

De relaves a material cementicio suplementario: peligros, verificación y el eslabón regulatorio faltante en Chile

Cristián Sánchez López Giorgio Reveco Barraza

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Central de Chile, La Serena, Chile | cristian.sanchez@ucentral.cl

Proyecto «Valorización de Relaves Abandonados en la Región de Coquimbo», código 40075890-0 del Banco Integrado de Proyectos, financiado por el Gobierno Regional de Coquimbo mediante el Fondo Regional para la Productividad y el Desarrollo y ejecutado por la Universidad Central de Chile.

Los relaves en Chile: un pasivo masivo que la Política Nacional Minera 2050 propone valorizar

836

depósitos de relaves en el catastro nacional

423

de ellos en la Región de Coquimbo

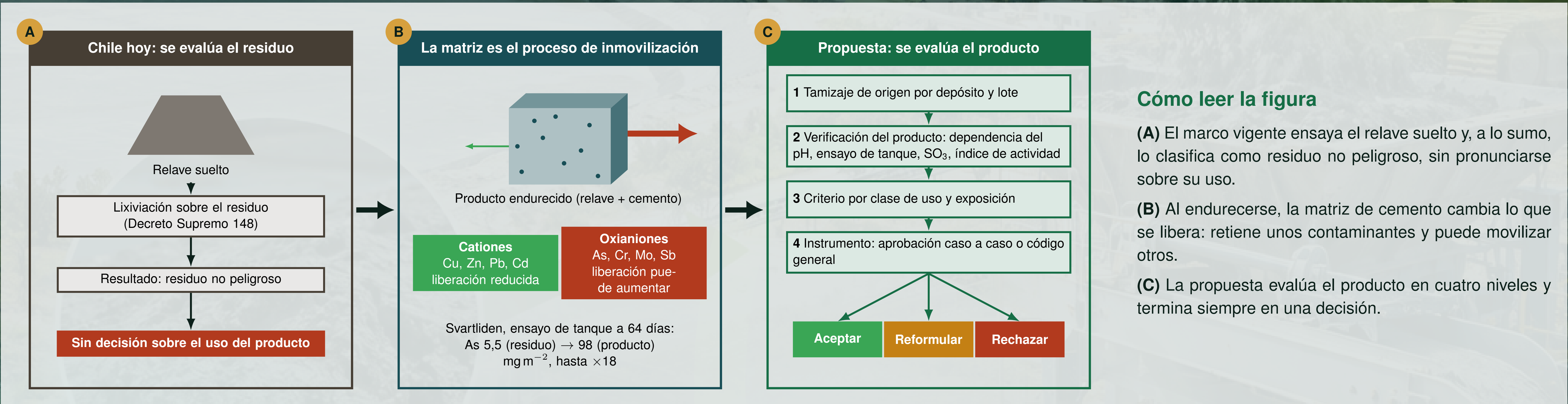
269

sin propietario identificado

Catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería, actualizado a octubre de 2025.

Regular el producto endurecido, no el residuo suelto.

Si el relave sustituye parte del cemento, la matriz cementicia es el proceso que inmoviliza sus contaminantes; de donde lo que debe evaluarse es el producto endurecido en su uso real, no el relave suelto. Y la regla es simétrica: la matriz reduce la liberación de cationes metálicos, pero puede aumentar la de arsénico.



1 ¿Por qué importa?

El relave podría sustituir parte del cemento, pero ninguna norma chilena permite certificar el producto que resulta.

Sustituir clínker reduce la huella de carbono del cemento, y el agotamiento de cenizas volantes y escoria granulada vuelve candidatos a los relaves por disponibilidad y cercanía. Pero la evidencia es *condicionada*: la idoneidad depende de cada relave y de cada aplicación; por tanto, no cabe declararlos idóneos como categoría, y lo que se requiere es un **procedimiento de demostración**.

2 ¿Cómo se analizó?

Un ensayo sin criterio produce un número, no una decisión: para cada peligro se exigen tres elementos.

Verificación	qué se mide, y sobre qué: el residuo o el producto
Criterio	contra qué umbral, y para qué uso
Instrumento	quién convierte el cumplimiento en autorización

Cada elemento se puntúa de 0 (ausente) a 3 (vinculante y referido al producto), a partir de la literatura sobre relaves de cobre, oro y hierro, seis jurisdicciones de referencia y la normativa chilena al 31 de agosto de 2026.

3 ¿Qué peligros presenta el relave?

Siete mecanismos de peligro; la matriz de cemento neutraliza unos y puede agravar otros.

Mecanismo	Relaves	Cómo se verifica
M1 Oxidación de sulfuros y acidez	Cu, Au	Especiación de azufre; balance ácido-base
M2 Movilidad de cationes (Cu, Zn, Pb, Cd)	Cu, Au	Dependencia del pH; ensayo de tanque sobre monolito
M3 Movilidad de oxianiones (As, Cr, Mo, Se, V, Sb)	Au, Cu	Como M2, con atención al rango alcalino y a la carbonatación
M4 Radiactividad natural (tamizaje)	todos	Espectrometría gamma; índice de actividad
M5 Reactivos residuales (cianuro, xantatos, Hg)	Au	Cianuro disociable; mercurio total
M6 Polvo respirable (solo en el procesamiento)	todos	Higiene ocupacional
M7 Sulfato interno y expansión	Cu, Au	SO ₃ ; expansión por sulfatos

Relaves: Cu = de flotación de cobre; Au = de oro; «todos» incluye los de hierro.

El contraejemplo (M3). Arseniato, cromato y molibdato son *más* solubles al pH elevado de la pasta, y su retención depende del elemento, la especiación, el aglomerante y el tiempo: incorporar el relave al cemento no garantiza, por sí solo, su aceptabilidad.

Términos clave

- Material cementicio suplementario:** sustituye parcialmente al clínker del cemento.
- Lixiviación del residuo:** ensayo sobre el relave granular a pH fijo; informa sobre el residuo, no sobre el producto.
- Ensayo de tanque:** monolito endurecido sumergido en agua; mide la emisión acumulada por superficie (mg m⁻²).
- Oxianión:** contaminante en forma aniónica (arseniato, cromato, molibdato) cuya solubilidad crece con el pH.
- Instrumento habilitante:** acto de autoridad que convierte el cumplimiento técnico en autorización de uso.

6 ¿Qué se concluye?

- La unidad de regulación es el **producto endurecido** bajo su escenario de uso, y el ensayo sobre el producto puede tanto rechazar como aceptar.
- Chile debe **extender el instrumento** donde ya existe verificación y **construir la tríada completa** para radiactividad, reactivos residuales y sulfato interno.
- El instrumento debe admitir un solicitante **distinto del generador original**: 269 depósitos carecen de propietario identificado.
- No se requiere reforma legal, sino un reglamento que fije **qué se mide, contra qué se compara y quién decide**.

4 ¿Qué cubre hoy la norma chilena?

La escoria de cobre ya tiene una vía completa; los relaves tienen un ensayo sobre el residuo y nadie que decida sobre el producto.

Mecanismo	Escoria			Relaves			Por qué
	V	C	I	V	C	I	
M1 Oxidación de sulfuros	1	0	3	1	0	1	Guía de estabilidad química para el cierre, no vinculante; sin criterio de producto
M2 Cationes	2	2	3	2	2	1	Lixiviación sobre el residuo con los máximos del Decreto Supremo 148; nada sobre el producto
M3 Oxianiones	2	2	3	2	2	1	Como M2; el ensayo a pH fijo no anticipa el rango alcalino ni la carbonatación
M4 Radiactividad	3	3	3	0	0	1	Índice de actividad exigido a la escoria; ningún instrumento lo exige a los relaves
M5 Reactivos	0	0	3	0	0	1	Sin instrumento de producto; cianuro solo en descargas líquidas
M6 Polvo	2	2	2	2	2	2	Higiene ocupacional y evaluación ambiental, externas al producto
M7 Sulfato interno	3	3	3	1	1	0	NCh163 y NCh3894 para la escoria; NCh148 no contempla relaves

V = verificación, C = criterio, I = instrumento; de 0 (ausente) a 3 (vinculante y referido al producto). La escoria cuenta desde febrero de 2026 con el Decreto Supremo 46/2025. Los valores no se suman.

La brecha de los relaves no es uniforme: en la lixiviación (M2, M3) existen ensayo y umbral, aunque sobre el residuo, y falta el **instrumento**; en radiactividad, reactivos y sulfato interno (M4, M5, M7) falta la **tríada entera**.

5 ¿Funciona la propuesta con datos reales?

Con datos ya publicados, la propuesta llega a una decisión donde el marco actual, a lo sumo, clasifica.

Estudios con ensayo de tanque sobre monolitos con relaves o materiales análogos, contrastados con lo que permitiría concluir el marco basado en el residuo:

Caso publicado	Decisión de la propuesta	Marco actual (residuo)
Svartliden, relave aurífero (As 98 frente a 5,5 mg m ⁻²)	Cumple la emisión; falla en SO ₃ y durabilidad: reformular	Sin decisión
Casa Berardi, tres aglomerantes	Acepta cemento y escoria; rechaza ceniza volante	Sin decisión sobre el uso
Giant Mine, con polvo de tostación	Rechazar (más de mil veces el umbral)	Rechazo previsible
Hormigón con escoria de cobre	Aceptar; elegible para código general	Caso a caso según el Decreto Supremo 46

La lección de Svartliden. El producto liberó hasta 18 veces más arsénico que el relave suelto; de donde el ensayo sobre el residuo no es una cota conservadora para los oxianiones, y el ensayo sobre el producto es necesario.

Índice de preparación. Con pesos iguales vale 0,89 para la escoria de cobre y 0 para el relave de Svartliden: basta un mecanismo activo sin criterio o sin instrumento para anularlo.