

| VOL. 2 | JUNIO 2025 |

PERSPECTIVA

ESCORIA

TRATAMIENTO DE ESCORIAS EN LA INDUSTRIA MINERA



Paving the way for the future of mining



ÍNDICE



PÁGINA 3
SOBRE GEM

PÁGINA 4
EDITORIAL

PÁGINA 5
INTRODUCCIÓN

PÁGINA 7
VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL
REPROCESAMIENTO Y
REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS

PÁGINA 9
RIESGOS ASOCIADOS A LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN
PROYECTO DE REPROCESAMIENTO
DE ESCORIAS

PÁGINA 10
REPROCESAMIENTO Y
REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS EN
CHILE

PÁGINA 18
CONCLUSIÓN

PÁGINA 19
BIBLIOGRAFÍA

PÁGINA 22
CONTACTO

VOLUMEN 2
Junio de 2025

SOBRE

G

E

M

Somos una empresa de Ingeniería Industrial especializada en brindar apoyo a la industria minera en asuntos relacionados con gestión y economía. **Con más de 15 años de experiencia** y la exitosa implementación de más de **400 proyectos a nivel mundial**, nos destacamos por nuestra sólida trayectoria y compromiso con la excelencia en el sector.

GEM lidera la minería del **futuro** con soluciones innovadoras.

Desde la gestión del cambio climático hasta la minería submarina y la lixiviación *in-situ*, GEM se compromete a promover prácticas sostenibles, colaborativas y responsables, siempre con un enfoque en el impacto social y ambiental.



Cambio Climático



Colaboración



Data Science



Descarbonización



Evaluación Impacto Social



Lixiviación *In Situ*



Minería Espacial



Minería Submarina



Naturaleza



MENSAJE EDITORIAL

POR

En un escenario minero global cada vez más exigente en materia ambiental, económica y social, la gestión de residuos adquiere un nuevo protagonismo. Lejos de ser simples desechos, las escorias de fundición de cobre representan hoy una oportunidad concreta para avanzar hacia una minería verdaderamente circular y de alto valor agregado.

Este número de Perspectiva se centra en el reprocesamiento y reutilización de escorias, un tema que trasciende lo técnico para instalarse en el centro de la discusión sobre sostenibilidad industrial. Chile, con su vasta experiencia en tecnologías de flotación, ha logrado posicionarse como referente internacional en el reprocesamiento de escorias, contribuyendo no solo a recuperar minerales valiosos, sino también a disminuir el volumen de residuos depositados. Al mismo tiempo, se avanza en investigaciones sobre procesos de lixiviación, los que prometen una menor huella hídrica y energética.

Pero el potencial de las escorias va más allá del cobre. Su reutilización en la industria de la construcción como árido artificial abre nuevas posibilidades para reducir la presión sobre recursos naturales y contribuir a la regeneración de ecosistemas afectados por botaderos.



No obstante, el marco normativo nacional sigue siendo una traba significativa. Mientras en Europa, EE.UU. y Australia las escorias se valorizan como subproductos, en Chile siguen tratándose como residuos, restringiendo su aplicación a escala industrial.

Este número analiza casos nacionales e internacionales, explora tecnologías, examina los riesgos técnicos y económicos, y plantea recomendaciones concretas. En GEM estamos convencidos de que el cambio hacia una minería del futuro pasa por innovar también en la forma en que vemos y tratamos nuestros residuos. Transformar escorias en recursos no es solo una meta técnica, sino una señal clara de evolución cultural e industrial.

INTRODUCCIÓN

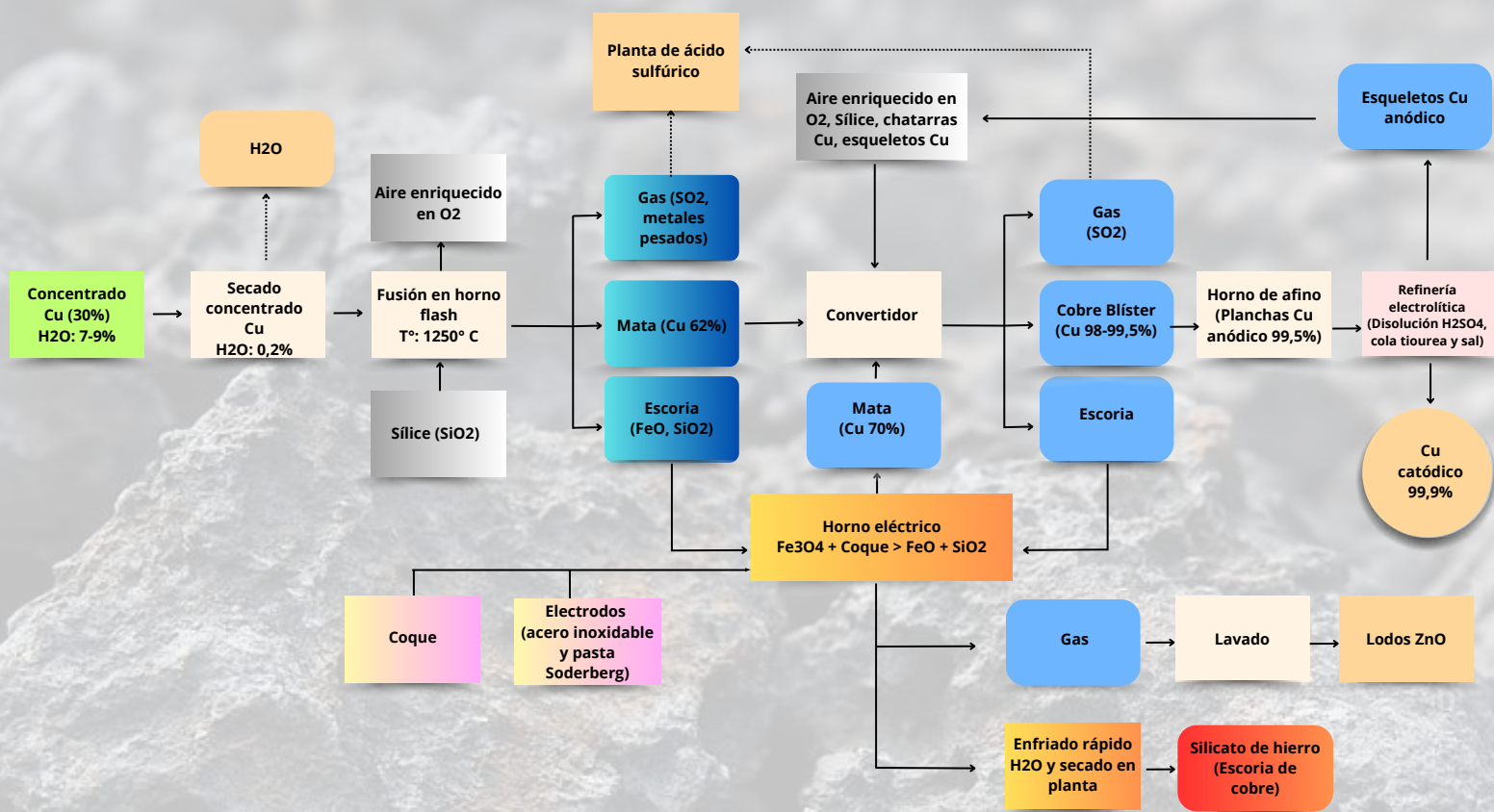
Se estima que por cada tonelada de cobre producido mediante procesos pirometalúrgicos se producen aproximadamente 2,2 toneladas de escoria (Charles et al., 2024). En Chile, se generan alrededor de 4,5 millones de toneladas de escoria al año y se estima que hay un acumulado histórico de más de 70 millones de toneladas en botaderos (Cayumil et al., 2022). Estas escorias, resultantes del proceso de fusión del concentrado de cobre en las fundiciones, se solidifican mediante enfriamiento rápido y contienen una mezcla de óxidos metálicos y no metálicos que al fundirse y enfriarse rápidamente forman un material similar a un vidrio. (Ver **Figura 1**) (Charles et al., 2024).

En el proceso de fundición en los hornos de fusión y conversión, se obtiene la mata (fase metálica con alto contenido de cobre) junto con escorias que contienen entre 1% y 2% de cobre. Estas son reprocesadas en hornos eléctricos de limpieza, generando escorias de descarte con aproximadamente 0,7% de cobre, compuestas principalmente de silicato de hierro, que se disponen en botaderos como residuo final (Codelco, 2019). Este estudio se enfocará en estas escorias, cuyo proceso de producción se muestra en la **Figura 2**.

FIGURA 1. SILICATO DE HIERRO CONOCIDO COMO ESCORIA DE COBRE

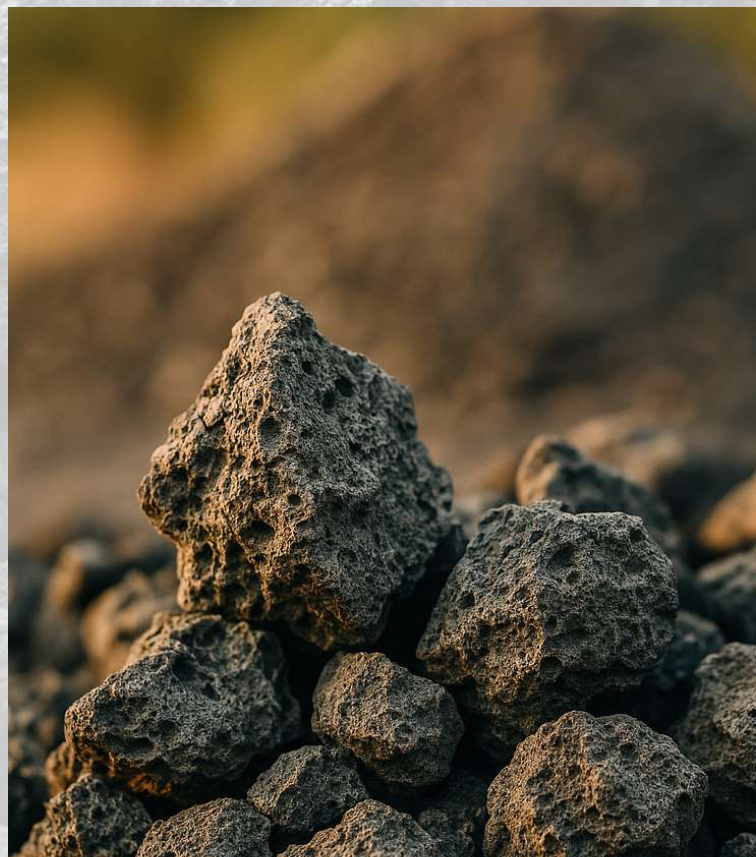


FIGURA 2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CÁTODOS DE COBRE Y GENERACIÓN DE ESCORIAS



Fuente: Elaboración propia base a Emgrisa (2021)

En un mundo que avanza hacia una economía circular[1], las escorias de cobre representan un desafío debido a su gran acumulación y uso de extensas superficies de terreno. En los últimos años, se han desarrollado tecnologías para la recuperación del cobre contenido en estas y para su reutilización en industrias como la construcción. Para la recuperación del cobre, se han explorado tecnologías de flotación, lixiviación y fundición de escorias, enfrentando desafíos relacionados con el alto consumo de energía y la complejidad de las reacciones químicas, que varían según la composición química y características físicas del residuo. Las escorias se han utilizado en otras industrias, como la construcción, en países como Estados Unidos, Alemania, China y Japón (MOP, 2025). Su resistencia y durabilidad las hacen una alternativa viable para reemplazar áridos naturales en caminos.



[1] Es un modelo de producción y consumo que promueve compartir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes tantas veces como sea posible para generar valor agregado. De esta forma, se extiende el ciclo de vida de los productos, reduciendo la generación de residuos y maximizando el uso de los recursos (Parlamento Europeo, 2023).

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL REPROCESAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS

VENTAJAS

El reprocesamiento de escorias permite extraer cobre residual y otros metales de interés, mejorando la eficiencia del proceso metalúrgico y reduciendo pérdidas en botaderos. En los últimos años se han implementado métodos de flotación y lixiviación, así como procesos de concentración gravimétrica y pirometalurgia secundaria para recuperar metales contenidos en escorias (Charles et al., 2024). La flotación es una de las técnicas más utilizadas, destacando la Planta de Flotación de Escoria de Potrerillos de Codelco, una de las más modernas del mundo, cuya tecnología de vanguardia ha mejorado la recuperación de cobre, oro y plata (Codelco, 2016).

Además, el reprocesamiento de escorias antiguas, con leyes de cobre entre 0,6% y 1% (Ciencia En Chile, 2024), podría ser una alternativa económicamente viable frente a la explotación de yacimientos de baja ley, optimizando costos operacionales. La recuperación de metales desde escorias de alta ley puede resultar más eficiente que su extracción desde depósitos primarios de menor concentración. No obstante, es fundamental evaluar los costos energéticos para garantizar su viabilidad a largo plazo.

Por otra parte, la reutilización de escorias permite aprovechar millones de toneladas actualmente en desuso. Estos materiales pueden utilizarse en construcción para pavimentos, hormigón, azulejos y vidrios, abrasivos de limpieza, relleno de suelos, entre otros (Alta Ley, 2024). Se ha demostrado que los silicatos de hierro no generan impacto al estar en contacto con agua, aire o tierra y su mayor dureza respecto a los áridos naturales mejoran la resistencia de mezclas con cemento, hormigón u otros materiales (MOP, 2025). Esto reduciría la demanda de materiales naturales y aliviaría la presión sobre las cuencas como la del Río Aconcagua en Chile, afectada por su extracción intensiva (Pizzoleo, 2025). Asimismo, la reutilización de escorias podría contribuir a la reducción del CAPEX asociado a los costos de cierre, disminuyendo la necesidad de disposición final y manejo de botaderos. Esto facilitaría la optimización de recursos y minimizaría los gastos relacionados con la gestión de estos residuos a largo plazo.

Finalmente, su reprocesamiento y reutilización ayudan a reducir el impacto ambiental generado por las grandes cantidades acumuladas en botaderos, que ocupan extensas superficies. Un ejemplo es la planta Codelco Ventanas, cuyo cierre dejó un depósito de aproximadamente 4,5 millones de toneladas de escorias en una superficie de 15 hectáreas, difícil de gestionar (Mendoza, 2025). Utilizar este material permitiría liberar superficie, favoreciendo el desarrollo de ecosistemas cercanos, como los humedales adyacentes a Ventanas (Ciencia En Chile, 2024). Además, reduciría la generación de polvo y ayudaría a mitigar la lixiviación de metales pesados en el medio ambiente.





DESVENTAJAS

Los procesos de lixiviación y flotación de escorias requieren un alto consumo energético debido a la etapa de chancado, la cual se ve afectada por la dureza del material. La flotación implica un mayor gasto energético, ya que, además del chancado, requiere etapas adicionales de molienda para lograr la granulometría adecuada. Aunque la reducción de material en botaderos puede generar beneficios económicos y ambientales, el consumo de energía y el desgaste de los equipos por la dureza de las escorias pueden limitar el reprocesamiento (Ciencia En Chile, 2024). Además, la infraestructura necesaria para estos procesos implica inversiones iniciales considerables, como ollas de enfriamiento controlado, molienda SAG y filtros a presión en las plantas de flotación de escorias (SMA, 2021).

A esto se suma que la composición química y propiedades de las escorias pueden variar significativamente según las características del mineral y los procesos de fundición utilizados. Por lo tanto, la recuperación de cobre y otros minerales puede ser compleja y difícil de estandarizar, ya que requiere un profundo conocimiento de las reacciones químicas y de la naturaleza física y química del residuo (Charles et al., 2024).

En general, la escoria podría presentar óxido de silicio (SiO_2), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de aluminio (Al_2O_3), azufre (S), cobre (Cu), cobalto (Co), manganeso (Mn), níquel (Ni) y zinc (Zn). Otro aspecto a considerar son los posibles impactos ambientales secundarios, como la generación de emisiones de gases y la contaminación de suelos o aguas. En los métodos pirometalúrgicos, se debe prestar especial atención a las emisiones atmosféricas, como ocurre con el mercurio durante el procesamiento de minerales de cobre, oro y zinc. Por otro lado, en los métodos hidrometalúrgicos, es crucial centrarse en el manejo de los agentes lixiviantes, como la destrucción del cianuro en los procesos de cianuración (Charles et al., 2024). Finalmente, en la reutilización de escorias en la construcción, existen limitaciones normativas que varían según el país.

En Chile, se consideran residuos y no subproductos, lo que impide su reutilización. Sin embargo, se están analizando cambios normativos para demostrar que las escorias son un producto seguro en términos de estabilidad para la construcción. Además, se han establecido alianzas público-privadas que incluyen pruebas piloto para avanzar en este ámbito. Recientemente, el Centro de Minería de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso realizó pruebas de laboratorio que confirman la inocuidad de la escoria de cobre, transformándola en un subproducto útil para construcción. Esto permitirá la rehabilitación de espacios públicos y la construcción de un mobiliario urbano por parte de Codelco Ventanas (Mch, 2025).

En contraste, países como Finlandia, Alemania y Japón, llevan décadas reutilizando escorias para la construcción de caminos, rompeolas y otras obras (CNN, 2024).

RIESGOS ASOCIADOS A LA IMPLEMENTACION DE UN PROYECTO DE REPROCESAMIENTO DE ESCORIAS

La implementación de un proyecto de reprocesamiento de escorias involucra diversos riesgos que pueden afectar su viabilidad técnica y económica. A continuación, se describen algunos de los riesgos más relevantes:

1. Precio del cobre: Las fluctuaciones en el precio del cobre afectan directamente los ingresos proyectados, generando incertidumbre sobre la rentabilidad del proyecto. Dado que las leyes de cobre en las escorias varían, su reprocesamiento solo será viable si los precios de mercado justifican los costos asociados.



2. Leyes de las escorias: Las escorias pueden presentar una composición altamente variable, lo que impacta directamente en su contenido de cobre y otros metales de interés. La variación en las leyes de cobre respecto a las estimaciones iniciales afecta la cantidad recuperable y la sostenibilidad del proyecto.



3. Recuperación de cobre: El comportamiento metalúrgico de las escorias varía según su composición química y mineralógica, por lo que la eficiencia del proceso de recuperación de cobre puede variar significativamente y generar desviaciones en los resultados esperados.



4. CAPEX: Debido al desconocimiento que aún persiste sobre las tecnologías de reprocesamiento de escorias distintas a la flotación, existe un alto nivel de incertidumbre en la estimación del CAPEX. La falta de experiencia con estos procesos puede resultar en sobrecostos durante los estudios de ingeniería, la adquisición de equipos y la construcción de la planta. Además, la dureza del material podría incrementar los costos de mantenimiento de los equipos (sustaining CAPEX), lo que afectaría la viabilidad económica a largo plazo.



5. OPEX: El consumo de energía es un factor crítico en el reprocesamiento de escorias, ya que ciertas tecnologías pueden requerir altas temperaturas o conminución intensiva. Además, la dureza del material puede afectar la eficiencia de los equipos de molienda y trituración. Estas variables pueden aumentar significativamente el OPEX y reducir la rentabilidad del proyecto.



6. Riesgos ambientales: La emisión de gases contaminantes, así como la posible filtración de agentes lixiviantes hacia cuerpos de agua o suelos, representan riesgos ambientales clave. Es fundamental implementar controles y monitoreos para minimizar estos impactos y cumplir con las regulaciones ambientales vigentes.



7. Plazo de ejecución: Aún se requiere un alto grado de investigación en el reprocesamiento de escorias para comprender las reacciones químicas y el comportamiento del material durante el procesamiento. Esta falta de conocimiento puede retrasar los plazos de ejecución del proyecto e impactar negativamente la planificación financiera.



REPROCESAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS EN CHILE

CONTEXTO: FUNDICIONES EN CHILE

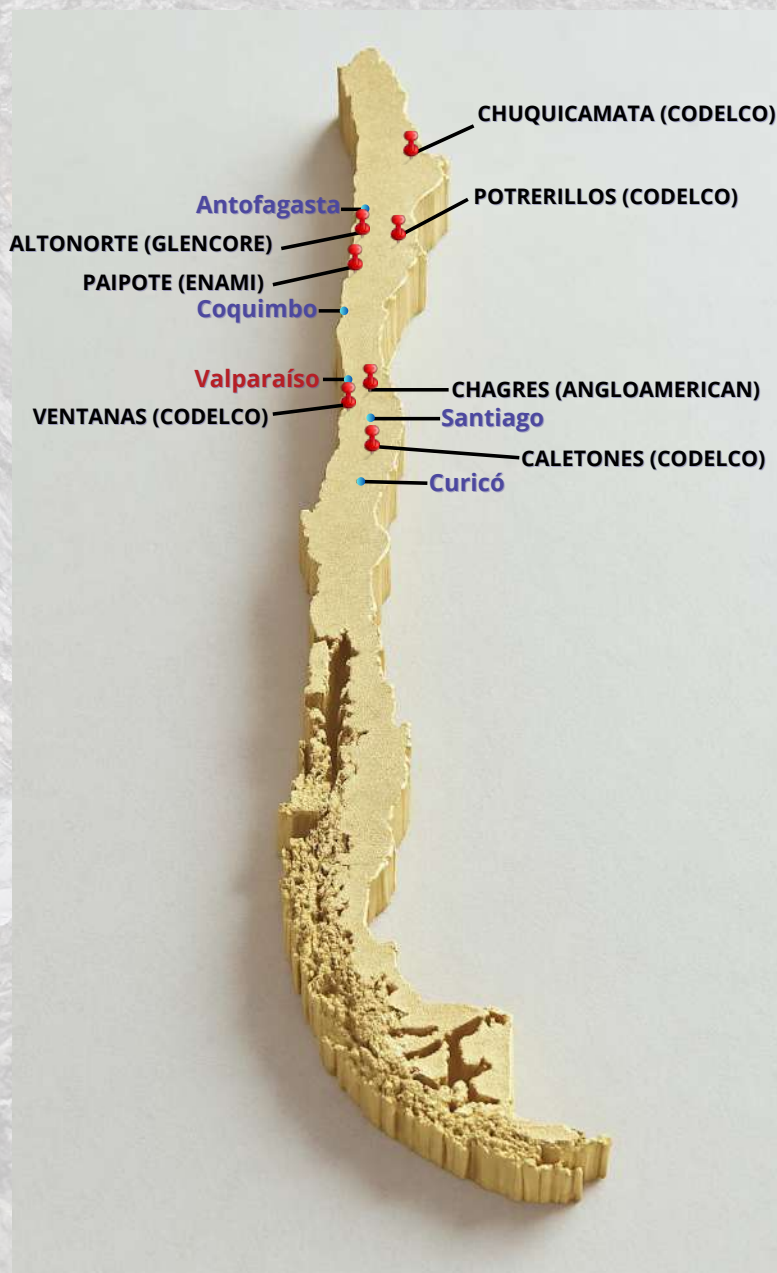
En Chile, existen siete fundiciones, de las cuales cinco están operativas y dos han cerrado en los últimos años: Ventanas de Codelco y Paipote de ENAMI (ver **Figura 3**). La producción de cobre de fundición ha disminuido un 21% en la última década, pasando de 1,4 [Mt] en 2014 a 1,1 [Mt] de cobre fino en 2023. Asimismo, su participación de mercado se redujo del 8,3% al 5,5% en el período 2014-2023 (BCN, 2024) (Ver **Figura 4**). Esta tendencia a la baja en la producción de cobre de fundición podría resultar en una menor generación de escorias, reduciendo así la disponibilidad de material para su reprocesamiento y reutilización. Como consecuencia, la vida útil del mercado de reprocesamiento también se vería limitada, especialmente si las fundiciones continúan enfrentando dificultades operacionales y cierran.

En este contexto, la revisión bibliográfica confirma que las cinco fundiciones operativas en Chile cuentan con sistemas de reprocesamiento de escorias, siendo la flotación la tecnología más utilizada y la única implementada a escala industrial. En contraste, las tecnologías de lixiviación aún se encuentran en etapa de investigación y prueba piloto. Un ejemplo de ello es el método de lixiviación amoniacal para escorias oxídicas de fundición, desarrollado por el Dr. Álvaro Aracena de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y patentado en 2022. Según los estudios realizados, esta tecnología podría recuperar hasta un 85% del cobre contenido en escorias (PUCV, 2022).

Cabe destacar que, en 2013, se publicó el Decreto Supremo N°28 del Ministerio del Medio Ambiente, que establece límites máximos de emisión y exigencias de eficiencia de captura de azufre y arsénico para las fundiciones chilenas. Este hito obligó a las fundiciones a invertir en la modernización de sus plantas, incorporando tecnologías de captura de gases y abatimiento de contaminantes, para cumplir con la normativa, que en su momento se estableció para entrar en vigencia a fines de 2018 (Sonami, 2015) y que hoy rige plenamente (ver **Tabla 1**).

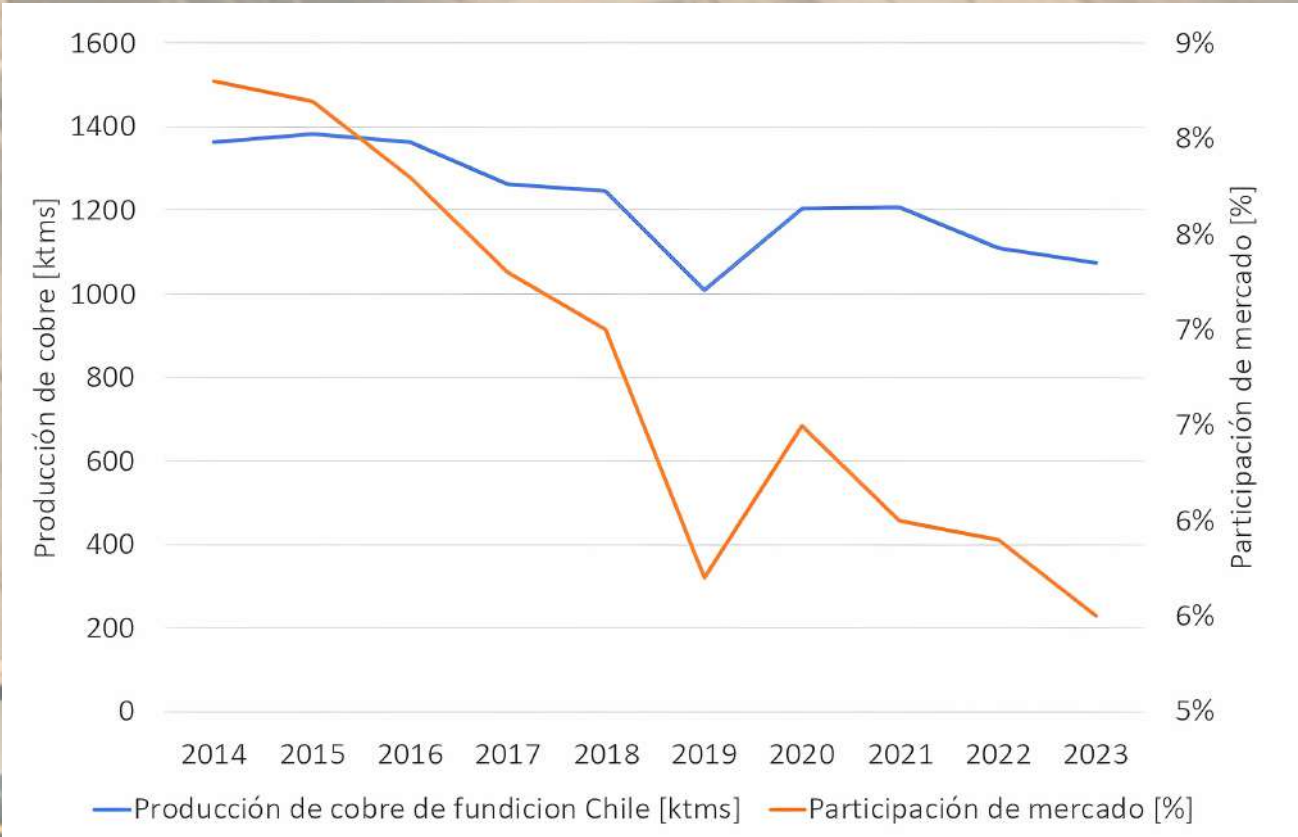
En particular, los procesos pirometalúrgicos en los hornos de limpieza de escorias pueden generar emisiones significativas de arsénico y dióxido de azufre, dependiendo de la composición de la escoria y las condiciones operativas. Por ello, varias fundiciones han implementado o evaluado alternativas para el reprocesamiento de escorias, con el objetivo de reducir emisiones gaseosas y mejorar la recuperación de cobre y otros metales (Codelco, 2016).

FIGURA 3. FUNDICIONES EN CHILE



Fuente: Elaboración propia en base a Reyes (2014)

FIGURA 1. PRODUCCIÓN DE COBRE DE FUNDICIÓN Y PARTICIPACIÓN DE MERCADO CHILE



Fuente: Elaboración propia en base a BCN (2004)

TABLA 1. NUEVA NORMA DE EMISIÓN DE AZUFRE Y ARSÉNICO PARA FUNDICIONES CHILENAS

FUNDICIÓN	Emisión SO ₂ [t/año] Promedio 2007-2011	Límite SO ₂ [t/año] Nueva Norma	Emisión As [t/año] Promedio 2007-2011	Límite As [t/año] Nueva Norma
Caletones	118.600	47.680	375	130
Chuquicamata	91.100	49.700	800	476
Potrerrillos	82.200	24.400	800	157
Altonorte	44.251	24.000	126	126
Palpote	23.000	12.800	34	17
Ventana	18.800	14.650	120	48
Chagres	13.440	13.950	95	35

Fuente: Sonami (2015)

CASOS DE REPROCESAMIENTO DE ESCORIAS EN CHILE

Uno de los ejemplos más destacados en el país es la fundición de Potrerillos, perteneciente a la División Salvador de Codelco, que ha invertido en una de las plantas de flotación de escorias más modernas del mundo. Esta instalación, puesta en marcha en 2015, cuenta con ollas de enfriamiento controlado, molienda SAG y filtros a presión de última generación, con una capacidad de diseño de 1.700 toneladas de escoria por día. El uso de tecnologías de vanguardia ha reducido las emisiones de gases a la atmósfera y mejorado la recuperación de cobre, oro y plata. Codelco anuncia que esta planta ha permitido mejorar la recuperación y el rendimiento, transformando una unidad que anteriormente operaba con pérdidas en una fundición más eficiente, tanto técnica como económicamente, gracias a la reducción de costos operacionales (Codelco, 2016).

De manera similar, la fundición Caletones, perteneciente a la División El Teniente de Codelco, ha incorporado tecnologías de reprocesamiento de escorias. En 2019, inició sus operaciones con una inversión aproximada de 277 [MUS\$], destinada a la construcción y operación de una planta de molienda y flotación para el tratamiento de escorias generadas en los Convertidores Teniente. Este proyecto surgió ante la necesidad de reemplazar los hornos de limpieza de escorias, cuyos niveles de emisión de arsénico impedían cumplir con la normativa ambiental, establecida para entrar en vigencia en 2018 (Portal Minero, 2015) y que hoy se encuentra aplicada.

Además, la planta de Caletones cuenta con una capacidad de procesamiento de 3.750 toneladas de escoria por día y una vida útil proyectada de 25 años (Contreras, 2019). Aproximadamente el 40% de sus costos operacionales están asociados al consumo de energía, de los cuales un 60% corresponde al funcionamiento del molino de bolas. Con el objetivo de optimizar la eficiencia energética y reducir costos, en 2023 se implementaron mejoras en el proceso, disminuyendo las revoluciones por minuto del molino de bolas.

Esta medida permitió un ahorro energético y económico equivalente a 1 [MUS\$] anuales (Codelco, 2023). Por otro lado, la fundición de Chuquicamata sigue utilizando hornos de tratamiento de escorias y no ha implementado nuevas tecnologías de reprocesamiento. Durante la década de 1990, las escorias generadas en los hornos, que de otro modo eran destinadas a botadero, fueron procesadas mediante flotación por la empresa externa Minera Cerro Dominador (Arancibia, 2008).

Sin embargo, en 2009, se puso fin a este contrato, con el objetivo de resolver internamente estas labores (La Tercera, 2010). Posteriormente, en 2020, Codelco puso en marcha el proyecto de potenciamiento del horno Flash, aumentando su capacidad e incorporando sistemas de captura y tratamiento de gases para cumplir con la normativa establecida en el decreto Supremo sobre emisiones de arsénico y azufre (Pares&Alvarez, 2021). Por su parte, la fundición Chagres de Anglo American firmó en febrero de 2024 un contrato con Minera Punitaqui para procesar 240.000 toneladas métricas secas de escorias mediante flotación, con el compromiso de vender el concentrado producido de vuelta a Anglo American (De Vicente, 2024). Adicionalmente, Anglo American desarrolla un proyecto de revalorización de escorias a través de lixiviación en la fundición Chagres, con el objetivo de producir cátodos de calidad comercial. No obstante, esta iniciativa aún se encuentra en fase de investigación (Consejo Minero, 2023). Finalmente, la fundición Altonorte de Glencore puso en marcha su Planta de Tratamiento de Escorias mediante flotación en 2001. Este proceso comprende el enfriamiento de escorias, molienda, espesamiento y filtración, para luego llevar el concentrado de vuelta a la fundición (Reyes, 2014). En 2021, se implementó un proyecto de optimización del sistema de enfriamiento de ollas, lo que permitió reducir significativamente el consumo de agua y la cantidad de cobre contenido en los relaves. Como resultado, el uso de agua disminuyó de 1,3 m³ a 0,4 m³ por tonelada de escoria, lo que representa una reducción del 69% (Glencore, 2024).

REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS EN CHILE

Respecto a la normativa vigente en Chile sobre la reutilización de escorias, en junio de 2003 se promulgó el Decreto Supremo N° 148, que establece el Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. Este decreto clasifica las escorias de cobre como residuos no peligrosos, siempre que no contengan arsénico, plomo o cadmio en concentraciones que les confieran características de peligrosidad. La **Tabla 2** presenta las Concentraciones Máximas Permisibles (CMP) para sustancias tóxicas en residuos no peligrosos. En caso de que las escorias contengan alguno de estos elementos, el generador debe demostrar ante la Autoridad Sanitaria que se cumplen los límites establecidos y, por lo tanto, que los residuos no son considerados peligrosos (BCN, 2004).

Un aspecto clave en la discusión actual es la clasificación de la escoria como residuo, ya que esta determinación puede limitar su aprovechamiento en diversas aplicaciones. Si bien el Decreto 148 no prohíbe explícitamente la reutilización de residuos no peligrosos en la construcción, su regulación genera incertidumbre sobre la viabilidad de su uso en este sector. Esto se debe a que, bajo la normativa vigente, cualquier material clasificado como residuo está sujeto a restricciones en su uso, transporte y disposición final, lo que dificulta su integración en actividades industriales como la construcción.

TABLA 2. CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMISIBLES (CMP) PARA RESIDUOS NO PELIGROSOS

Sustancia	CMP [mg/l]
Arsénico	5
Cadmio	1
Mercurio	0,2
Plata	5
Plomo	5

Fuente: BCN (2004)

Un avance significativo en esta materia fue la aprobación de la norma chilena NCh163:2024 "Áridos para Hormigón y Mortero", cuyo lanzamiento oficial tuvo lugar en diciembre de 2024. Esta norma permite la incorporación de áridos reciclados y artificiales, incluyendo aquellos provenientes de escorias y relaves, en la producción de hormigón. Con ello, se busca reducir la extracción de áridos naturales y fomentar la economía circular en la industria de la construcción (Moraga, 2024). A pesar de estos avances, la clasificación de la escoria como residuo sigue siendo un obstáculo para su reutilización a gran escala. Expertos y representantes de la industria coinciden en que el principal desafío es normativo, no técnico. Para facilitar su uso en la construcción y otras aplicaciones, se requiere que las autoridades ambientales y sanitarias reevalúen su clasificación, considerándola un subproducto minero en lugar de un residuo (NME, 2024). Esta distinción es clave: mientras un subproducto puede ser utilizado sin estar sujeto a estrictas regulaciones sobre manejo de residuos, un material clasificado como residuo enfrenta restricciones que pueden desincentivar su valorización.

En este contexto, han surgido diversas iniciativas para demostrar la viabilidad y seguridad de la reutilización de escorias en la construcción. Un ejemplo es el proyecto piloto de Codelco Ventanas, presentado en enero de 2025 a la Mesa Intersectorial para la Reutilización de Escoria de Cobre. Este proyecto tiene como objetivo sustituir áridos naturales por escoria de cobre en la fabricación de mezclas asfálticas para pavimentos (Pizzoleo, 2025). De manera similar, Anglo American firmó un acuerdo con el Ministerio de Obras Públicas (MOP) para evaluar el uso de residuos mineros en la construcción de infraestructura vial a nivel nacional. Este convenio establece el seguimiento de proyectos piloto en Fundición Chagres y Planta Las Tórtolas, que incluyen la aplicación de capas estabilizadas químicamente con escorias y relaves, además de una carpeta asfáltica de rodadura (MOP, 2025).

REPROCESAMIENTO Y REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS EN EL MUNDO

El reprocesamiento y reutilización de escorias mineras son prácticas abordadas en diversos países, ya que como es de esperar, esta problemática no solo es parte de la minería del cobre, sino que también afecta a la minería de otros commodities que generan este material, tales como el acero, hierro, zinc, níquel, entre otros. La optimización de recursos y la sostenibilidad han impulsado avances tanto tecnológicos como normativos a nivel mundial, con la finalidad de convertir este desafío en una oportunidad. En esta sección se revisarán las principales practicas globales en reprocesamiento y reutilización de escorias, prestando especial atención a los métodos más utilizados para la recuperación de minerales, así como en la evolución de las regulaciones de otros países que han facilitado su reutilización en otras industrias, promoviendo una economía más circular.

REPROCESAMIENTO DE ESCORIAS EN EL MUNDO

El reprocesamiento de escorias para la recuperación de cobre y otros minerales es una práctica común a nivel mundial que utiliza diversos métodos, entre los cuales destacan la fundición y la flotación. La selección del método más adecuado depende de múltiples factores, como el conocimiento técnico disponible, el tipo de mineral, la infraestructura disponible, las regulaciones locales y la composición específica de las escorias.

Ejemplos destacados de empresas internacionales que reprocesan escorias son Aurubis (Alemania) y Metso (Finlandia), esta última conocida por su tecnología Ausmelt TSL.

Aunque ambas empresas emplean hornos en sus procesos de fundición, la tecnología que utilizan se diferencia según sus innovaciones y enfoques específicos. Aurubis, en los últimos años, ha realizado importantes inversiones para optimizar el procesamiento de escorias en su planta de Bulgaria, centrándose específicamente en el proceso de enfriamiento. A diferencia del método tradicional de enfriamiento en fosas, la empresa implementará el uso de “slag pots” (recipientes de acero para contener y transportar escorias), lo que permitirá aumentar el rendimiento en la recuperación de metales y reducir las emisiones generadas. La puesta en marcha de esta nueva tecnología estaría prevista para 2026. Por su parte, la tecnología Ausmelt TSL de Metso se distingue por su funcionamiento mediante la inyección de combustible en la escoria, aprovechando la energía liberada durante la oxidación del mineral, lo que reduce el consumo de combustible en comparación con otros procesos.

En cuanto al reprocesamiento mediante flotación, un ejemplo es la empresa Namibia Custom Smelters, ubicada en Namibia. Esta empresa recupera el cobre presente en las escorias mediante flotación cuando su contenido de cobre varía entre el 0,8% y el 5% (Sibanda et Al., 2015). En estos casos, las escorias con alto contenido de cobre son enviadas a una planta especializada, donde primero son sometidas a un proceso de molienda y luego a flotación por espuma. Aunque la mayoría de los minerales de cobre en esta zona son sulfuros, los minerales de cobre en forma de óxido presentan desafíos adicionales para este proceso. En cuanto a la lixiviación, este método ha despertado un gran interés a nivel mundial, ya que se considera una alternativa potencialmente más económica, sencilla y limpia en comparación con la fundición y flotación. Su menor requerimiento energético, junto con una mayor eficiencia en el tratamiento de ciertos minerales, como los óxidos de cobre, lo hacen especialmente atractivo. Sin embargo, a pesar de la extensa investigación en este ámbito, aún no se puede considerar un proceso consolidado a escala industrial. Esto se debe principalmente a que la eficiencia y el comportamiento de las reacciones varían según la composición específica de cada mineral.

Es importante destacar que la recuperación de minerales de las escorias no siempre resulta económicamente rentable. La viabilidad comercial de implementar un proceso de recuperación depende del margen entre el valor de los metales recuperados y los costos operativos asociados, lo que puede variar significativamente de un caso a otro. Por ejemplo, en situaciones donde los niveles del mineral son bajos y los costos operativos altos, el tratamiento adicional de las escorias puede no justificar el gasto.

REUTILIZACIÓN DE ESCORIAS EN EL MUNDO

Como se mencionó en secciones anteriores, la clasificación de la escoria como subproducto, en lugar de residuo, tiene importantes implicancias para su reutilización y su potencial aprovechamiento en otras industrias, como la construcción.

En la Unión Europea, las escorias han dejado de ser consideradas un desecho y, en muchos casos, se les reconoce como un subproducto valioso. Esta transformación es posible gracias al Artículo 6 “Fin de la Condición de Residuo” de la Directiva 2008/98/CE sobre residuos de la Unión Europea, que promueve la economía circular al permitir que ciertos materiales, tras un proceso de valorización, dejen de ser clasificados como residuos. Para que esto ocurra, deben cumplir con los siguientes requisitos clave: tener un uso específico, contar con demanda en el mercado, cumplir con estándares técnicos y normativos, y no generar impactos adversos en la salud o el medio ambiente.

En cuanto a la evaluación de peligrosidad o potenciales impactos, La UE cuenta con el reglamento REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), vigente desde 2007, el cual establece un marco claro para la evaluación y control de sustancias químicas. A diferencia de sistemas en los que el Estado asume directamente la clasificación de los materiales, REACH traslada la responsabilidad a las propias empresas, quienes deben registrar, evaluar y gestionar los riesgos asociados a sus sustancias, demostrando que son seguras para su comercialización y uso. La Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (ECHA) supervisa este proceso y tiene la capacidad de restringir o prohibir aquellas sustancias que representen un riesgo inaceptable.

Dentro de este marco, REACH clasifica las sustancias según su peligrosidad en categorías específicas, tales como cancerígenas, mutágenas, tóxicas para la reproducción, explosivas, corrosivas, entre otras. Todas las clasificaciones en función del peligro definidas por el Reglamento de la UE se pueden observar en la **Tabla 3**. Este enfoque permite establecer límites de concentración considerando el impacto colectivo de cada grupo, en lugar de analizar cada sustancia de forma aislada. Un ejemplo de procedimiento para la determinación de la peligrosidad de un residuo de cierta clasificación se presenta en la **Figura 5**.

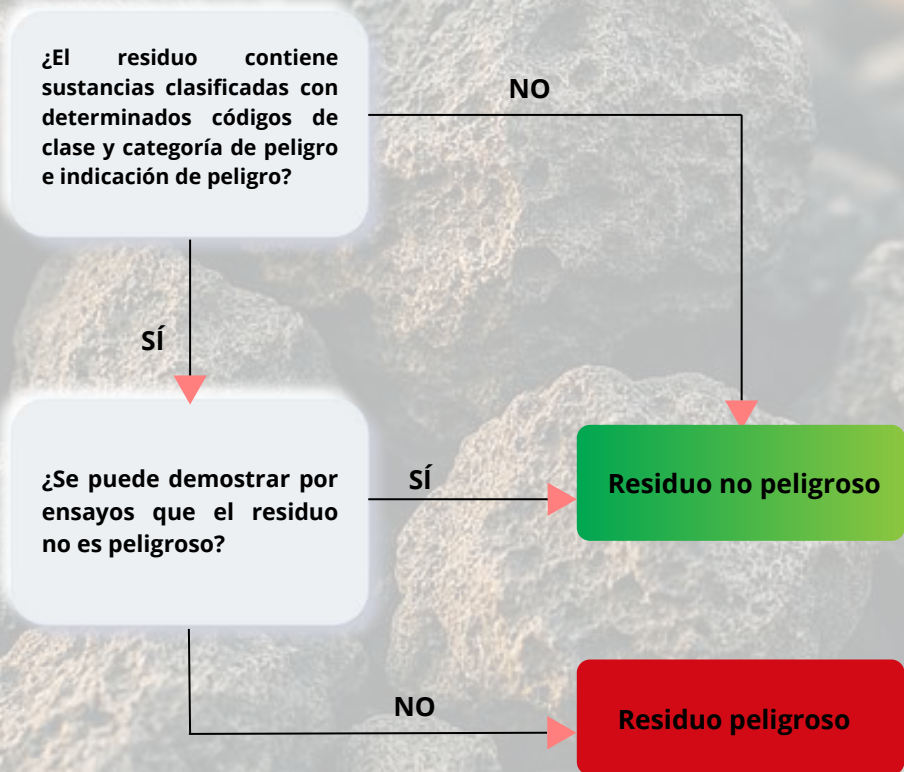
Un aspecto clave de REACH es que la evaluación de una sustancia parte de su composición original. Esto significa que no solo se analiza el elemento en su estado final, sino también los compuestos de los cuales proviene. En contraste, en Chile las sustancias se evalúan de manera independiente, sin considerar necesariamente su origen ni los efectos combinados de sus componentes, lo que puede resultar en una regulación que no se ajusta completamente a la realidad de ciertos materiales.

TABLA 3: CLASIFICACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PELIGROSIDAD DEFINIDAS EN EL REGLAMENTO (UE) N°1357/2014 EN FUNCIÓN DE LA NATURALEZA DEL PELIGRO

Peligros físicos			
HP1	Explosivo		
HP2	Comburente		
HP3	Inflamable		
HP15	Residuos que pueden presentar una de las características de peligrosidad mencionadas		
Peligros para la salud humana			
HP4	Irritante - irritación cutánea y lesiones oculares		
HP5	Toxicidad específica en determinados órganos / toxicidad por aspiración		
HP6	Toxicidad aguda		
HP7	Carcinógeno		
HP8	Corrosivo		
HP9	Infeccioso		
HP10	Tóxico para la reproducción Mutágeno		
HP11	Mutágeno		
HP12	Liberación de un gas de toxicidad aguda		
HP13	Sensibilizante		
Peligros para el medio ambiente			
HP14	Ecotóxicos		

Fuente: Elaboración propia en base a Gobierno de España (2021)

FIGURA 5. EJEMPLO DE PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE PELIGROSIDAD HP 1, HP 2, HP 3, HP 12 Y HP 15



Fuente: Elaboración propia



Un caso concreto de este modelo es la escoria de cobre, o silicato de hierro, la cual ha sido registrada en la UE desde 2010 como un subproducto seguro y valioso. Varias fundiciones del mundo (incluyendo chilenas) han demostrado mediante la REACH su seguridad en todo su ciclo de vida. En este sentido, la regulación europea no solo protege la salud y el medio ambiente, sino que también facilita la reutilización de materiales, impulsando un modelo más sostenible y competitivo.

Por otro lado, en Estados Unidos, la ley federal ha excluido ciertos tipos de escorias de las regulaciones relacionadas con los desechos peligrosos. Haciendo una breve revisión histórica, en 1978 se definieron los desechos peligrosos bajo el Subtítulo C de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA). Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA), estos incluyen materiales que presentan riesgos para la salud humana o el medio ambiente debido a su toxicidad, corrosividad, inflamabilidad o reactividad, lo que los somete a estrictas normativas en cuanto a su manejo, transporte y disposición. Sin embargo, dentro de esta clasificación, se estableció un grupo denominado "desechos especiales", cuya regulación requeriría estudios adicionales para determinar su nivel de riesgo.

Entre estos se incluyeron los materiales generados por la minería y el procesamiento de minerales, dentro de los cuales se encuentra la escoria producida en la minería de diversos metales como cobre, plomo y zinc. Finalmente, en 1980 con la Enmienda de Bevill (una de las Enmiendas a la Ley de Eliminación de Residuos Sólidos), se eximió a los desechos provenientes del beneficio y procesamiento de minerales de ser considerados residuos peligrosos a nivel federal.

En 1918, se fundó en Estados Unidos la Asociación Nacional de Escorias, que, hasta la actualidad, promueve el uso de escorias de alto horno y de horno de acero.

Siguiendo esta iniciativa, en 1960 se creó la Australasian Slag Association, conformada por productores, procesadores, clientes y proveedores de escorias de hierro y acero. Su nombre refleja la participación de miembros de Australia, Nueva Zelanda, Indonesia y Malasia.

El principal objetivo de la asociación es realizar investigaciones de interés común para sus miembros y divulgar hallazgos e información técnica que fomenten el uso beneficioso de las escorias de hierro y acero en materiales de construcción y otras industrias con potencial de aprovechamiento. La asociación reconoce como una de sus prioridades el cumplimiento de todas las leyes estatales y territoriales de los países miembros (Australasian Slag Association, 2025).

El estándar australiano AS 3582.2 (2016) – “Materiales Cementantes Suplementarios – Parte 2: Escoria – Granulado de alto horno molido” solo define límites en su composición de cuatro propiedades: azufre en forma de sulfuro, con un máximo de 1,5%; magnesio, con un porcentaje máximo de 15%; Aluminio, con un máximo de 18%; ion cloruro, con un máximo de 0,1%. Aunque la norma no exige pruebas en concreto para validar la idoneidad del producto, distingue entre fuentes de escoria “comprobadas” y “no comprobadas”. Estas últimas deben someterse a pruebas frecuentes durante seis meses para garantizar su calidad y consistencia. Además, aunque no todas las propiedades tienen límites definidos, los compradores pueden solicitar datos de prueba para cualquiera de ellas (Cement Concrete & Aggregates Australia, 2018).

Cabe destacar que, tanto en la Unión Europea como en Australia y Estados Unidos, las regulaciones pueden variar entre los diferentes países (en el caso de la Unión Europea) y entre los estados (en Estados Unidos y Australia). Esto implica que, además de las normativas generales, cada país o estado puede imponer restricciones adicionales a las ya establecidas.



Aurubis, empresa mencionada anteriormente, es proveedor líder mundial de metales no ferrosos y uno de los principales recicladores de cobre a nivel mundial, comercializando anualmente 1,2 millones de toneladas de silicato de hierro. En un encuentro *online* organizado por la Corporación Alta Ley de Chile (2024) que tenía como objetivo conocer el escenario internacional de valorización de escorias de fundición de la minería del cobre, Michael Hoppe, líder de proyectos en Aurubis, señaló que, aunque el material está registrado bajo el sistema REACH, su uso está restringido a ciertas aplicaciones. Además, mencionó la dificultad de desarrollar aplicaciones en un país y no poder comercializarlas en otro, lo que requiere un esfuerzo continuo con los legisladores para promover su uso a nivel global.

CASOS DE USOS Y OPORTUNIDADES DE LA ESCORIA EN EL MUNDO

Un ejemplo de escoria producida y ampliamente utilizada en diversos países del mundo es la escoria de horno de arco eléctrico (EAF, *electric arc furnace*), un subproducto de la industria siderúrgica que se comercializa internacionalmente. Esta escoria se ha empleado como alternativa a los fragmentos de roca en diversas aplicaciones, tanto en usos encapsulados (como en hormigón y asfalto) como en usos no encapsulados (material suelto para cobertura de suelos, utilizado en paisajismo, entre otros).

Sin embargo, en la actualidad, la EPA y otras organizaciones están investigando los posibles riesgos para la salud asociados con el uso de EAF no encapsulada en entornos residenciales y escolares. Se ha determinado que este material puede contener niveles elevados de manganeso, cromo hexavalente y otros metales, lo que podría suponer un riesgo para la salud humana. Existen advertencias sobre los posibles efectos adversos y recomendaciones para mitigar la exposición, aunque la investigación sigue en curso. En Estados Unidos la EPA (2024) señala que "la escoria EAF se utiliza en todo el país, pero su regulación varía significativamente de un estado a otro. Algunos estados permiten su uso residencial, mientras que otros lo prohíben. Para obtener más información, se recomienda consultar la normativa específica de cada estado".

En Australia, el uso de escoria de hierro y acero como sustituto del cemento comenzó alrededor de 1966, principalmente en las áreas de Port Kembla, Sídney y Newcastle. Sin embargo, el aumento en su precio y la disminución de la industria siderúrgica en esas zonas provocaron una caída en su utilización. A pesar de esto, el uso de escoria no ha desaparecido en Australia, ya que el granulado de escoria se importa desde Japón y se utiliza en la mayoría de los estados australianos (Cement Concrete & Aggregates Australia, 2018).

En cuanto a la escoria de cobre, en Singapur, originalmente se importaba en su mayor parte desde Japón para ser utilizada como material abrasivo. Sin embargo, con el uso repetido, la escoria pierde sus propiedades abrasivas, lo que llevó a que se descartara en vertederos al no tener un uso adicional.

Como resultado de lo anterior, y de la potencial contaminación causada por los desechos mineros depositados en los suelos, una sede de Holcim, empresa suiza líder en el suministro de materiales de construcción, desarrolló en Singapur un concreto que utiliza escoria de cobre lavada, reemplazando así la arena natural. Se ha demostrado que este concreto presenta estructuras más densas que el concreto convencional, lo que mejora su durabilidad, reduce su permeabilidad y aumenta su resistencia. Además, destacan los beneficios de sostenibilidad, ya que, además de sustituir recursos naturales escasos, el concreto con escoria requiere una menor cantidad de agua en su producción en comparación con el concreto convencional (Holcim, 2014).

En relación con lo anterior, el consorcio HARARE, integrado por 10 socios industriales, incluyendo a Aurubis, de 4 países europeos, tiene como objetivo demostrar métodos sostenibles para la producción de metales no ferrosos, utilizando hidrógeno como facilitador. Además, busca aprovechar los desechos como materia prima, con un interés particular en la reutilización de las escorias. En este sentido, el consorcio está explorando el uso de escorias de cobre como sustituto parcial e incluso total del cemento Portland en materiales de construcción (Harare, 2021).

CONCLUSIÓN

En cuanto al reprocesamiento de escorias, Chile se encuentra a la vanguardia a nivel mundial en tecnologías de flotación a escala industrial, sin presentarse grandes oportunidades de mejora en comparación con otros países. En el ámbito de la lixiviación, el país también ha avanzado significativamente, desarrollando investigaciones y pruebas piloto para su implementación. De concretarse esta tecnología a escala industrial, se generarían beneficios tanto económicos como ambientales, ya que permitiría reducir costos y disminuir las emisiones asociadas al procesamiento de estos materiales.

En el caso de la reutilización, la principal barrera en Chile es de carácter normativo, lo que ha retrasado su aprovechamiento en comparación con países como Estados Unidos, Europa y Australia. En Chile, las escorias se clasifican como residuos no peligrosos, lo que limita su uso en la construcción. En contraste, en otras regiones del mundo, estas son consideradas subproductos y han sido reutilizadas con éxito durante años. Chile podría beneficiarse del análisis de estos casos internacionales para adoptar un marco regulatorio más preciso y adaptado a la economía circular. Desarrollar normativas más específicas sobre los límites de uso y realizar estudios detallados sobre su impacto no solo favorecería la reutilización de las escorias, sino que también reforzaría la protección del medio ambiente y la salud pública. En este sentido, han surgido alianzas público-privadas que buscan validar, mediante estudios y pruebas piloto, la estabilidad y seguridad de las escorias en la construcción, con el objetivo de impulsar un cambio normativo. Sin embargo, en caso de no haber avances en este aspecto, una alternativa viable sería evaluar la exportación de escorias a mercados donde su uso ya está regulado y permitido.

En definitiva, el reprocesamiento y la reutilización de escorias representan una gran oportunidad tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Para las fundiciones, esto implicaría agregar valor a su cadena productiva al transformar un residuo en un recurso aprovechable, lo que a su vez reduciría los costos asociados a su disposición en botaderos. A su vez, el sector de la construcción se beneficiaría del uso de áridos artificiales, que presentan una mayor resistencia en comparación con los áridos naturales. Desde una perspectiva ambiental, su utilización contribuiría a reducir la explotación de cuencas fluviales, preservando ecosistemas y liberando espacio en los botaderos para otros usos. Todo esto conforma un círculo virtuoso de economía circular, alineado con las tendencias globales de sostenibilidad y aprovechamiento eficiente de los recursos.



BIBLIOGRAFÍA

Alta Ley. (17 de octubre, 2024). Expertos coinciden en la importancia de clasificar a las escorias como subproducto minero. <https://www.corporacionaltaley.cl/expertos-coinciden-en-la-importancia-de-clasificar-a-las-escorias-como-subproducto-minero/>.

Arancibia, A. (2008). MEJORAMIENTO PROCESO DE LIMPIEZA DE ESCORIA EN FUNDICION DE CONCENTRADO CHUQUICAMATA. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCI8576_01.pdf.4

Aurubis. (2023). Investing in sustainability: Aurubis optimizes slag processing at Bulgarian site. <https://www.aurubis.com/en/media/press-releases/press-releases-2023/investing-in-sustainability-aurubis-optimizes-slag-processing-at-bulgarian-site>.

Australasian Slag Association. (2025). About the ASA. <https://www.asa-inc.org.au/about-the-asa>.

BCN. (16 de junio, 2004). DECRETO 148 | APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS. Alta Ley. (17 de octubre, 2024). Expertos coinciden en la importancia de clasificar a las escorias como subproducto minero. <https://www.corporacionaltaley.cl/expertos-coinciden-en-la-importancia-de-clasificar-a-las-escorias-como-subproducto-minero/>.

Arancibia, A. (2008). MEJORAMIENTO PROCESO DE LIMPIEZA DE ESCORIA EN FUNDICION DE CONCENTRADO CHUQUICAMATA. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-8500/UCI8576_01.pdf.4

Aurubis. (2023). Investing in sustainability: Aurubis optimizes slag processing at Bulgarian site. <https://www.aurubis.com/en/media/press-releases/press-releases-2023/investing-in-sustainability-aurubis-optimizes-slag-processing-at-bulgarian-site>.

Australasian Slag Association. (2025). About the ASA. <https://www.asa-inc.org.au/about-the-asa>.

BCN. (16 de junio, 2004). DECRETO 148 | APRUEBA REGLAMENTO SANITARIO SOBRE MANEJO DE RESIDUOS PELIGROSOS. Apey, A., Ramírez, E., Gumucio, A., & Amunátegui, R. (2017). Agricultura chilena, reflexiones y desafíos al 2030, (1ra ed., pp. 147-178). ODEPA.

BCN. (2021). Colusión de Empresas. Disponible en: <https://www.bcn.cl/portal/leyfacil/recurso/colusion-de-empresas>.

BCN. (2021). Principales usos del agua desalada a nivel global y estrategias de mitigación de impactos ambientales del proceso de desalinización. Disponible en: [obtienearchivo \(bcn.cl\)](https://www.bcn.cl/portal/leyfacil/recurso/colusion-de-empresas)

BCN. (2024). Decreto 30 - MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. Disponible en: Ley Chile - Decreto 30 01-FEB-2024 MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE - Biblioteca del Congreso Nacional (bcn.cl)

Cabrera, F. (2023). ClustersMineros en Australia y Chile. Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/34387/1/Informe_BCN_Clusters_productivos_en_la_mineria_a_Australia_y_Chile_FINAL.pdf.

Cochilco. (2024). Inversión en la Minería Chilena: Cartera de Proyectos.

COCHILCO. (2024). Proyección de la producción esperada de cobre 2023-2034. Disponible en: https://www.cochilco.cl/Proyeccion_produccion_cobre_2023_2034_vfinal2.pdf.

BCN. (2024). Producción de mina, fundición y refinación de cobre. Asesoría Técnica Parlamentaria. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/36566/1/Informe_BCN_mercado_de_FURE_FINAL.pdf.

Cayumil, R., Carrasco, C., Aguilar, C., y Sánchez, M. (17 de octubre, 2022). VALORIZACIÓN DE RESIDUOS MEDIANTE PROCESOS METALÚRGICOS: EXPERIENCIAS LOCALES. Revista Nueva Minería & Energía. 62-64. https://www.litoralpress.cl/sitio/Prensa_Texto?LPKey=G7JGF7DRUZQ5SMZ3VHXOC557NMSNBPAVJ3YLTVEQIOEPUS7PWPDQ.

Cement Concrete & Aggregates Australia. (2018). Ground Slag Properties, Characterisation and Uses. TECH_NOTE_78_-_Ground_Slag.pdf.

Charles, D., Dávila, G., González, A., y Salinas, A. (2024). Revisión sobre la producción, usos y revalorización de escorias. ResearchGate, 76, 221-250. https://www.researchgate.net/publication/380320443_Revision_sobre_la_produccion_usos_y_revalorizacion_de_escorias.

Ciencia En Chile. (22 de mayo, 2024). La problemática de las escorias mineras: pasivo ambiental y potencial de reutilización. <https://www.cienciaenchile.cl/la-problematica-de-las-escorias-mineras-pasivo-ambiental-y-potencial-de-reutilizacion/#lectura>.

CNN. (3 de agosto, 2024). Escoria minera: Desafíos normativos y avances en reutilización | Minería 360. https://www.cnnchile.com/m360/escoria-minera-desafios-regulatorios-y-avances-en-reutilizacion-mineria-360_20240803/.

Cochilco. (2024). Análisis: Industria Mundial de Fundiciones. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. <https://www.cochilco.cl/web/otros-estudios-del-cobre/>.

Codelco. (14 de noviembre, 2016). Planta de Flotación de Escoria: Sangre, sudor y lágrimas. <https://www.codelco.com/sangre-sudor-y-lagrimas>.

Codelco. (2019). FUNDICIÓN "Recién salido del horno". 3-11. https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005205/fundicion_media_t_cnico_060119.pdf.

Codelco. (30 de enero, 2023). Aurubis y Codelco firman acuerdo para cooperar en una cadena de valor del cobre más sostenible y responsable. <https://www.codelco.com/aurubis-y-codelco-firman-acuerdo-para-cooperar-en-una-cadena-de-valor>.

Codelco. (3 de noviembre, 2023). Caletones: Planta de Tratamiento de Escorias ahorra 1 millón de dólares anuales en consumo energético. <https://www.codelco.com/planta-de-tratamiento-de-escorias-ahorra-1-millon-de-dolares-anuales-en>.

Contreras, C. (2019). ELABORACIÓN DE BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL SISTEMA DE MANEJO DE GASES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO PREDICTIVO QUE PERMITA MEJORAR LA CAPTURA DE AZUFRE Y ARSÉNICO EN LA PLANTA DE FUNDICIÓN CALETONES, CODELCO DIVISIÓN EL TENIENTE. Universidad Técnica Federico Santa María. <https://es.scribd.com/document/446219676/3560900251245UTFSM>

BIBLIOGRAFÍA

Consejo Minero. (5 de diciembre, 2023). Revalorización de Escorias de Fundición Chagres. Innovación y Tecnología. <https://consejominero.cl/plataforma-social/revalorizacion-de-escorias-de-fundicion-chagres/>.

Emgrisa. (2021). ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE FIN DE CONDICIÓN DE RESIDUO DE LAS ESCORIAS DE FUNDICIÓN DE HORNO DE ARCO ELÉCTRICO PARA SU USO COMO ÁRIDO Y OTROS USOS. Gobierno de España. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/images/es/estudio_fcr_escorias_vdef_julio21_tcm30-529624.pdf.

EPA Colorado. (2020). Cómo pueden los residentes minimizar el contacto con el material de jardinería de escoria de alto horno. <https://semspub.epa.gov/work/08/100008679.pdf>.

EPA. (13 de mayo, 2024). Electric Arc Furnace (EAF) Slag. <https://www.epa.gov/smm/electric-arc-furnace-eaf-slag>.

EPA. (14 de junio, 2024). Special Wastes. <https://www.epa.gov/hw/special-wastes>.

EPA. (7 de enero, 2025). Comprehensive Procurement Guideline (CPG) Program. <https://www.epa.gov/smm/comprehensive-procurement-guideline-cpg-program#content>.

Glencore. (8 de marzo, 2024). Fundición Altonorte pone en marcha innovador sistema de enfriamiento de escoria en ollas. <https://www.glencore.cl/media-blog/noticias/fundicion-altonorte-pone-en-marcha-innovador-sistema-de-enfriamiento-de-escoria-en-ollas>.

Gobierno de España. (2021). Guía Técnica para la Clasificación de los Residuos. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/guiatecnicaclasificacionderesiduosnov_21_tcm30-509157.pdf.

Harare. (2021). Valorisation of copper slags in the construction sector. <https://h2020harare.eu/valorisation-of-copper-slugs-in-the-construction-sector-why-and-how>.

Holcim. (2014). Building on ambition. Corporate Sustainable Development Report 2014. https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2022-03/2014_susdevholcim_sd-report2014.pdf.

Hughes, S. (2000). Applying Ausmelt technology to recover Cu, Ni, and Co from slags. JOM, 52, 30-33. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-000-0170-5>.

International Copper Association. (2024). Circularidad de las Escorias de Cobre y el Marco Regulatorio de la UE: Habilitando una Minería Sostenible.

https://www.corporacionaltaley.cl/wp-content/uploads/2024/10/Escorias-de-cobre-Economia-Circular-final-publico-2024-10-09.pdf?utm_source=chatgpt.com.

La Tercera. (17 de enero, 2010). Gobierno audita contrato de Codelco con minera de familia Noemi Callejas. <https://www.latercera.com/diario-impreso/gobierno-audita-contrato-de-codelco-con-minera--de-familia-noemi-callejas/>.

Mendoza, S. (28 de enero, 2025). Innovador proyecto de Codelco Ventanas utiliza 4,5 millones de toneladas de escoria de cobre en pavimentos. <https://www.chiletrends.cl/2025/01/28/innovador-proyecto-de-codelco-ventanas-utiliza-45-millones-de-toneladas-de-escoria-de-cobre-en-pavimentos/>.

MOP. (24 de enero, 2025). MOP y Anglo American impulsan la reutilización de residuos mineros para desarrollar infraestructura vial. <https://www.mop.gob.cl/mop-y-anglo-american-impulsan-la-reutilizacion-de-residuos-mineros-para-desarrollar-infraestructura-vial/>.

Moraga, V. (27 de diciembre, 2024). Nueva actualización de la Norma NCh 163 permitirá el uso de escorias y relaves en el hormigón. Centro UC. <https://centrohormigon.uc.cl/actualidad/noticias/935-nueva-actualizacion-de-la-norma-nch-163-permitira-el-uso-de-escorias-y-relaves-en-el-hormigon>.

NME. (15 de octubre, 2024). Expertos coinciden en la importancia de clasificar a las escorias como subproducto minero. Nueva Minería y Energía. <https://www.nuevamineria.com/revista/expertos-coinciden-en-la-importancia-de-clasificar-a-las-escorias-como-subproducto-minero/>.

Pares&Alvarez. (25 de septiembre, 2021). Potenciamiento del Horno Flash, Fundición Chuquicamata. <https://pya.cl/potenciamiento-del-horno-flash-fundicion-chuquicamata/>.

Parlamento Europeo. (24 de mayo, 2023). Economía circular: definición, importancia y beneficios. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

Pizzoleo, J. (28 de enero, 2025). Subsecretaria de Minería conoce avances de inédita pavimentación con escoria de cobre. Reporte Minero y Energético. <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/01/subsecretari-a-mineria-avances-pavimentacion-escoria-cobre>.

Portal Minero. (26 de octubre, 2015). Inician tramitación ambiental de Planta Tratamiento de Escorias de El Teniente. https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=104465887&utm_.

PUCV. (12 de octubre, 2022). Tecnología PUCV que utiliza método de lixiviación amoniacal para la recuperación de cobre desde escorias obtiene patente de invención por parte de INAPI. <https://www.pucv.cl/uuaa/tecnologia-pucv-que-utiliza-metodo-de-lixivacion-amoniaca-para-la>.

Mch. (20 de mayo, 2025). PUCV certifica estabilidad de la escoria de cobre de Codelco Ventanas. PUCV certifica estabilidad de la escoria de cobre de Codelco Ventanas - Mch.

BIBLIOGRAFÍA

Pizzoleo, J. (28 de enero, 2025). Subsecretaria de Minería conoce avances de inédita pavimentación con escoria de cobre. Reporte Minero y Energético. <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2025/01/subsecretaria-mineria-avances-pavimentacion-escoria-cobre>.

Portal Minero. (26 de octubre, 2015). Inician tramitación ambiental de Planta Tratamiento de Escorias de El Teniente. https://www.portalminero.com/pages/viewpage.action?pageId=104465887&utm_.

PUCV. (12 de octubre, 2022). Tecnología PUCV que utiliza método de lixiviación amoniaca para la recuperación de cobre desde escorias obtiene patente de invención por parte de INAPI. <https://www.pucv.cl/uuaa/tecnologia-pucv-que-utiliza-metodo-de-lixivacion-amoniaca-para-la>.

De Vicente, A. (21 de febrero, 2024). Anglo American firma acuerdo con Minera Punitaqui para recuperar cobre de escorias. Reporte Minero y Energético. <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2024/02/anglo-american-acuerdo-minera-punitaqui-recuperar-cobre-escorias>.

Reyes, G. (2014). EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN DE ESCORIAS PROVENIENTES DE LA FUNDICIÓN ALTONORTE. Universidad de Santiago de Chile. <https://es.scribd.com/document/358206738/Evaluacion-Del-Proceso-de-Flotacion-de-Escorias-Provenientes-de-La-Fundicion-Altonorte>.

Sibanda, V., Sipunga, E., Danha, G. y Mamvura, T. (2020). Enhancing the flotation recovery of copper minerals in smelter slags from Namibia prior to disposal. Heliyon, 6, 1. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844019367945>.

Sipunga, E. (2015). Optimization of the flotation of copper smelter slag from Namibia Custom Smelters' Slag Mill Plant. University of the Witwatersrand, Johannesburg. <https://wiredspace.wits.ac.za/server/api/core/bitstreams/e6aea972-2416-4f61-9b5b-3aeb01920780/content>.

SMA. (30 de abril, 2021). FORMULA CARGOS QUE INDICA EN CONTRA DE CORPORACIÓN NACIONAL DEL COBRE DE CHILE. <https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/20601043485>.

Sonami. (2015). Fundiciones de Cobre en Chile. [https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/07/FCM-](https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/07/FCM-20150610-Com-Miner%C3%ADa-y-Energia-Senado-Fundiciones.pdf)

20150610-Com-Miner%C3%ADa-y-Energia-Senado-Fundiciones.pdf. Vernon, P. y Burks, S. (1997). The application of Ausmelt technology to base metal smelting, now and in the future. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. <https://www.saimm.co.za/Journal/v097n03p089.pdf>.

Your Europe. (2024). Registro de sustancias y mezclas químicas en la UE (Reglamento REACH). https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/chemicals/registering-chemicals-reach/index_es.htm.



AUTORES



MARÍA JESÚS OVALLE
Project Engineer
mjovalle@gem-mc.com



MARÍA FRANCISCA REBOLLEDO
Project Engineer
mfrebolledogem-mc.com

EDICIÓN

MERY-ANN GIESE
Jefa de Administración y Marketing
magiese@gem-mc.com

JAVIERA ALEMPARTE
Encargada de Prensa y Comunicaciones
jalemparte@gem-mc.com

Contacto comercial por áreas de práctica



Sebastián Faúndez
Analytics Practice Leader
sfaundez@gem-mc.com



Patricio Faúndez
Economics Practice Leader
pfaundez@gem-mc.com



Pablo Faúndez
Environment and Society
Practice Leader
pmfaundez@gem-mc.com



Isaac Paredes
Evaluation Practice Leader
iparedes@gem-mc.com



Manuel Cordero
Planning Practice Leader
mcordero@gem-mc.com



Catalina López
Strategy Practice Leader
clopez@gem-mc.com

Contacto comercial para Australia y la región Asia-Pacífico



Cristóbal Olave
Business Development Manager
colave@gem-mc.com

Contacto comercial



Felipe Guzmán
Partner - Chief Financial,
Administration and Marketing
Officer

OFICINAS



Chile: Las Condes 12.461,
torre 3, oficinas 805-806,
Las Condes, Santiago



9 Straits View, Marina One West
Tower, #05-07, Singapore 018937

