopper.org/es/resource/the-socioeconomic-impact-of-copper-mining-in-chile/>

La Economía de los Consumidores. (2024). Los desafíos y oportunidades de la economía sostenible. Obtenido de <https://www.laeconomiadelosconsumidores.es/la-economia-sostenible-desafios-y-oportunidades/>

Lucidchart. (2017). Historia y evolución del análisis sistemático. Obtenido de <https://www.lucidchart.com/pages/es/que-es-un-diagrama-de-flujo-de-datos>

Meller, P. (2003). El cobre chileno y la política minera. Obtenido de <https://cea-uchile.cl/wp-content/uploads/doctrab/ASOCFI-LE120030326143439.pdf>

Ministerio de Industria y Turismo - España. (2023). Economía Circular. Obtenido de <https://www.mintur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomicoIndustrial/401/CERD%C3%81%20y%20KHALILOVA.pdf>

Ministerio del Medio Ambiente. (2023). Hoja de Ruta para la Economía Circular. Obtenido de <https://economiecircular.mma.gob.cl/hoja-de-ruta/>

MIT Professional Programs. (2023). Economía circular: beneficios y retos para las empresas e individuos. Obtenido de <https://professionalprograms.mit.edu/es/blog/sostenibilidad/economia-circular/>

Naciones Unidas. (2023). Crecimiento económico - Desarrollo Sostenible. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>

Qlik. (2018). Diagrama de Sankey. Obtenido de https://help.qlik.com/es-ES/cloud-services/Subsystems/Hub/Content/Sense_Hub/Visualizations/VisualizationBundle/sankey-chart.htm

Revista de Economía Institucional. (2023). Economía circular: una aproximación a su origen, evolución e importancia como modelo de desarrollo sostenible. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/419/41977102006/html/>

Schroder, P. (2021). La economía circular en América Latina y el Caribe. Obtenido de <https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/2021-01/2021-01-13-spanish-circular-economy-schroder-et-al.pdf>

SciELO. (2015). Análisis de flujo de materiales en sistemas humanos. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372015000100014

SciELO. (2021). Evolución histórica-epistemológica de la economía circular. Obtenido de https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-34032021000100083

SlideTeam. (2023). La guía superrápida del diagrama de Sankey. Obtenido de <https://www.slideteam.net/blog/la-guia-superrapida-del-diagrama-de-sankey?lang=Spanish>

Upcyclea. (2023). Definición de economía circular: la guía completa. Obtenido de <https://upcyclea.com/es/definicion-de-economia-circular-la-guia-completa/>

Zerene, L. A. (2014). La riqueza regalada a la gran minería del cobre en Chile. Obtenido de https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/43463/RVE124_Sturla.pdf





**Análisis de Flujo
de Materiales
para la Minería
de Cobre en
Chile - Año 2023**
Octubre 2025

JEAN PAUL QUINTEROS BRISSO
PETAR OSTOJIC
LUIS MARTÍNEZ CERNA



CIRCULARTEC®

ISBN 978-956-08057-1-3

