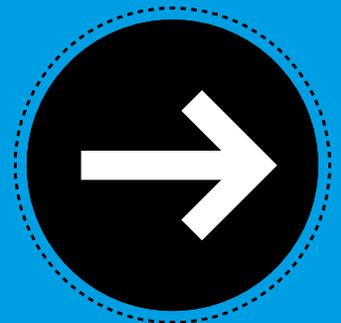


O.2

Proyecto apoyado por



MANUAL DE USO PÚBLICO



**Reprocesamiento de
relaves y recuperación
de elementos de valor
D288-MAN-GN-P2-001**

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO / 16PTECME-66527

Manual de Uso Público

Esta publicación fue elaborada por
JRI Ingeniería S.A. y EcoMetales Limited

Edición
Primera. Santiago, 2020

Redacción y desarrollo de contenidos:

Isabel Gutiérrez Ubeda, Alejandra Álvarez Vallejos,
Irene Aracena Pérez, Juan Rayo Prieto,
Juan Cornejo Bravo, Fernando Vera Jerez

Edición

María José Luque Guerrero
Soledad Ugarte Montalva

Diseño Gráfico

24-7 Comunicaciones

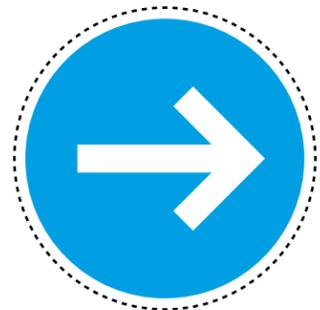
Agradecimientos por sus aportes y revisión a:

Roberto Mallea Correa,
Andrés Reghezza Inzunza, Jorge Ipinza Abarca,
Carmen Castagneto Arancibia, Rodrigo Vergara Belmar,
Bernarda Pérez Valderrama, José Luis Valdés Letelier,
Guillermo Olivares Q. y Gullibert Novoa Godoy

Registro de Propiedad Intelectual: En trámite
ISBN: 978-956-402-339-7



MANUAL DE USO PÚBLICO



**Reprocesamiento de
relaves y recuperación
de elementos de valor
D288-MAN-GN-P2-001**



Contenido

	PROPÓSITO DEL MANUAL	8
	PARTE I – LOS RELAVES COMO MATERIA PRIMA	10
1.0	POTENCIAL ECONÓMICO	12
2.0	CARACTERIZACIÓN DEL RELAVE	19
2.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES Y ELEMENTOS DE INTERÉS	19
	PERFORACIÓN	20
	MUESTREO REPRESENTATIVO	21
	ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS	21
3.0	EXPLOTACIÓN SECUNDARIA	24
	ANÁLISIS GENERAL	24
3.1	REMOCIÓN POR CARGADOR Y CAMIÓN	26
3.2	REMOCIÓN POR PITONEO HIDRÁULICO	27
3.3	REMOCIÓN POR DRAGADO	28
3.4	COMBINACIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN Y COSTOS ASOCIADOS	29
	PARTE II – REPROCESAMIENTO DE RELAVES	32
4.0	OPERACIONES UNITARIAS A CONSIDERAR	34
4.1	CONCENTRACIÓN FÍSICA	34
4.1.1	DESLAMADO	34
4.1.2	MOLIENDA DE GRUESOS	36
4.1.3	SEPARACIÓN MAGNÉTICA	37
4.1.4	FLOTACIÓN	37
4.1.5	CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	40
4.2	DISOLUCIÓN QUÍMICA	41
4.2.1	LIXIVIACIÓN	41
4.2.2	TRATAMIENTO PREVIO A LA LIXIVIACIÓN	48
4.3	CONCENTRACIÓN QUÍMICA	50
4.3.1	EXTRACCIÓN POR SOLVENTES (SX)	50
4.3.2	INTERCAMBIO IÓNICO (IX)	53
4.3.3	ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO	54
4.3.4	CRISTALIZACIÓN	56
4.3.5	PRECIPITACIÓN	56
4.3.6	ELECTROOBTENCIÓN	57
5.0	CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA DEFINIR EL PROCESO ADECUADO	60
6.0	CASO DE ESTUDIO	66
6.1	IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE VALOR Y POTENCIAL ECONÓMICO	66
6.2	IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO METALÚRGICO	70
6.3	VALIDACIÓN DEL PROCESO	72
	PARTE III – OTROS ASPECTOS CLAVES A CONSIDERAR	74
7.0	DEPOSITACIÓN DE LOS RESIDUOS	76
7.1	REDEPOSITACIÓN DE RELAVES	77
8.0	SUMINISTROS CRÍTICOS	83
8.1	AGUA	83
8.2	ELECTRICIDAD	85
8.3	COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES	85
8.4	REACTIVOS	85
9.0	ASPECTOS LEGALES	86
9.1	MEDIO AMBIENTE	86
9.2	PROPIEDAD	89
10	RELACIÓN CON LAS COMUNIDADES	91
11	ANÁLISIS DE RIESGOS Y OPORTUNIDADES	92
11.1	RIESGOS DE LA NATURALEZA	92
11.2	RIESGOS DEL NEGOCIO	92
11.3	OPORTUNIDADES	94
	GLOSARIO	96
	ABREVIATURAS	98
	TABLA PERIÓDICA	99



Propósito del manual

Chile es el principal productor de cobre a nivel internacional, cubriendo entre el 25% y 30% de la oferta mundial. Además, es el segundo productor de molibdeno, el cual se obtiene mayoritariamente como subproducto de la minería del cobre. En menor proporción, tiene presencia en el mercado de otros metales –como oro y plata– junto con otros productos provenientes de los llamados minerales industriales. Todo esto posiciona a la industria minera nacional como uno de los pilares fundamentales de la economía nacional, aportando alrededor de un 10% al PIB.

La minería chilena y mundial enfrenta grandes desafíos, principalmente, en materias de productividad y de sustentabilidad. Estos desafíos están relacionados con aumentar los volúmenes de tratamiento para mantener el mismo nivel de producción, ante la disminución de las leyes de las menas; aumentar la eficiencia energética; optimizar el uso del agua ante la escasez hídrica; disminuir

la huella de carbono y los impactos ambientales; responder a mayores exigencias legales y atender las demandas de las comunidades locales y de la sociedad en general.

Como respuesta a lo anterior, en el año 2016 se construye la Hoja de Ruta de la Minería Chilena, al amparo del Programa Nacional de Minería Alta Ley, actualmente Corporación Alta Ley¹. Dicha Hoja de Ruta o Roadmap Tecnológico de la Minería, actualizado en su versión 2.0 el año 2019, identifica las oportunidades, requerimientos de I+D y desafíos para generar capacidades tecnológicas en el país, agrupándolos en los siguientes núcleos impulsores: Exploraciones, Operación y Planificación Minera, Concentración, Relaves, Fundición y Refinería, Hidrometalurgia, Minería Verde, y Usos del Cobre.

Dentro del Núcleo Relaves, se encuentra el desafío de promover su conversión desde un pasivo a un activo, emergiendo como línea de I+D el generar valor a partir de los depósitos de relaves de forma

sustentable y segura, integrando así los conceptos de economía circular y minería secundaria en la industria local, contribuyendo además a mejorar la imagen pública del sector minero.

En este sentido, la transformación de los depósitos de relaves –abandonados o inactivos– desde un pasivo a un activo, además de despertar un interés comercial por su reprocesamiento, ofrece la oportunidad de reducir su volumen, liberando espacios físicos –que en muchos casos son aledaños a comunidades–, eliminar el riesgo de contaminación producto de drenajes ácidos, y varias otras externalidades positivas que contribuyen a un futuro sustentable de la industria minera.

Sumado a lo anterior, también se encuentran los relaves frescos. Actualmente, la explotación de cobre en Chile genera alrededor de 600 millones de toneladas de relave cada año, y se proyecta un incremento a 1.000 millones o superior para la siguiente década. Su reprocesamiento ofrece la oportunidad de recuperar el agua para su reutilización en

la planta, o bien tratarla para otros fines.

Sernageomin ha catastrado la existencia de 757 depósitos de relave², los cuales están clasificados en activos (112), inactivos (467), abandonados (173) y en construcción (5). En este catastro se cuantifican un total aproximado de 11.266 Mt de relaves depositados en Chile, con una capacidad autorizada de hasta 26.289 Mt.

Estudios realizados por instituciones públicas y privadas como Sernageomin, Cochilco, Camchal-BGR y JRI, evidencian la presencia de diversos elementos químicos en los relaves, desde los tradicionales para la minería actual, como Cu, Mo, Au, Ag y Fe, hasta elementos escasos y estratégicos a nivel mundial, como Co, Cr, V y REE.

Estos elementos químicos se encuentran generalmente en bajas concentraciones (trazas) en los relaves, por ende, configurar una adecuada ruta de procesamiento metalúrgico requiere de un profundo conocimiento de la mineralogía y de las alternativas tecnológicas disponibles para llevarlo a cabo. Además, es impor-

ante que los procesos extractivos tengan un carácter polimetálico, es decir, se enfoquen en recuperar dos o más especies de interés, buscando el equilibrio entre la factibilidad técnica y la rentabilidad económica, utilizando las tecnologías existentes o una adaptación de estas a las características físicas y químicas propias de un relave.

En este contexto, el presente Manual de Uso Público ha sido elaborado para proveer un marco de antecedentes, alternativas tecnológicas, criterios y aspectos claves que se deben considerar para el reprocesamiento de relaves y recuperación de elementos de valor económico.

Asimismo, mediante este documento se espera motivar a diferentes actores del rubro minero, a visualizar los relaves como yacimientos artificiales y evaluar su explotación (minería secundaria). El desafío es generar y transferir cada vez más conocimiento asociado a este tipo de minería. En esto, las compañías mineras, la academia y centros de investigación serán los principales emprendedores en desarrollar la minería secundaria y poli-

metálica. Los proveedores de equipos y reactivos probablemente deberán adaptar sus tecnologías a esta nueva materia prima. Los laboratorios deberán certificar nuevos procedimientos experimentales y ensayos analíticos. Las empresas de ingeniería necesitarán madurar nuevos conceptos y criterios de diseño. Las consultoras ambientales deberán sintonizar la normativa vigente con una nueva naturaleza de proyectos. Y las universidades y centros de formación técnica deberán desarrollar profesionales con conocimientos y habilidades que complementen la minería del cobre, entregando fundamentos y herramientas para una minería secundaria y polimetálica.

Finalmente, cabe destacar que este Manual de Uso Público ha sido elaborado por JRI Ingeniería S.A y EcoMetales Limited, en el marco del Programa Tecnológico Estratégico 16PTECME-66527 “Investigación y Desarrollo para la Recuperación de Elementos de Valor desde Relaves”, que será ilustrado como un caso de estudio en el presente Manual.

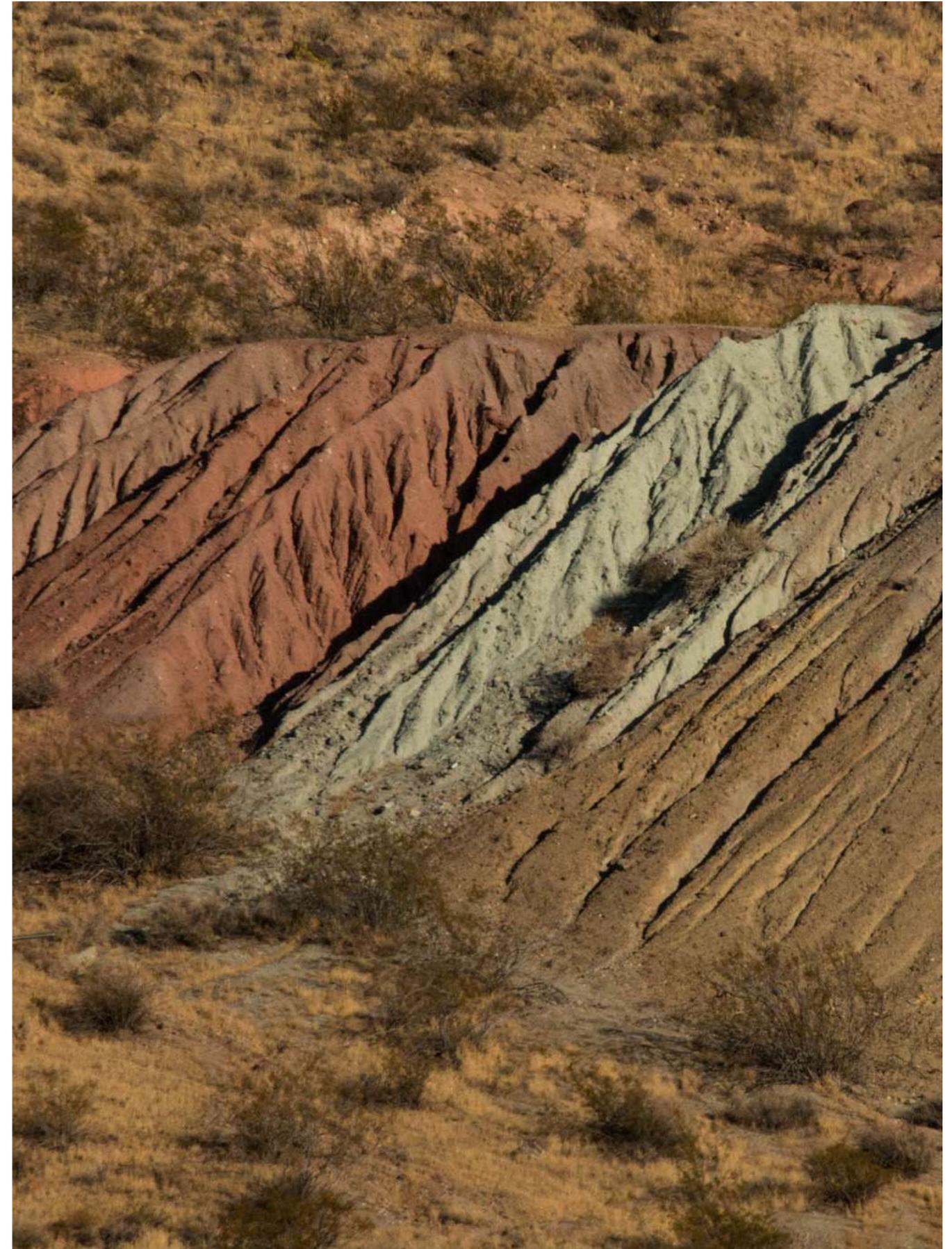
¹ <https://corporacionaltaley.cl/>

² Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 10-08-2020), SERNAGEOMIN.

PARTE

I

**Los relaves como
materia prima**



1

Potencial económico

En las últimas décadas, la industria de tecnologías de última generación ha experimentado avances exponenciales en su desarrollo, lo que ha generado una creciente demanda por elementos químicos y minerales específicos. Esto motivó a la Unión Europea (UE) a definirlos como estratégicos por su creciente importancia económica y por el riesgo de interrumpir la continuidad de suministro. En la Tabla 1 se resumen estos elementos.

Los yacimientos geológicos de estos elementos se concentran en algunos países, siendo China el principal productor de la mayoría de estos. Sudáfrica lo es en los ca-

sos específicos de los platinoides y cromo.

Esta situación ha despertado la preocupación en los países de la UE y Estados Unidos por el suministro permanente de estos elementos, pues son claves para mantener el nivel tecnológico alcanzado y continuar desarrollando nuevas y disruptivas tecnologías.

El servicio geológico británico (*British Geological Survey*) realizó una lista de riesgo de abastecimiento de las 41 materias primas estratégicas, considerando una serie de factores que influyen en su disponibilidad mundial (producción, reservas, tasa de reciclaje, sustitutos). Los primeros diez elementos de esta tabla son las tierras raras, antimo-

nio, bismuto, germanio, vanadio, galio, estroncio, wolframio, molibdeno y cobalto, de los cuales China es el principal productor y poseedor de las reservas naturales, salvo por el cobalto, donde se destaca la República Democrática del Congo (RDC).³

En este contexto, surge la oportunidad para que las compañías mineras en Chile incursionen en el mercado de los elementos estratégicos presentes en sus yacimientos geológicos y residuos mineros masivos.

En general, en la industria del cobre, la producción de concentrados sulfurados está asociada a procesos de reducción de tamaño (chancado y molienda) y concentración por flotación. Esto significa que, históricamente, por cada 1.000 kg de mineral, aproximadamente 30 kg corresponden a concentrados de cobre sulfurado y 970 kg a relaves, que son enviados a depósitos de gran envergadura para su disposición final.

Muchos relaves en Chile contienen minerales y/o elementos con valor comercial, lo que plantea el desafío de extraerlos, desarrollando esquemas tecnológicos que sean económicamente factibles.

El Sernageomin ha publicado dos fuen-

tes de datos públicos de los depósitos de relaves en Chile⁴. El primero, "Catastro de Depósitos de Relaves en Chile", identifica las faenas, ubicación geográfica, tipo de depósito, entre otros datos. El segundo, "Datos de Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile", incluye una caracterización geoquímica de muestras tomadas en la superficie de los depósitos de relaves. Esta información permite identificar preliminarmente la presencia de 56 elementos químicos y minerales, y puede ser utilizada como punto de partida para una búsqueda en Chile de relaves con potencial valor económico.

En el caso de los relaves chilenos, las leyes de los elementos estratégicos mostrados en la Tabla 1 distan en uno a tres órdenes de magnitud de otras fuentes, especialmente, yacimientos geológicos. No obstante, por la importancia económica que han adquirido estos elementos en los últimos diez años y su proyección en el futuro, es que los relaves podrían ser potenciales proveedores de estos elementos, transformándose así en yacimientos artificiales. En la Figura 1 (pag.14) se muestra un gráfico que relaciona el precio de los distintos elementos estratégicos antes indicados, con respecto al valor de venta del cobre.



TABLA 1: Elementos estratégicos definidos por la Comunidad de la Unión Europea

GRUPO DE ELEMENTOS	ELEMENTOS / COMPUESTOS
Platinoides	Ru-Rh-Pd-Os-Ir-Pt
Tierras raras pesadas	Gd-Tb-Dy-Ho-Er-Tm-Yb-Lu-Y
Tierras raras livianas	La-Ce-Pr-Nd-Pm-Sm-Eu-Sc
Otros elementos	Sb - BaSO ₄ - Bauxita - Be - Bi - BO ₃ - Co - Coque - Grafito - CaF ₂ - Ga - Ge - Caucho - Hf - In - Li - Mg - Nb - Fosforita - P - Si - Sr - Ta - Ti - V - W

FUENTE: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en

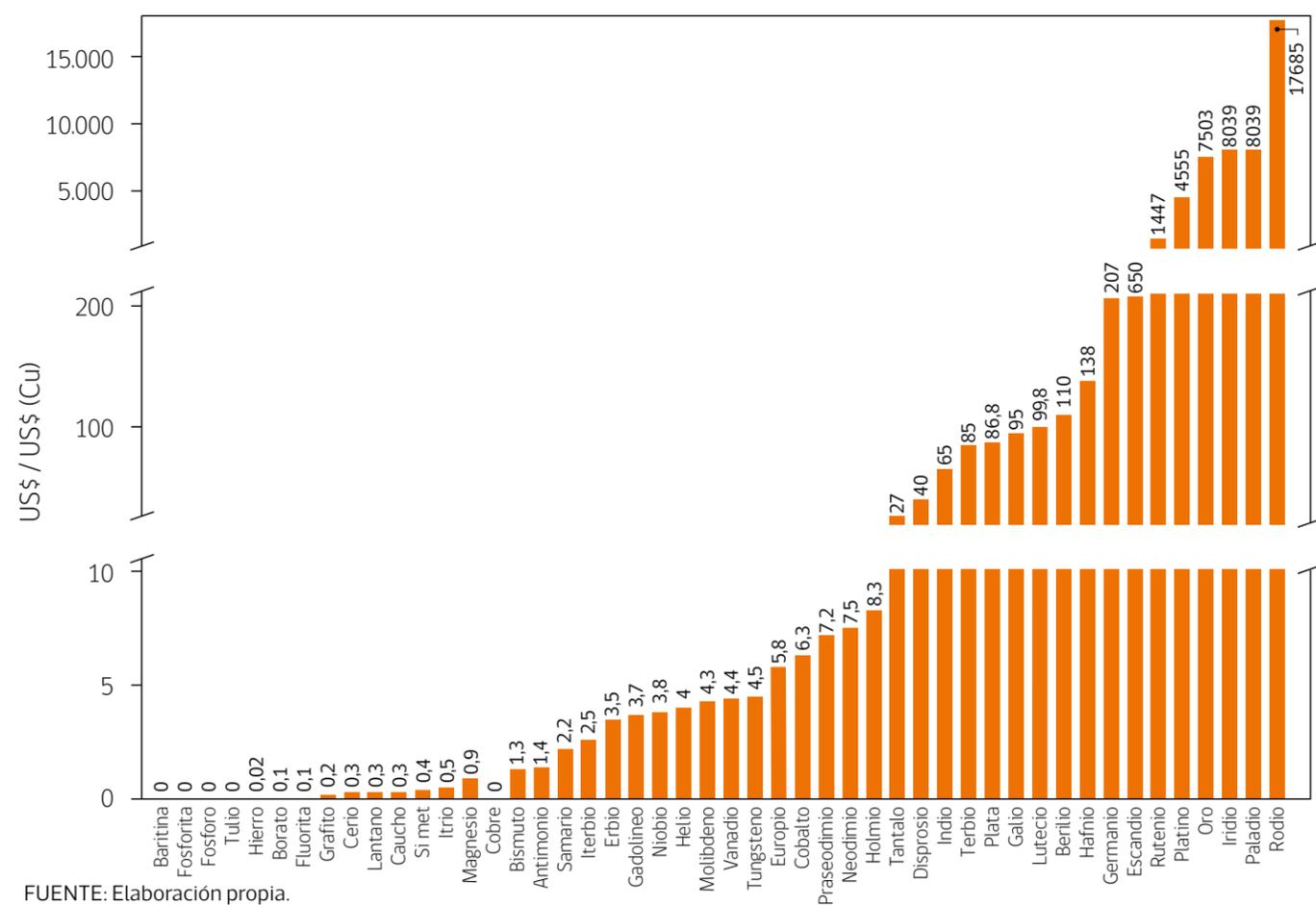
³ Risk List 2015 British Geological Survey.

⁴ <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>

1.0

POTENCIAL ECONÓMICO DE LOS RELAVES

GRÁFICO 1: Relación de precios entre elementos de alta pureza (> 99,98%) estratégicos para la Unión Europea, y el cobre⁵



FUENTE: Elaboración propia.

⁵ Valor promedio 2019 de los elementos estratégicos de la UE y el cobre. Este valor está referenciado a purzas superiores a 99,96%. Se agregan al gráfico los casos del Mo, Ag, Au y Fe, por ser elementos tradicionales en la minería nacional.

La Figura 1 muestra el precio relativo de los distintos elementos de interés contenidos en los relaves respecto del precio de mercado del cobre. La información permite estimar un ingreso potencial de acuerdo con un tonelaje y ley definidos. Es importante destacar que la información de la figura depende de la variación de los precios de los metales en sus respectivos mercados, siendo recomendable mantenerlo actualizado permanentemente.

Uno de los aspectos principales que se debe tener en cuenta para evaluar el potencial económico de un depósito de relaves, es que el elemento principal se encuentra con una ley muy baja –como por ejemplo el cobre– por lo que técnicamente se torna cada vez más difícil su procesamiento metalúrgico, con costos de operación incrementales. Por consiguiente, es importante considerar que el negocio de reprocesar relaves, debe estar fundamentado en la recuperación de varios elementos de valor, donde algunos pagan los costos de inversión y operación, y otros reportan las utilidades.

Considerando lo anterior, se describe una metodología simple para

evaluar un potencial negocio a partir del retratamiento de relaves. La evaluación dependerá –entre otros factores– del tipo y tamaño de los depósitos, así como de los elementos de valor que se desea evaluar.

Con la información de la Tabla 1, Figura 1 y las bases de datos geoquímica de depósitos de relaves publicada por el Sernageomin, se pueden definir algunos criterios de selección para poder elegir uno o más depósitos para un estudio más profundo. En una primera aproximación, se pueden obviar los aspectos técnicos específicos (por ejemplo, el análisis mineralógico), considerando solo la masa del relave y la ley del o los elemento(s) de interés.

La secuencia de pasos que se recomienda considerar son los siguientes:

- Definir un grupo de elementos de interés compuesto por elementos comercialmente tradicionales en la minería nacional (cobre, molibdeno, hierro, oro y/o plata), junto con elementos críticos para mercados extranjeros (tomar como referencia la Tabla 1).
- Acceder y revisar las bases de da-

tos publicadas por el Sernageomin. Estas bases de datos son un excelente punto de partida, pero se debe tener presente que los valores de leyes corresponde a muestras puntuales y superficiales.

- Para la búsqueda y cálculos preliminares se pueden utilizar herramientas de escritorio como Excel u Open Office.
- Realizar las búsquedas con filtros, considerando los elementos de interés seleccionados, por separado y juntos. Por lo general, estos elementos mayores tienden a asociar otros elementos estratégicos en concentraciones a nivel de trazas (disueltos en los minerales que ellos componen o sus impurezas asociadas, tales como las piritas, apatito y/o arcillas), que podrían integrarse al grupo seleccionado inicialmente.
- Dado que la base de datos comprende, en gran medida, datos de relaves provenientes de la flotación de sulfuros de cobre, se recomienda considerar el cobre como primer elemento de búsqueda. Esta se puede iniciar fijando concentraciones superiores a las 1.000 ppm (0,1%).

- El segundo elemento que se sugiere considerar es el hierro, puesto que en amplias zonas mineras del país aparece recurrentemente con importantes concentraciones.
- Otro criterio (opcional) para filtrar la base de datos es la masa del depósito de relaves, ya que el catastro del Sernageomin involucra depósitos de la gran, mediana y pequeña minería. Si se opta por relaves de la mediana y pequeña minería, otro criterio (opcional) es considerar como negocio el reprocesamiento de varios depósitos cercanos, para tener una valoración económica más atractiva.
- Preliminarmente se pueden considerar las siguientes leyes de corte:
 - Contenido de cobre > 1.000 ppm. Podrá ser menor si se consideran otros elementos de valor con concentraciones significativas.
 - Contenido de hierro > 7,0%.
 - Contenido de molibdeno > 100 ppm (0,01%)
 - Suma total de tierras raras (livianas y pesadas) > 300 ppm.

- Cobalto, tantalio, antimonio, wolframio, niobio > 200 ppm.
- Contenido de magnesio > 1.000 ppm.
- Una vez seleccionados los depósitos de relaves que cumplan algunos de los criterios anteriores, se puede ordenar la información de acuerdo a los contenidos de un elemento mayor o secundario presente en ellos.
- Luego, es posible calcular los finos disponibles de cada elemento de interés seleccionado. Este valor representa el máximo valor extraíble (suponiendo 100% de recuperación). Con este valor calculado de finos de los elementos de interés se pueden realizar sensibilizaciones variando la recuperación metalúrgica (por ejemplo, 20%, 40%, 60% y 80%) y las leyes respectivas.
- Las cantidades máxicas de los distintos elementos de valor se pueden valorizar basándose en la información de la Figura 1, tomando como base el precio del cobre vigente a la fecha del análisis, con lo que se tendría una estimación de los potenciales ingresos del negocio.

- Como un ejercicio razonable se sugiere castigar los ingresos, considerando que generalmente los productos comercializables son concentrados y no están refinados como un elemento puro. También se puede considerar un castigo por la presencia de impurezas.
- Para estimar el Capex y Opex se pueden considerar como base los costos unitarios de la minería del cobre, ya que el rango dentro del cual estos se mueven es conocido por las empresas mineras, consultoras y academia, ponderando por la complejidad del proceso extractivo.
- Estimados los ingresos, costos y asumiendo los indicadores más frecuentes para calcular el flujo de caja (tasa de descuento, años del proyecto, etc.), se podrá obtener el VAN y TIR del caso de negocios analizado.

En el proyecto que dio origen a este Manual, se investigó la recuperación de tres elementos de interés comercial: cobre, hierro y tierras raras.

Aplicando la metodología descrita, se obtuvo la información contenida en la Tabla 2.

TABLA 2: Selección de depósitos de relave en base a catastros del Sernageomin, con concentraciones de cobre > 1000 ppm, hierro > 7% y tierras raras totales > 200 ppm.

#	IDQ ⁶	RECURSO	REGIÓN	COMUNA	MASA (t)	Cu (ppm)	FE (%)	REE TOTAL (ppm)
1	39	Cobre	ANTOFAGASTA	Taltal	55.725	3.407	16	1.692
2	29	Cobre	ANTOFAGASTA	Taltal	5.159.772	1.800	16	269
	30		9.500.000		1.918	33	237	
	32		4.131		41	201		
3	565	Cobre - Oro - Fierro	ATACAMA	Copiapó	280.950	1.148	44	576
	564		1.064		39	326		
4	596	Cobre	ATACAMA	Copiapó	46.800	2.030	30	280
	597		2.002		26	280		
5	571	Oro	ATACAMA	Copiapó	6.075	2.257	35	425
	570		48.975		1.738	31	318	
6	1997	Oro	ATACAMA	Copiapó	4.140	5.808	23	4.323
7	557	Cobre - Oro	ATACAMA	Copiapó	4.200	1.551	16	354
8	550	Cobre	ATACAMA	Copiapó	420.743	2.996	16	224
9	1980	Cobre	ATACAMA	Tierra Amarilla	15.000	6.141	18	228
10	1503	Cobre	ATACAMA	Tierra Amarilla	15.000	2.572	15	286
11	60	Cobre	ATACAMA	Tierra Amarilla	5.816.300	2.172	26	214
12	1979	Cobre	ATACAMA	Tierra Amarilla	97.500	7.020	24	268
	1978		738.765		2.708	18	203	
13	630	Cobre	ATACAMA	Vallenar	672.000	1.313	23	250
	633		3.492		18	209		
14	905	Oro	COQUIMBO	Punitaqui	3.600	3.191	15	251
	906		1.966		19	200		
15	895	Oro	COQUIMBO	Punitaqui	324.000	2.058	20	231
	894		1.651			20	216	
	896		2.633			17	215	
	897		2.110			18	212	
16	887	Oro	COQUIMBO	Punitaqui	7.759	1.692	18	273
	891		11.600		2.189	16	267	
	888		7.759		3.257	18	203	
17	281	Cobre - Oro - Plata	COQUIMBO	Coquimbo	80.622	2.210	19	436
18	133	Cobre	COQUIMBO	Coquimbo	20.947	1.168	68	812
19	146	Cobre	COQUIMBO	La Serena	49.745	2.278	30	201
20	417	Cobre - Oro	COQUIMBO	Illapel	49.260	11.220	26	268
21	422	Cobre	COQUIMBO	Illapel	119.850	2.742	16	206
22	391	Cobre	COQUIMBO	Illapel	63.321	1.662	20	211
23	385	Cobre - Oro	COQUIMBO	Illapel	1.500	1.151	15	265
24	331	Oro	COQUIMBO	Andacollo	24.000	2.050	15	206
25	819	Oro	COQUIMBO	Los Vilos	375.000	1.293	18	241
26	290	Cobre - Oro	COQUIMBO	La Higuera	4.950	9.682	20	343
	291					3.599	14	328
	292					5.810	17	304
27	289	Cobre - Oro	COQUIMBO	La Higuera	127.500	2.884	41	255
	288	Cobre - Oro	COQUIMBO	La Higuera	30.000	1.853	43	232
28	944	Cobre	COQUIMBO	Monte Patria	117.000	1.513	15	208
29	953	Cobre - Oro	COQUIMBO	Ovalle	62.268	2.092	45	266
30	376	Cobre	COQUIMBO	Ovalle	29.700	2.554	35	436
31	872	Oro	COQUIMBO	Canela	1.500	1.803	24	211

FUENTE: Elaboración propia sobre la base de datos Sernageomin. Datos de Geoquímica de Depósitos de Relaves de Chile (actualización: 13/01/2020) y Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (actualización 10-08-2020), Sernageomin

6 IDQ (Identificador de Datos Geoquímicos), que corresponde al número de identificación en la bases de datos del Sernageomin.

RESUMEN

Potencial económico



Sernageomin ha publicado dos bases de datos de depósitos de relaves en Chile, que entregan un catastro y una caracterización geoquímica de estos, donde se identifican 56 elementos químicos y minerales.



Algunos de los elementos químicos presentes en los relaves chilenos pertenecen al grupo de los denominados estratégicos por la UE, debido a su creciente demanda mundial, importancia económica y riesgos para su suministro permanente.



Un aspecto que se debe tener en cuenta al evaluar el potencial económico de un depósito de relaves, es que el/los elemento/s de interés se encuentran en bajas concentraciones, por lo que su procesamiento metalúrgico, técnicamente, es cada vez más difícil, con costos de operación incrementales. Por consiguiente, es importante considerar que el negocio de reprocesar relaves debe fundarse en la recuperación de varios elementos de valor, donde algunos paguen los costos de inversión y operación, y otros reporten las utilidades.



Para la evaluación preliminar del potencial valor de un depósito de relaves se puede considerar la masa y ley(es) de los elementos de valor presentes, tomando como punto de partida las bases de datos del Sernageomin.



Los principales pasos recomendados para evaluar el potencial valor son:

- 1 Definir grupo de elementos de interés (tradicionales y críticos).
- 2 Realizar búsquedas con filtros, considerando elementos de interés seleccionados, tanto juntos como por separado. Se recomienda considerar al cobre como primer elemento de búsqueda y al hierro como el segundo.
- 3 Ordenar la información según los contenidos de un elemento mayor o secundario.
- 4 Calcular los finos disponibles para cada elemento de interés seleccionado, para realizar sensibilizaciones variando la recuperación metalúrgica.
- 5 Calcular los ingresos potenciales a partir de las cantidades máxicas de los distintos elementos de valor (considerar los castigos en valor por las impurezas o la falta de refinación).
- 6 Estimar el Capex y Opex considerando los costos unitarios de la minería del cobre.
- 7 Calcular el VAN y TIR del caso de negocio analizado, posterior a los estimados de los ingresos, costos e indicadores de flujo de caja.

Relaves
con valor

2

Caracterización del relave

La caracterización física, química y mineralógica del relave es fundamental para analizar su reprocesamiento.

Las principales propiedades que definen al relave son:

- Perfil granulométrico y los indicadores asociados (tamaños característicos, como el D80, % sobre y % bajo malla Ty #65, % bajo malla Ty #200, entre otros).
- Densidad de las partículas del relave

y densidad aparente del relave.

- Contenido de agua (humedad residual, en el caso de un relave seco, y concentración de sólidos en peso, en caso de relaves en forma de pulpa).
- Concentración de los elementos químicos.
- Mineralogía.

Además de las propiedades principales, es posible que se requiera caracterizar otros parámetros del relave, lo cual dependerá si se está estudiando su rema-

nejo, conducción, reprocesamiento, disposición final u otros. Algunos ejemplos de otras propiedades medibles son:

- Reología (viscosidad y tensión de fluencia a diferentes concentraciones de sólidos en peso).
- Velocidad de sedimentación a diferentes concentraciones de sólidos en peso.
- Dureza.
- Susceptibilidad magnética.
- Capacidad de generación de aguas ácidas.

2.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS MINERALES Y ELEMENTOS DE INTERÉS

La composición mineralógica de los relaves se puede dividir en especies minerales de alta concentración (elementos mayores) tales como silicatos, carbonatos y óxidos de hierro, entre otros, apreciables a simple vista (concentraciones en % peso), y en elementos traza, es decir, en concentraciones de partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb), alojados en las redes cristalinas de los minerales que forman parte de un relave.

...(continuación)

Para determinar la ocurrencia de minerales, y sobre todo de elementos traza (concentración o ausencia), es necesario conocer la afinidad química y afinidad genética que tienen los elementos traza con los minerales que los contienen.

Explorar y caracterizar mineralógicamente un relave –es decir, dimensionar cuantitativa y cualitativamente qué elementos de valor contiene, dónde se encuentran, y de qué forma están asociados a qué elementos mayores– implica definir nuevos enfoques, técnicas y metodologías.

En el Manual de Uso Público “Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves”, se resumen las principales técnicas de búsqueda y exploración de potenciales elementos de valor presentes en los relaves, destacando sus ventajas y desventajas. El uso de estas técnicas requiere de profesionales expertos (geólogos, ingenieros de mina, de procesos metalúrgicos, entre otros) quienes pueden diseñar un programa de explotación bancable, tras el análisis de los datos obtenidos en la fase de ingeniería de perfil que sustenta dicho manual, reduciendo así la incertidumbre que significa la explotación de un recurso minero secundario.

A continuación se indican aspectos esenciales que se deben considerar en la identificación de minerales y elementos de valor en un relave, como asimismo las alternativas tecnológicas disponibles que se pueden aplicar directamente o bien adaptadas para este tipo de material. Para el caso de relaves frescos, se puede considerar la lectura a partir del capítulo Análisis de Datos Químicos y Mineralógicos”, [pág.21](#).

PERFORACIÓN

Para perforar un depósito de relave es necesario considerar varios factores que facilitarán la obtención de los resultados buscados de acuerdo con el objetivo planteado.

Las dimensiones básicas del depósito de relave, superficie y altura, son muy importantes al momento de diseñar una malla de perforación. Para un depósito de este tipo, la malla debe ser equidistante, dado que el material depositado que compone el relave es variado en composición y distribución espacial, y no existen relaciones genéticas que permitan proyectar una distribución conocida, como sucede en un yacimiento geológico.

De acuerdo con los recursos, dimensiones y disposición del relave, se puede optar por una malla cuyos puntos de perforación se ubiquen entre 5 y 20 m (5x5/20x20). La profundidad de los pozos varía con la altura del depósito de relave. Las técnicas de sondaje favorables para los relaves pueden alcanzar hasta 50 m. Si la altura es mayor a 50 m –como ocurre con algunos relaves–, se deben buscar técnicas de perforación como sondajes de diamantina o aire reverso. Estas técnicas no están diseñadas para perforar relaves, pero se pueden utilizar si el relave es lo suficientemente compacto y la humedad es baja.

Otro factor importante que se debe considerar es la disponibilidad de vías de acceso para transportar las máquinas de sondaje y camiones con agua (en caso que se necesite para la perforación), y puedan llegar a los puntos planificados. Las vías de acceso, por lo general, corresponden a caminos con fuertes pendientes. Estos deben tener un ancho mayor que el considerado en un camino para circulación de vehículos menores.

Si el depósito de relave se encuentra

en la pendiente de un cerro o entre dos cerros, hay que tener en cuenta la variación de la altura del relave, para diseñar la profundidad de los sondajes.

En la misma medida, si existen antecedentes sobre la forma en que fue depositado el relave –lo que no es usual– se debe usar esta información para orientar los primeros sondajes hacia aquellos sectores donde se puedan encontrar las zonas con mejores leyes.

En cuanto a los valores asociados a la perforación de sondajes, el sondaje de diamantina y el sondaje CPT-FRX son los que presentan las tarifas más altas por metro de sondaje (entre US\$ 300 y 500 por metro perforado).

Para perforar un depósito de relaves y obtener información y muestras representativas, las principales técnicas de perforación que cumplen con estos objetivos son:

- Sondaje de percusión
- Sondaje de aire reverso
- Sondaje de diamantina
- Sondaje manual
- Sondaje sónico
- Sondaje CPT-FRX
- Sondaje con barreno



DEFINICIÓN

MALLA DE PERFORACIÓN: plano que identifica la disposición de los puntos de perforación en una zona determinada. Como información básica debe contener una identificación de cada punto, su ubicación mediante coordenadas y la profundidad de la perforación.

MUESTREO

Los métodos usados para la toma representativa de muestras, varían de acuerdo con las características del depósito (tipo, forma, extensión) y el nivel de profundidad del estudio de caracterización. Los más comunes son los siguientes:

- Muestreo por canaletas
- Muestreo puntual
- Muestreo de detritos
- Muestreo por canchas, relaves, placeres o zanjas
- Muestreo de pozos
- Muestreo de carros mineros
- Muestreo en punto de extracción

Para mayor información sobre estas técnicas, puede consultar el Manual de Uso Público “Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves”, así como literatura especializada en este tema.

La cantidad de muestras es función de la cantidad de pozos o sondajes y de la profundidad de los mismos. Se sugiere considerar una muestra por cada metro perforado, considerando como mínimo cuatro pozos o sondajes, y totalizar al menos 50 muestras, para asegurar un mínimo de confiabilidad del análisis.

La toma de muestras de cualquier método de perforación debe ser muy cuidadosa, procurando eliminar las instancias de contaminación. Entre los cuidados que se deben tomar en cuenta se destacan:

- Mantener un etiquetado correcto y permanente de las muestras.
- Usar bolsas que resistan los traslados, viajes y cambios de temperatura.
- Pesar las bolsas, indicando la profundidad de la muestra.
- Velar por que el personal que realiza el trabajo de muestreo esté previamente capacitado.

ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS

Al momento de analizar los datos químicos, mineralógicos y la relación entre ambos, es importante contar –en lo posible– con otras informaciones adicionales que permitan una comprensión más profunda de la identidad y especificidad del relave portador de los elementos de valor, objeto de estudio. Estas informaciones adicionales tienen relación con:

- El conocimiento del yacimiento

geológico de origen. En la mayoría de los casos, los depósitos de relaves no cuentan con un registro del tipo de roca, los minerales (de ganga) que lo componen, ni la presencia de minerales de arcilla y silicatos.

- El tipo de mineral explotado y que luego fue depositado como relave, y el método de explotación y procesamiento metalúrgico al cual fue sometido.

Los efectos de la intemperización, flujos de agua, cambios climáticos y de las temperaturas, etc., que están afectando la composición mineralógica y química de los minerales que componen el depósito de relave.

Para dilucidar estas interrogantes existen técnicas de análisis mineralógicos y químicos que permiten conocer la composición química y mineralógica del depósito de relave, en corto tiempo.

ANÁLISIS DE DATOS QUÍMICOS Y MINERALÓGICOS

(continuación)

TÉCNICAS DE ANÁLISIS QUÍMICO

A continuación, se presentan las distintas técnicas existentes para identificar y cuantificar los elementos químicos y óxidos mayores que componen un depósito de relave. Se debe considerar que el método elegido se encuentre validado y certificado para cuantificar los elementos de interés.

- Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)
- Fluorescencia de Rayos X (FRX)
- Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)
- Activación Neutrónica (AAN)

TÉCNICAS DE ANÁLISIS MINERALÓGICO

Las técnicas de análisis mineralógico son variadas, poseen distintos alcances, algunas son cualitativas, otras cuantitativas o semicuantitativas. El uso de cada una de ellas depende del objetivo del análisis. Estas técnicas se denominan de la siguiente forma:

- Microscopio de luz polarizada
- Difractometría de rayos X
- Microscopía Electrónica de Barrido, Evaluación Cuantitativa de Materiales (Qemscan, Minscan, Tescan)
- Espectroscopia Infrarroja Cercana (NIR)

IDENTIFICACIÓN DE ELEMENTOS TRAZAS DE VALOR

La potencial ocurrencia de elementos trazas de valor en un relave se puede estudiar a partir de las caracterizaciones químicas y mineralógicas, mediante la correlación (análisis multivariables, R2) de los óxidos mayores con la ocurrencia de los elementos trazas.

Se requiere de conocimiento experto –especialmente de la génesis de los minerales y elementos traza– para realizar las correlaciones y no obtener conclusiones equivocadas, que pueden darse por el mecanismo matemático de las correlaciones.

En el Manual de Uso Público “Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves”, se describe la correlación del óxido de aluminio (Al_2O_3) con elementos trazas como Ce y La, del grupo de las LREE.

Durante la ejecución del Programa Tecnológico Estratégico 16PTECME-66527, que da origen al presente manual, se identificaron otras correlaciones entre óxidos mayores y elementos trazas de valor, para las cuales se está evaluando la mejor forma de publicar o transferir.



DEFINICIÓN

ELEMENTOS TRAZAS: Presentes en cantidades muy pequeñas (partes por millón, ppm; o partes por billón ppb), generalmente alojados en las redes cristalinas de los minerales formadores de roca.

RESUMEN

Caracterización del relave



La composición mineralógica

de los relaves se puede dividir en:

1

Especies minerales de alta concentración (elementos mayores)



2

Elementos traza

Explorar y caracterizar mineralógicamente un relave, es decir, dimensionar cuantitativa y cualitativamente qué elementos de valor contiene, dónde se encuentran y en qué forma están asociados a qué elementos mayores, implica definir nuevos enfoques, técnicas y metodologías.

Alternativas tecnológicas para la identificación de minerales y elementos de valor en un relave

A

PERFORACIÓN

Sondajes de percusión, de aire reverso, de diamantina, manual, sónico, CPT-FRX y con barreno.

B

MUESTREO REPRESENTATIVO:

Por canaletas, puntual, de detritos, por canchas o zanjas, de pozos, de carros mineros, en punto de extracción.

C

ANÁLISIS MINERALÓGICO:

Microscopio de luz polarizada, difractometría de rayos X, microscopía electrónica de barrido, espectroscopia infrarroja cercana.

D

ANÁLISIS QUÍMICOS:

EAA, FRX, ICP-MS, AAN.

Para mayor información sobre estas técnicas, consulte el Manual de Uso Público “Técnicas de perforación, muestreo y caracterización para la recuperación de elementos de valor desde relaves”, disponible en www.relavesconvalor.cl.

3

Explotación secundaria

En este capítulo se definen los aspectos más relevantes para determinar el ritmo de remoción, el tipo de tecnología de remoción a emplear, las dificultades y riesgos de las operaciones planteadas y los costos asociados.

La remoción de los depósitos de relaves para su posterior reprocesamiento o beneficio, debe ser planificada adecuadamente, en función de su volumen y forma, así como también, con su estado de humedad y nivel de estabilidad geotécnica.

A Definición del ritmo de remoción de un depósito de relaves

La remoción de un depósito de relave se debe realizar de acuerdo con la capacidad de la planta de tratamiento, y considerando si esta va a tratar solo ese depósito o varios en forma simultánea o sucesiva.

En caso de disponer de una planta para retratar varios depósitos –en forma simultánea o sucesiva–, la experiencia de la minería secundaria de Sudáfrica indica que se debe considerar la explotación de cada depósito en períodos de 3 a 5 años.

En caso de depósitos de relaves aislados, pero de gran tamaño, la operación de remoción y reprocesamiento puede estar limitada por otros parámetros

como, por ejemplo, la disponibilidad de agua para el proceso o el ritmo aceptable de disposición final del relave residual. En todo caso, para relaves masivos es razonable planificar su remoción en plazos entre 10 y 20 años.

Como resultado de lo anterior, el ritmo adecuado de explotación para depósitos menores (entre 0,3 y 5,0 Mt de relaves almacenados) normalmente oscilará entre 100 y 600 t/d; para depósitos entre 5 y 25 Mt, el ritmo adecuado se estima entre 1.000 y 8.000 t/d; y para depósitos mayores de 30 Mt, el ritmo adecuado considera un rango entre 10.000 y 30.000 t/d.

B Tipo de depósito a remover

Los depósitos abandonados o inactivos de relaves pueden ser divididos en tres tipos:

- **Depósitos secos**, con humedades medias remanentes entre 1 y 5%, sin sectores intermedios saturados y con mínimos bolsones de mayor humedad.
- **Depósitos húmedos**, con humedades remanentes medias entre 6 y 12%, con algunos núcleos centrales saturados.
- **Depósitos saturados**, en forma total o mayoritaria, con humedades netas entre 20 y 30% y zonas con nivel freático.

Según el tipo de depósito ya indicado, se podrá realizar el proceso de remoción más conveniente.

- En el caso de los depósitos de relaves secos, normalmente se privilegia el uso de cargadores y camión, y eventualmente se puede aplicar el pitoneo hidráulico. El camión con relave seco se descarga en una tolva que alimenta un estanque de fluidización para el reprocesamiento posterior.

- En el caso de los depósitos de relaves húmedos, lo usual es el pitoneo hidráulico. Eventualmente, en forma parcial y bien controlada, puede usarse el cargador y camión. En el caso del pitoneo, el relave removido en forma de pulpa usualmente tiene concentraciones entre 30 y 40 % de sólidos en peso.

- En el caso de relaves saturados y de depósitos con operación reciente, dada la alta sismicidad de Chile, la única opción segura es la aplicación de dragado con equipos flotantes que recuperan el material decantado en concentraciones entre 25 y 35% de sólidos en peso.

C Aspectos industriales que se deben considerar

Las experiencias internacionales y chilenas más destacables de aplicación de técnicas variadas de remoción de relaves, son las siguientes:

- Depósitos de relaves en Sudáfrica, provincia de Gauteng, son removidos con cargador y camión a razón de 3.000 t/d para reprocesar varios depósitos de

relaves de oro cercanos entre sí, de varios millones de toneladas cada uno.

- Depósitos de relaves B2 de Mina San Rafael en Perú, incluyen el drenaje forzado de zonas parcialmente saturadas y la remoción de relaves de zinc, por cargador y camión, a razón de 1.500 t/d. La mayor debilidad detectada es el hundimiento de las ruedas de los camiones cargados en zonas de alta humedad y fluencia del suelo.

- Empresa Ergo Minas, en Sudáfrica, remueve grandes depósitos de relaves auríferos a razón de 80.000 t/d, en forma combinada (normalmente 3 a 4 depósitos en forma simultánea) mediante pitoneo y transporte por tuberías del relave removido a una planta procesadora de carácter regional. El mayor problema es el arrastre de basura industrial, que se soluciona con harneros de pequeña abertura de malla.

- Minera Valle Central (MVC) en Chile, remueve mediante pitoneo hidráulico el Tranque Cauquenes (relaves antiguos de El Teniente), a razón de 55.000 a 60.000 t/d. Los mayores desafíos de esta técnica son el alto consumo de agua y energía eléctrica, más el riesgo de colapso en caso de sismos. La experiencia de MVC les ha permitido llegar a una recirculación del agua cercana al 85%, consumos eficientes de energía y

un adecuado control de las variables de seguridad.

- Remoción casi completa del Tranque Pérez Caldera 1, ex Disputada de Las Condes en Chile, mediante pitoneo a razón de 10.000 a 15.000 t/d. La debilidad mayor es el alto consumo de agua y energía eléctrica, más el riesgo de colapso en caso de sismos.

- Remoción completa del Tranque Atlas de Filipinas, de 42 Mton, mediante dos dragas en un plazo total de 10 años (10.000 a 15.000 t/d). La debilidad mayor fue adquirir un equipo adecuado para el proceso.

- Remoción parcial del Tranque Pérez Caldera 2 (ex Disputada Las Condes) mediante dos dragas a razón de 10.000 a 15.000 t/d. La debilidad mayor fue la discontinuidad del proceso y la baja concentración de la pulpa removida.

- Proyecto Playa Verde, que considera la remoción de la Playa Grande de Chañaral, formada por antiguos relaves de cobre de Potrerillos y Salvador en Chile, mediante dragas para reprocesar hasta 20.000 t/d de relave y recrear una playa de arenas de uso recreacional. Por tanto, es factible declarar que existen variadas iniciativas a nivel mundial y sudamericano, para remover relaves antiguos o frescos.



FUENTE: iStock.com/guvendemir

3.1 REMOCIÓN POR CARGADOR Y CAMIÓN

Esta solución se debe considerar para casos de tranques abandonados como si fuera una cantera, procediendo hacerlo con un sistema de cargador y camión (sin usar explosivos). Para que esta solución sea factible, el suelo del tranque debe ser capaz de soportar el tránsito de camiones cargados, así como controlar la generación de polvo median-

te regado frecuente.

Los equipos de carguío normalmente son de 3 a 10 yd³ y los camiones pueden ser de 10 a 35 t de carga neta cada uno, con volteo hacia atrás.

Para evitar accidentes, las rutas de transportes deben ser amplias y bien señalizadas, con iluminación adecuada si van a operar de noche.



Tranque Cauquenes. FUENTE: Gentileza Minera Valle Central.

3.2 REMOCIÓN POR PITONEO HIDRÁULICO

Este sistema, conocido también como pitoneo, consiste en la operación de chorros de agua a alta presión (los pitones operan a presión entre 200 y 350 psi) con caudales del orden de 20 l/s a 50 l/s por pitón y alcance efectivo de 20 m aproximadamente. Para depósitos no saturados, el monitoreo se realiza por capas casi horizontales de espesores variables entre 5 y 30 m depen-

diendo de la topografía, calidad del tranque y requerimientos de mezclado.

La operación de pitoneo es prácticamente artesanal, en la medida que los operadores logren la destreza necesaria para aplicar los chorros sobre las superficies de relaves a remover (en talud) provocando el disgregado y fluidización del relave que escurre gravitacionalmente hacia un pozo

de bombeo. Dado que los depósitos de relaves normalmente tienen piedras y basura industrial, es conveniente poner harreros para evitar arrastrar partículas gruesas.

Los pitoneos pueden ser remotizados para la operación más confortable de los operadores y lograr una automatización no optimizante para que ellos puedan tener descansos adecuados.



FUENTE: iStock.com/dan_prat

3.3 REMOCIÓN POR DRAGADO

La tecnología más adecuada y confiable para la remoción de depósitos saturados es el dragado mediante métodos hidráulicos. Existe una gran variedad de equipos hidráulicos de dragado. Básicamente estos equipos aplican una combinación de efectos mecánicos e hidráulicos para la remoción y fluidización de los materiales sólidos disgregables.

El efecto mecánico consiste en escarar mediante elementos mecánicos (capachos, ruedas dentadas, cabezales cortadores) que permiten raer la superficie del material sólido a dragar.

El efecto hidráulico incluye la saturación del suelo a dragar, los esfuerzos centrifugos en el proceso de escariado y el fuerte disgregado al pasar por las bombas centrífugas asociadas al dragado.

Existe en el mercado una gran variedad de dragas adecuadas para la remoción de los depósitos de relaves saturados. Estas consisten principalmente en dragas estacionarias (sin propulsión propia) las cuales se posicionan en la laguna mediante patas de anclaje y se desplazan mediante huinches anclados a tierra firme. Las diferencias fundamentales

entre los distintos modelos se producen en el elemento escareador. Es así como existen dragas con cabezal cortador, con tornillo de hélice horizontal, con capachos en línea, rueda de capachos, etc.

El dragado es un proceso continuo y confiable que permite rangos de operación muy amplios y difíciles de superar (desde 100 hasta 2.000 m³/h por equipo, de carácter semicontinuo y con disponibilidad entre 60 y 80% del tiempo total).

El sistema de dragado típico para un tranque de relaves considera las si-

3.4 COMBINACIÓN DE PROCESOS DE REMOCIÓN Y COSTOS ASOCIADOS

En varios depósitos se ha visto la conveniencia de mezclar la remoción con pitones y el dragado. Ello evita tener que construir pozos de bombeo ya que la(s) draga(s) operan en los puntos bajos refluidizando el material ya pitoneado.

Como una referencia general, se puede definir los siguientes rangos de costo total de remoción de relaves, incluyendo el transporte hasta una planta de reprocesamiento ubicada a menos de 10 km del depósito.

CARGADOR-CAMIÓN



2,0 a 3,0
US\$/t

Cabe destacar que la opción de cargador-camión normalmente no considera valores de Capex dado que los equipos son arrendados o de contratistas.

PITONEO



0,3 a 0,6
US\$/t

En el caso del pitoneo los valores de Capex son relativamente bajos y se pueden amortizar a menos del 10% del costo operacional directo.

DRAGADO



0,6 a 1,2
US\$/t

En el caso del dragado los equipos pueden ser más caros, habitualmente entre 1 a 3 MUS\$, pero pueden ser amortizados entre un 15 a 20% del costo operacional directo.

güientes obras y equipos:

- Lago de operación (uno a seis meses de agua almacenado)
- Draga(s) principal(es) (normalmente se usan dos)
- Suministro de agua (reposición de agua al lago)
- Sistema de impulsión de pulpas (tubería flotante y fija, eventualmente con booster)
- Sistema de pitones de apoyo (desde tierra firme o sólo de dragas)
- Clasificación de seguridad (eliminación de ultra gruesos).



Depósito de Relaves Espesados Centinela–Gentileza de Antofagasta Minerals.

RESUMEN

Explotación secundaria

La remoción de los depósitos de relaves, para su posterior reprocesamiento o beneficio, debe planificarse en función de su volumen y forma, su estado de humedad y nivel de estabilidad geotécnica.

Para definir el ritmo de remoción de los relaves se debe considerar la capacidad de la planta de tratamiento, la disponibilidad de agua para el proceso y el ritmo aceptable de disposición final del nuevo relave.

Según el tipo de relave, es posible determinar el proceso de remoción más conveniente.

1



Para los depósitos secos, se privilegia el uso de cargadores y camiones

2



Para los depósitos húmedos, lo normal es el pitoneo hidráulico

3



Para los depósitos saturados y con operación reciente, la opción más segura es la aplicación de dragado con equipos flotantes

Existen a nivel mundial varias iniciativas de remoción de relaves antiguos y frescos que pueden servir como casos de estudio para futuros proyectos.

PARTE

III

Reprocesamiento
de relaves



4

Operaciones

Los elementos químicos de interés en los relaves se encuentran en bajas concentraciones (trazas). Por ende, para configurar un proceso extractivo se requiere conocer las diferentes operaciones unitarias y alternativas tecnológicas disponibles que podrían emplearse.

unitarias a considerar

4.1 CONCENTRACIÓN FÍSICA

4.1.1 DESLAMADO

El objetivo del deslamado es separar la fracción gruesa (también denominado “arenas”) y la fracción fina (también denominado “lomas”) del relave.

Según cómo haya sido el proceso que generó los relaves, estos pueden tener una amplia banda granulométrica, generalmente desde 1-2 mm hasta 1-10 μm .

Por lo general se entiende por fracción gruesa al conjunto de partículas con tamaño por sobre las mallas Ty. #200 (75 μm). De hecho, en el DS248 se indica que para la construcción de un muro de arenas, la fracción gruesa debe tener como mínimo el 80% de sus partículas sobre malla Ty. #200.

Esta etapa es conveniente cuando uno o más elementos de interés predominan en una de las dos fracciones, generalmente, porque están asociados a ciertos minerales cuyos tamaños de partícula predominan en un rango determinado.

Los beneficios de esta etapa son:

- Disminuir la masa de relaves que se requiere reprocessar para extraer los elementos de interés, con la consecuente disminución en el tamaño de equipos y consumos operacionales.
- Separar las rutas de procesamiento metalúrgico y aplicar diferentes procesos y equipamiento para la fracción gruesa y la fracción fina, enfocándose en la recuperación específica que requieran los elementos de interés que contenga cada corriente.
- Si los elementos de interés están en la fracción gruesa, eliminar la fracción fina trae consigo beneficios en los rendimientos de posibles procesos posteriores, como flotación, separación sólido-líquido y lixiviación.

El deslamado es una separación por tamaño y, como tal, existen dos métodos comúnmente empleados en minería: harneado y clasificación. El harneado separa las partículas utilizando un patrón geométrico mediante

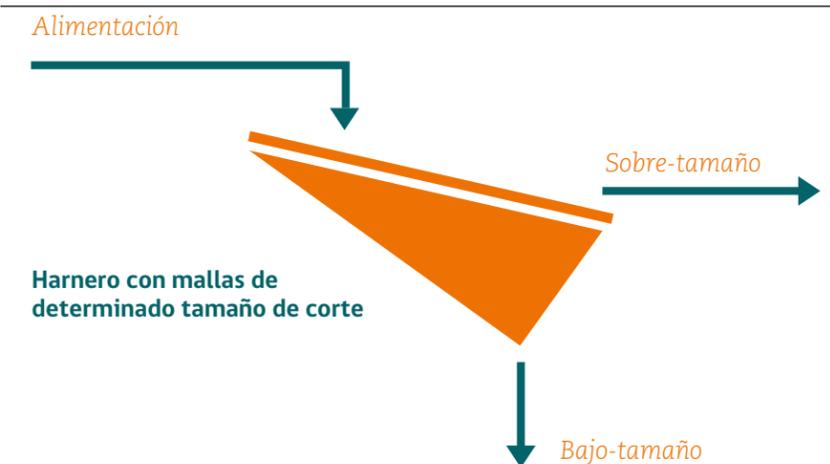
el empleo de tamices. La clasificación separa por tamaños usando la velocidad de las partículas y la diferencia de pesos. Ambos métodos pueden operar en seco o húmedo.

En el harneado, los equipos que emplean se denominan harneros, los cuales pueden ser inclinados u horizontales. Por lo general, los modelos que existen en el mercado cuentan con una o dos bandejas, donde se ubican los tamices, cuyo tamaño de aberturas definirá el tamaño de corte.

En la clasificación, comúnmente se usa la tecnología de cicloneo. Los ciclones son equipos que emplean la fuerza centrífuga para clasificar las partículas por su peso. En el interior del ciclón se genera un vórtice, donde las partículas de mayor peso se concentran en la periferia y descargan por la parte inferior del ciclón (*under-flow*). Las partículas más livianas se concentran en el centro del vórtice y ascienden para salir por la parte superior del ciclón (*over-flow*).

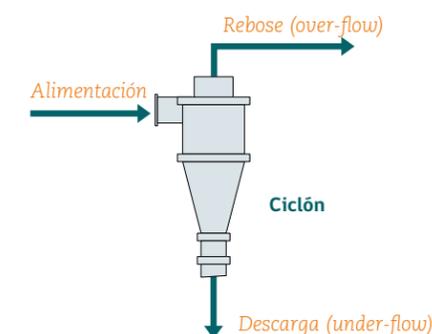
En el caso de los relaves, por su rango de tamaños, la tecnología más apropiada y probada industrialmente para deslamar son los hidrociclones (clasificación en húmedo). Estos pueden separar por un tamaño de corte (d50) entre 10 – 100 μm , aproximadamente.

FIGURA 1: Operación de harneado



FUENTE: Elaboración propia

FIGURA 2: Operación de cicloneo



FUENTE: elaboración propia

Existe una amplia gama de modelos de hidrociclones, tamaños y capacidades. Los tamaños fluctúan entre 2 a 48 in de diámetro interno, con capacidades entre 2 a 2000 m^3/h .

Los proveedores más habituales de estos equipos son:

**METSO-FLSMIDTH-WEIR
MINERALS-ERAL**

4.1.2 MOLIENDA DE GRUESOS

Si bien los relaves provienen de procesos de conminución (chancado y/o molienda), aun así se podría requerir una etapa de molienda, para liberar los minerales contenedores de elementos traza de valor, que estén ocluidos dentro de los sólidos del relave.

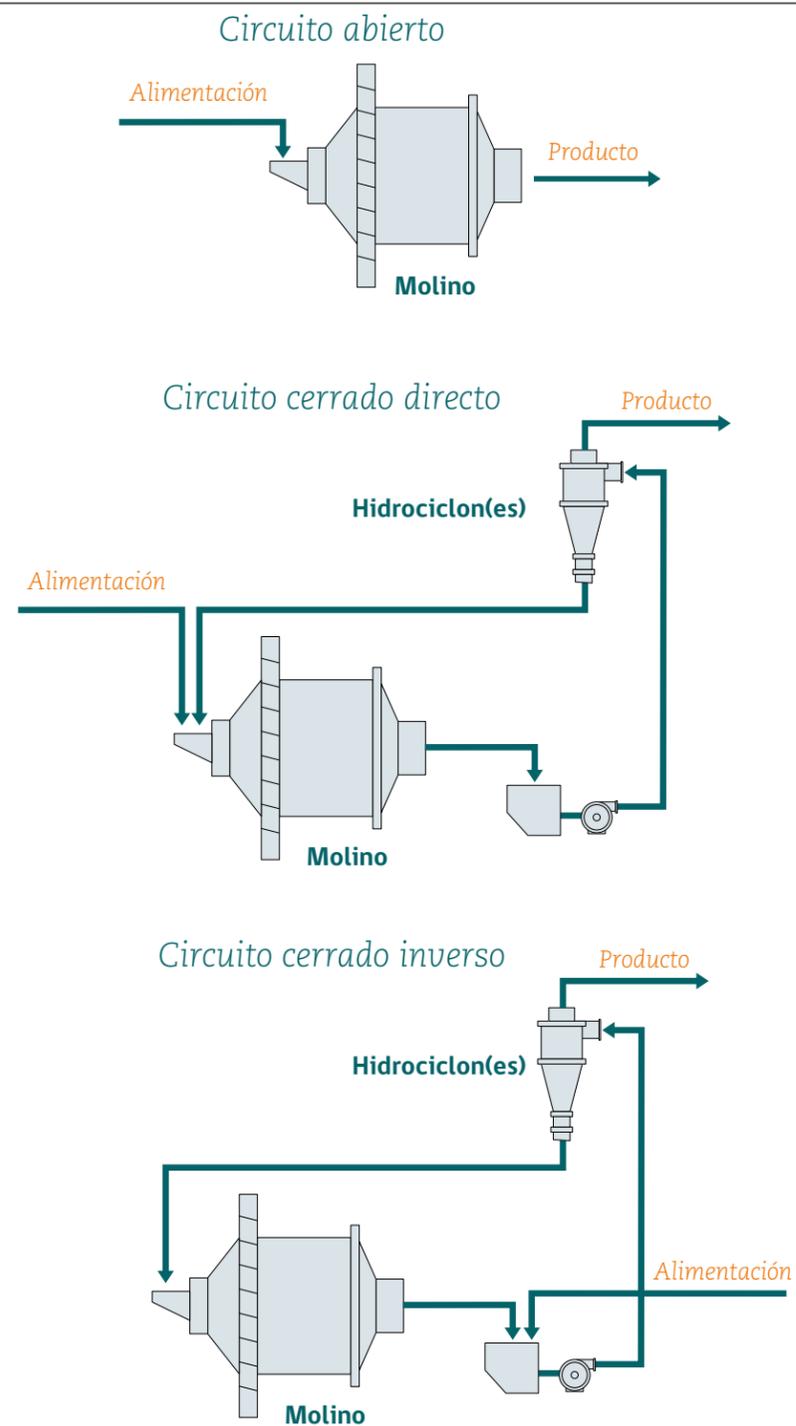
Este proceso trae como beneficio principal que las etapas de concentración posteriores, tales como la flotación, separación magnética o gravitacional, lixiviación u otro, son más eficientes.

El principal inconveniente de esta operación unitaria es que corresponde a un proceso altamente demandante de energía eléctrica. Los consumos específicos de energía (kWh/t) dependerán de varios factores, pero principalmente de la dureza del relave y tamaño de las partículas en la entrada y salida de la molienda.

Los equipos para molienda se denominan molinos, los que pueden o no emplear cuerpos moledores de distintos tamaños. Las alternativas tecnológicas para molienda son variadas, y para el caso de los relaves, los equipos más apropiados, por su rango de tamaño de partículas, son los molinos horizontales de bolas y los molinos verticales. Los primeros trabajan en un rango entre 15 mm – 15 μ m, mientras que los segundos, entre 5 mm – 5 μ m.

Los circuitos de molienda pueden ser abiertos o cerrados (directo o inverso), mediante el complemento con una etapa de clasificación con hidrociclones, tal como se ilustra en la Figura 3.

FIGURA 3: Circuitos típicos de molienda



FUENTE: Elaboración propia.

Existe una amplia gama de tamaños y capacidades, tanto de molinos de bolas como molinos verticales. Los proveedores más habituales de estos equipos corresponden a los siguientes:

METSO-OUTOTEC-FLSMIDTH-THYSSENKRUPP -CITIC

4.1.3 SEPARACIÓN MAGNÉTICA

La separación magnética es un proceso bastante eficiente para capturar las partículas magnetizables como la magnetita y la hematita, y generalmente se propone como una etapa de preconcentración de los elementos de mayor valor.

Se ha demostrado que moliendo a tamaños menores a 53 μ m, las recuperaciones de hierro son compatibles con un producto comercial de alta calidad. Dentro de los compuestos posibles de recuperar se encuentra la ilmenita, granate, cromita y monacita.

El empleo de esta tecnología a bajos campos magnéticos es poco selectiva

Los proveedores más habituales de estos equipos corresponden a los siguientes:

METSO-ERAL-ERIEZ

con el azufre y fósforo. Mientras que aplicando campos magnéticos sobre los diez mil gauss es posible obtener concentrados con menor cantidad de azufre.

Si los elementos de interés, como tierras raras, están asociados al fósforo (apatito) entonces se deberá realizar una separación magnética de alto gradiente (HGMS), debido a la asociación del fósforo (apatito) con los sulfuros (pirita, pirrotina).

Los elementos como Co, Ni, V, Mg, Mn y Ti se encuentren asociados a la fase magnetizable, por lo que el proceso de separación magnética sería muy recomendable para su concentración.

4.1.4 FLOTACIÓN

La flotación es un proceso de concentración físico químico donde interactúan tres fases: mineral, agua y aire. Su fenomenología se basa en la interacción de las partículas sólidas de una pulpa mineral con las burbujas de aire.

Son múltiples los factores que influyen en la selectividad del proceso –entendido como la afinidad o adherencia de las burbujas con determinadas partículas–, siendo los principales los siguientes:

- Mineralogía
- Liberación del elemento de interés
- Tamaño y propiedades superficiales de las partículas
- Flujo de aire y tamaño de las burbujas
- Eh y pH de la pulpa
- Uso de reactivos
- Contaminantes e insolubles

En algunos casos donde el mineral de interés no posee flotabilidad natural, se requiere la aplicación de reactivos capaces de inducir propiedades hidrófobas (no mojables) sobre las superficies del mineral. De esta manera, se crean condiciones favorables de adherencia de las partículas a las burbujas de aire.

En la flotación de minerales se emplean tres tipos de reactivos: colectores, espumantes y modificadores.

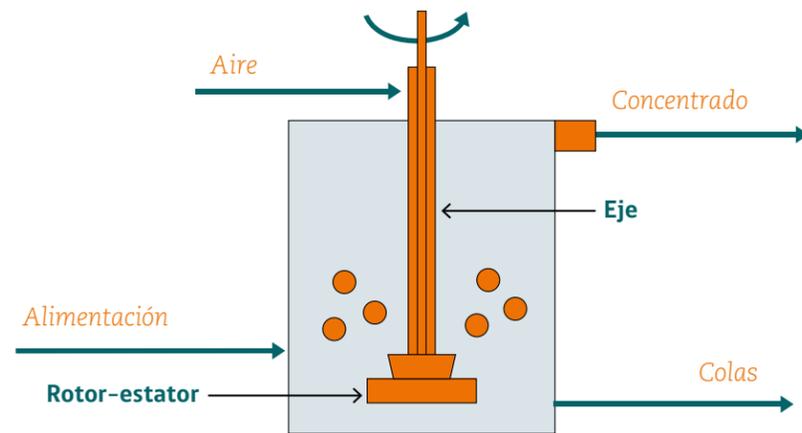
- Los **colectores** son agentes tenso-activos que permiten a las partículas volverse hidrofóbicas. Los más usados en la industria son: ácidos grasos, sulfatos, sulfonatos, aminas, xantatos, entre otros.
- Los **espumantes** también son tenso-activos, que actúan estabilizando las burbujas de aire con el fin de asegurar adherencia de las partículas.
- Los **modificadores** se clasifican en activadores de superficie de partícula, reguladores de pH, depresores, dispersantes y floculantes.

Los equipos que se utilizan para la flotación se denominan celdas, cuya función es mantener la pulpa en suspensión, generar las burbujas de aire, permitir el contacto entre los sólidos y burbujas, y capturar la espuma resultante.

Los tipos de tecnologías de celdas disponibles en el mercado son de flotación mecánica, neumáticas contracorriente y neumáticas co-corriente.

CELDAS DE FLOTACIÓN MECÁNICA

FIGURA 4: Celda de flotación mecánica



FUENTE: Elaboración propia

Este tipo de celda se caracteriza por tener un agitador mecánico formado por un eje vertical, en cuya parte inferior se dispone de un impulsor y un difusor –también denominado conjunto rotor-estator– cuyas funciones

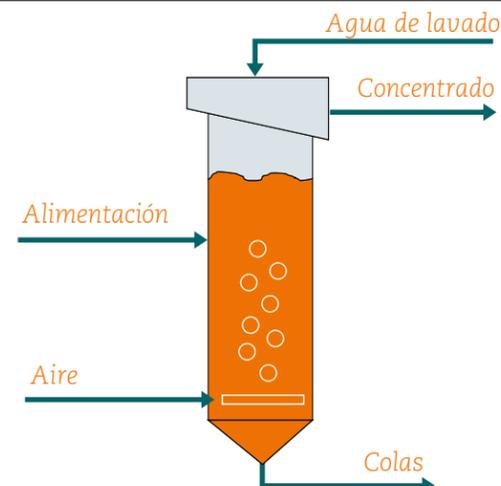
son mantener la pulpa en suspensión y dispersar el aire en el interior de la celda.

Esta tecnología es ampliamente usada en la industria, existiendo en el mercado una gran cantidad de dise-

ños con diferentes geometrías (rectangulares, cilíndricas), distintos tipos de agitadores y sistemas de aspiración del aire (auto aspirantes y aireación forzada) y diferentes volúmenes (70 a 600 m³).

CELDAS NEUMÁTICAS CONTRACORRIENTE

FIGURA 5: Columna de flotación (o celda neumática contracorriente)



FUENTE: Elaboración propia.

Comúnmente conocidas como columnas de flotación, son equipos donde la pulpa y el aire fluyen en contracorriente, favoreciendo la probabilidad de encuentro entre las partículas de

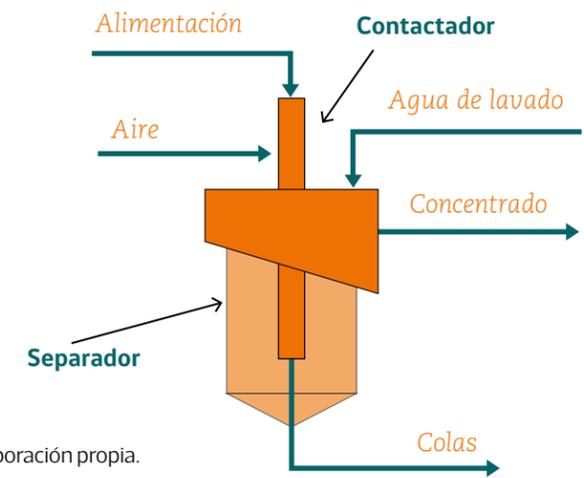
mineral y las burbujas.

La pulpa se alimenta por la parte superior de la columna, mientras que el aire es inyectado por la parte inferior. Pueden ser de sección cuadrada, rec-

tangular o circular y no emplean agitación mecánica. Utilizan agua de lavado por su parte superior, lo que favorece la limpieza de la espuma, disminuyendo el arrastre de ganga.

CELDAS NEUMÁTICAS CO-CORRIENTE

FIGURA 6: Celda de contacto (o celda neumática co-corriente)



FUENTE: Elaboración propia.

También denominadas celdas de contacto, consisten en un conjunto de equipos, de diseños alternativos y patentados, orientados a generar un contacto estrecho entre las burbujas y las partículas. Una ventaja de estos equipos frente a los indicados previamente, es la posibilidad de controlar el tamaño de burbuja, tanto para el rango de gruesos (70 a 200 μm) como para finos (< 50 μm).

En estos equipos la pulpa y el aire son alimentados en co-corriente. Básicamente se distinguen dos elementos esenciales en su configuración:

- **CONTACTADOR:** Parte del equipo donde se mezcla la pulpa con el aire, aumentando significativamente la interacción de burbujas y partículas, favoreciendo la adherencia.
- **SEPARADOR:** Parte del equipo donde se separa la espuma del resto de la pulpa. Al igual que las columnas de flotación, se inyecta agua de lavado por la parte superior.

En el caso de los relaves, como estos provienen de un proceso extractivo que incluyó reducción de tamaño, se debe identificar su perfil granulométrico y mineralogía de las especies de interés, de modo de seleccionar adecuadamente la tecnología y reactivos a emplear. Si los minerales de interés están en la fracción fina, se recomienda el uso de celdas de flotación neumática.

A continuación se presentan algunos proveedores de celdas de flotación:

Celdas de flotación mecánica

FLSMIDTH- METSO-OUTOTEC-TENOVA-BGRIMM - SPIN TECHNOLOGIES

Celdas de contacto

GLENCORE TECHNOLOGY (CELDAS JAMESON)-INGENIERÍA DE LOS MINERALES S.A. (CELDAS IMHOFLOT: V-CELL, G-CELL)-SIEMENS (HYBRID FLOT)-WOODGROVE (STAGED FLOTATION REACTOR: SFR).



4.1.5

CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

La concentración gravimétrica –o por gravedad– permite separar minerales de distintas densidades, debido al efecto diferenciador que tiene la gravedad sobre el movimiento de las partículas.

Este tipo de separación permanece como el principal método de concentración para menas de oro, estaño, hierro y otros minerales de alto peso específico. Por su bajo costo de implementación y operación, es un método preferido en lugar de la flotación, siempre y cuando sea aplicable al material a procesar y a los elementos de interés a recuperar.

Respecto a lo anterior, se debe tener en cuenta que la separación gravimétrica permite diferenciar entre partículas mayores a 75 μm . Cuanto menor es el tamaño de partícula, mayor es la importancia de las fuerzas de viscosidad y fluidez en relación con la densidad, de ahí que la eficiencia de la separación disminuya drásticamente en el procesamiento de partículas más finas.

En general, los métodos gravimétricos se agrupan en dos categorías principales:

- **CONCENTRACIÓN EN MEDIO DENSO:** Las partículas se sumergen en un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas flotan y otras se hundan. La separación se puede realizar de forma estática o dinámica.

- **CONCENTRACIÓN EN CORRIENTES:** Las partículas se sumergen en un fluido de una densidad inferior a los minerales que se espera separar. Existen distintos tipos de separación: corrientes verticales, corrientes longitudinales, corrientes oscilatorias y corrientes centrifugas.

El tipo de separador gravimétrico depende del método que se emplee. Los principales equipos corresponden a:

- **Tambor rotatorio:** para concentración en medio denso y de forma estática. El rango de tamaño de partículas para el cual es aplicable es de 0,25 a 6 in.
- **Concentrador en espiral y ciclón de medio denso:** para concentración en medio denso y de forma dinámica. El rango de tamaño de partículas para el cual es aplicable es de 0,5 a 0,2 mm.
- **Jig, equipo de concentración en corrientes verticales:** para el cual existen diversos diseños. El tamaño de partículas para el cual es aplicable es cercano a 1 mm.

4.2

DISOLUCIÓN QUÍMICA

4.2.1

LIXIVIACIÓN

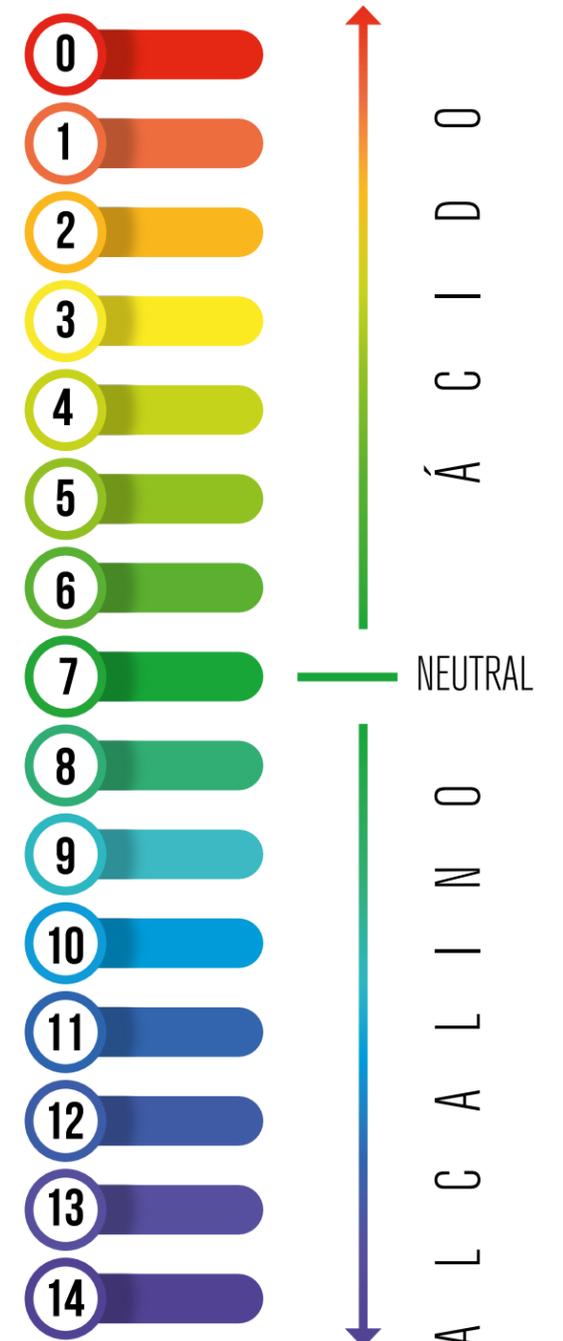
La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que tiene por objetivo la disolución selectiva de elementos de interés contenidos en una fase sólida (mineral, concentrado, relave, escoria u otro), mediante el uso de un agente lixivante (agua, reactivo ácido o alcalino). En este proceso se obtiene una solución acuosa que contiene el (los) metal(es) valioso(s) (PLS: *Pregnant Leaching Solution*) y un sólido insoluble (residuo de lixiviación).

Además del agua –se utiliza para disolver sulfatos y cloruros solubles–, los agentes lixiviantes de mayor uso industrial son los siguientes:

- **Reactivos ácidos:** ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico.
- **Reactivos alcalinos:** cal, hidróxido de sodio, hidróxido de amonio. Ocasionalmente, se introducen otros agentes externos para que actúen como oxidantes o reductores los que influyen en los potenciales redox de la solución, así como también presión y/o cambios de temperatura.
- **Agentes oxidantes:** oxígeno, sales férricas, peróxido de sodio o de hidrógeno.
- **Agentes reductores:** $\text{CO}_{(g)}$, $\text{SO}_2_{(g)}$, $\text{H}_2_{(g)}$.
- **Agentes complejantes:** amoníaco, sales de cianuro, sales de cloruro, sales de carbonato.
- **Microorganismos** (bacterias).

TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN

Industrialmente existen varias técnicas de lixiviación, identificándose las siguientes como las de mayor potencial para el retratamiento de relaves: lixiviación en lecho fijo (en pilas dinámicas y en pilas permanentes) y lixiviación de pulpas (por agitación y a presión).



LIXIVIACIÓN EN LECHO FIJO

LIXIVIACIÓN EN PILA (HEAP LEACHING)

Este método consiste en la construcción de pilas de sección trapezoidal y aplicación de solución lixivante mediante riego por la parte superior, recolectando la solución enriquecida por la parte inferior.

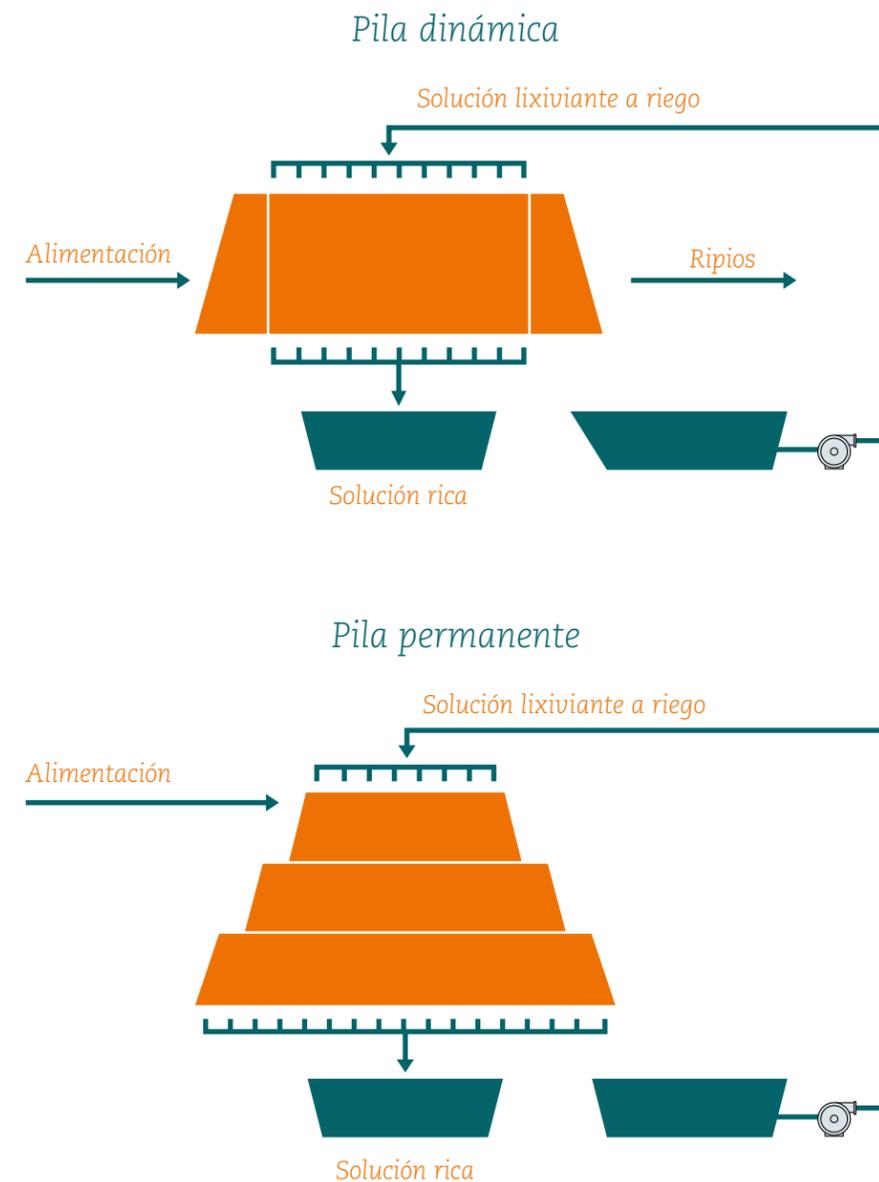
El material apilado debe contar con una granulometría que permita un adecuado coeficiente de permeabilidad, de modo que la solución lixivante percole sobre el lecho fijo sin inundarlo y provocar su inestabilidad.

La superficie donde se apila el material debe contar con un sistema de impermeabilización, recolección y conducción de las soluciones que drenan.

Se reconocen dos técnicas de apilamiento: pilas dinámicas y pilas permanentes. El primero considera la remoción del mineral una vez terminada la lixiviación, tradicionalmente denominado como rípios, siendo transportados hacia su depósito final. En el segundo caso, el mineral agotado queda en la pila, y sirve como base para la construcción de una nueva pila.

La lixiviación en pilas es el método que comúnmente se utiliza en la industria minera nacional, y por ende, el diseño y operación de esta técnica es ampliamente conocido. Existen diversas alternativas tecnológicas para la construcción de pilas (cargadores, apiladores sobre ruedas,

FIGURA 7: Lixiviación en pila



FUENTE: Elaboración propia

apiladores sobre orugas), dependiendo de su tamaño basal y altura, además de opciones para el riego (aspersión, goteo) y sistemas avanzados de monitoreo.

Existen casos de estudio a nivel piloto, en los cuales se ha aplicado la

lixiviación en pila a la fracción gruesa de relaves, siendo una opción técnica y económicamente factible.

Este método es una opción válida para el reprocesamiento de relaves a nivel industrial.

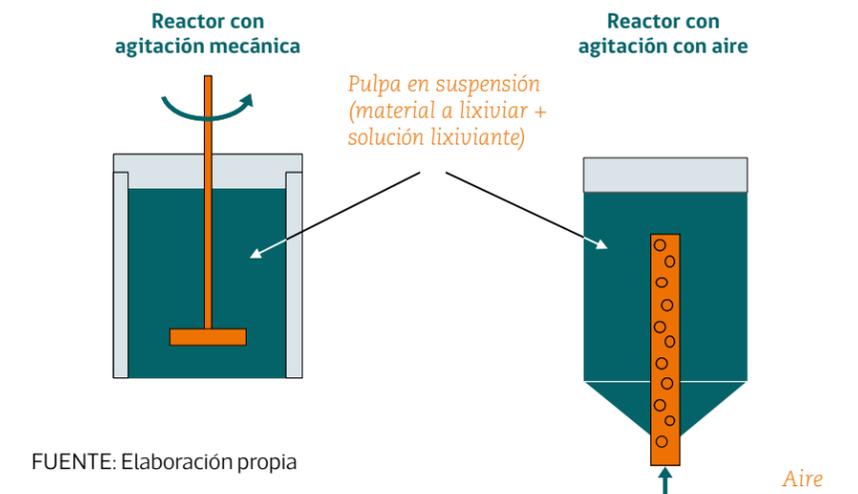
LIXIVIACIÓN DE PULPAS

LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN

Este método se realiza en reactores, que corresponden a estanques donde se aplica agitación. Esta puede ser mecánica mediante impulsores de diferentes diseños, o bien a través de inyección de aire, de modo de mantener el sólido suspendido en la fase acuosa y garantizar la homogeneidad de la pulpa mineral y el contacto con la solución lixivante.

Esta técnica presenta ventajas comparativas en relación a la lixiviación en pilas,

FIGURA 8: Lixiviación de pulpas en reactores



FUENTE: Elaboración propia

como son: cinética mayor, mejor control del proceso, técnica altamente idónea para tratar materiales bajo malla Ty. #65, entre otras. Además permite diseñar procesos con varias etapas de lixiviación en serie, lo que en el caso de las pilas se

considera máximo 2 a 3 etapas.

Este método es uno de los más apropiados para la lixiviación de materiales como los relaves, principalmente por su característica de granulometría fina y/o ultra fina.

LIXIVIACIÓN A PRESIÓN

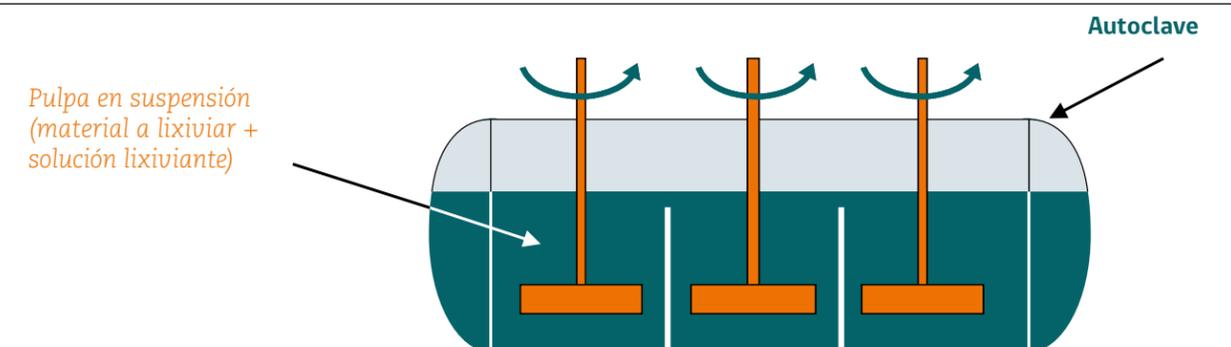
Esta técnica comprende el trabajo en reactores a presión mayor que la atmosférica, de manera que el sistema pueda operar a temperaturas superiores al punto de ebullición normal, condición que permite incrementar la

cinética de las reacciones entre otros fenómenos termodinámicos.

Este método se realiza en equipos llamados autoclaves, apropiados para soportar altas presiones y temperaturas. Estos equipos pueden ser ho-

rizontales o verticales. Ejemplos de los primeros se ven en la lixiviación de sulfuros de níquel, cobalto, zinc y cobre; mientras que los segundos, son más usados para tratar minerales de uranio y aluminio (bauxita).

FIGURA 9: Lixiviación a presión en autoclave



FUENTE: Elaboración propia



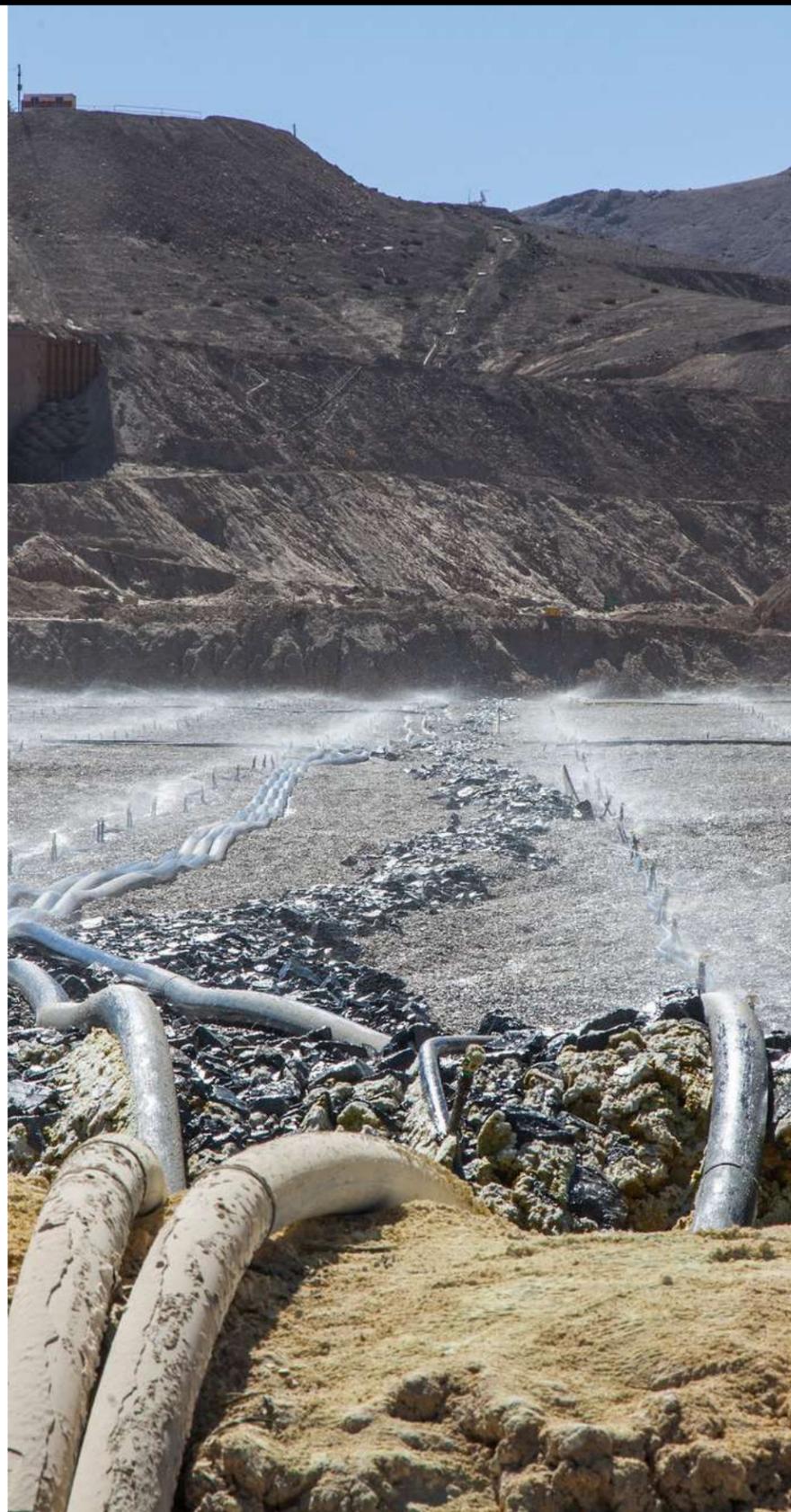
TENER PRESENTE

LIXIVIACIÓN EN MEDIOS ÁCIDO-CLORURADOS

En Chile existen antecedentes de lixiviación de minerales de cobre en medios ácido-clorurados desde los años 60, con el empleo de agua salada, de pozos o de mar, en faenas como Chuquicamata de Codelco, Compañía Mantos Blancos y Compañía Minera Tocopilla.

Con el tiempo, se ha evaluado la aplicación de esta técnica en diferentes minerales y concentrados de cobre, demostrándose sus ventajas como una mayor cinética de disolución, mitiga la pasivación en la superficie de minerales sulfurados y contribuye a disminuir el consumo de aguas continentales. Entre sus desventajas destacan el efecto corrosivo del cloro en los materiales de las tuberías y equipos de las plantas de beneficio y la formación de gas HCl, nocivo para la salud.

En los últimos 20 años se han patentado varios procesos de lixiviación en medio ácido-cloruro, como CuproChlor® e HydroCopper™.



Lixiviación en División Salvador. FUENTE: Gentileza de Codelco



TENER PRESENTE

LIXIVIACIÓN BACTERIANA O BIOLIXIVIACIÓN

Comprende la disolución de metales desde los minerales mediante la acción de bacterias, como la *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Leptothrix ferrooxidans*.

Las bacterias son microorganismos con un tamaño del orden de 0,5 a 2 μm , y que pueden vivir en condiciones extremas de acidez,

temperatura, ausencia de oxígeno u otras, dependiendo de su origen y naturaleza.

En términos generales, se distinguen dos mecanismos de lixiviación bacteriana:

- **Mecanismo directo:** Supone la disolución del mineral por la acción de reacciones enzimáticas, debido al contacto directo o adhe-

sión de las bacterias a la superficie del mineral.

- **Mecanismo indirecto:** Consiste en la disolución del mineral como consecuencia indirecta del metabolismo bacteriano, que generan condiciones lixiviantes, regenerando y concentrando agentes oxidantes, tales como la conversión del ion ferroso a ion férrico.

APLICACIÓN Y/O ADAPTACIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES

La industria minera es un rubro donde la innovación y el desarrollo de nuevas tecnologías es una constante. Por ello, es importante estar al corriente de las

nuevas alternativas tecnológicas que ofrece el mercado y evaluar su potencial aplicación y/o adaptación en el reprocesamiento de relaves.

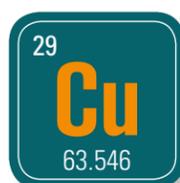
A continuación se destacan algunas de las tecnologías emergentes que se han experimentado en el reprocesamiento de relaves.

TECNOLOGÍA	APLICACIÓN	BREVE RESEÑA
Kroosh	Deslamado de relaves	Tecnología de clasificación en seco que se basa en el empleo de múltiples frecuencias sobre el material pasando por un tamiz.
PIP Reactor	Lixiviación de relaves	Se ha probado en relaves a escala piloto, demostrando que mejora su conductividad hidráulica, clasificando las partículas finas bajo #100 (150 μm) y # 200 (75 μm). Los relaves deslamados fueron posteriormente lixiviados en pila.
		Es un reactor formado por módulos de diferentes diseños, los que cumplen la función de intensificar fenómenos hidrodinámicos, como la cavitación, durante el paso de la pulpa por el reactor. Se ha probado en relaves a escala piloto, demostrando altas recuperaciones de Cu (sobre 80%) en un corto periodo. Tiene potencial aplicación para la recuperación de otros metales.

Existe un amplio espectro de tecnologías diseñadas para el tratamiento de minerales sulfurados, y por ende, con potencial aplicación y/o adaptación al reprocesamiento de relaves. Uno de los objetivos del presente manual es invitar a empresarios, académicos, proveedores y emprendedores, a que amplíen su campo de acción a este recurso secundario.

APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN

A continuación se describen las aplicaciones de técnicas de lixiviación para recuperar determinados elementos de interés.

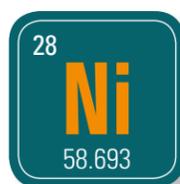


LIXIVIACIÓN DE COBRE

La mayoría de los óxidos de cobre (tenorita, malaquita, azurita, crisocola, atacamita, entre otros) se lixivian en soluciones de ácido sulfúrico (solo condiciones de pH). Algunas veces diluidas o más concentradas dependiendo de la cinética de cada especie. Por ejemplo, en el caso de la lixiviación de crisocola y dioptasa, la formación de sílice coloidal como producto de reacción tiende a disminuir la disolución e incrementar la viscosidad de la solución o pulpa. Cabe destacar que algunos óxidos complejos, comúnmente llamados óxidos negros (*copper Wad* y *Copper Pitch*), además de la condición de pH, requieren un potencial redox reductor.

Los minerales sulfurados de cobre secundarios (calcosina y covelina) pueden ser lixiviados con áci-

do sulfúrico y con mayor tiempo de procesamiento. En el caso de los sulfuros primarios (calcopirita, bornita y enargita), la mayoría de estos son insolubles en medio ácido sulfúrico diluido (la condición de pH es necesaria, pero no suficiente). Se requiere la presencia de un agente oxidante como el ion férrico (Fe^{+3}) para oxidar el azufre (condición de potencial redox oxidante), como es el caso de los sulfuros de cobre secundarios, o condiciones reductoras para el caso de sulfuros de cobre primarios. Existen numerosos casos de estudios donde se han empleado agentes complejantes, como sales cloruradas, y microorganismos, como bacterias sulfato-reductoras, con el objeto de incrementar la cinética de disolución desde los minerales.



LIXIVIACIÓN DE COBALTO Y NÍQUEL

Los sulfuros de cobalto y níquel pueden lixiviarse en soluciones de ácido sulfúrico diluido lo que generalmente se efectúa bajo presión de oxígeno con el objetivo de aumentar la extracción. En la reacción se produce ion metálico de níquel o de cobalto, más azufre elemental.



LIXIVIACIÓN DE URANIO

La mayoría de los minerales de uranio se lixivian con ácido sulfúrico en presencia de un agente oxidante (aire u oxígeno) con el objetivo de producir ion uranilo en solución. El ion uranilo forma complejos con los iones de sulfato. Debido a la formación de este complejo, el uranio en solución ácida se encuentra como anión.

La lixiviación de minerales de uranio con carbonato de sodio se usa para disolver el uranio contenido en minerales con alto contenido de carbonatos. El ion uranilo forma complejos con el carbonato. El control de OH^- en el sistema se regula con la adición de $NaHCO_3$, el cual actúa como tampón.



LIXIVIACIÓN ALCALINA DE MINERALES OXIDADOS

La lixiviación en medio alcalino es aplicada a menas cuyos componentes de la ganga se caracterizan por ser consumidores de ácido. La lixiviación alcalina puede disolver elementos de interés siendo más se-

lectiva que la lixiviación con reactivos ácidos, dejando impurezas como el hierro en el residuo sólido. Los reactivos alcalinos más usados son el hidróxido de sodio, el hidróxido de amonio y el carbonato de sodio.



LIXIVIACIÓN DE DE ZINC

Los minerales más comunes de zinc son la esfalerita, wurtzita, marmatita, entre otros. La esfalerita se encuentra asociada a la galena (mineral de plomo), por lo que en algunas minas producen zinc y plomo. Los sulfuros de zinc son recuperados mediante la técnica de flotación. El concentrado de zinc es tostado, obteniéndose una calcina, la cual se lixivia con soluciones dilui-

das de ácido sulfúrico a temperatura ambiente.

Otra tecnología de lixiviación que se aplica a los concentrados de zinc es el proceso *Sherrit Gordon* que consiste en lixiviar a presión y alta temperatura. Esta lixiviación permite tratar minerales mixtos. En este caso, el plomo se concentra en el residuo de lixiviación, mientras que elementos como el cobre y el cobalto se lixivian junto al zinc.



LIXIVIACIÓN DE TIERRAS RARAS (REE)

Las REE normalmente están asociadas a minerales como fosfatos, fluidos y silicatos. A continua-

ción, se resumen los agentes lixiviantes más indicados en base a la aplicación de sistemas Eh-pH.

TABLA 3: Sistemas Eh-pH y su aplicación en la lixiviación de fosfatos y arcillas iónicas

SISTEMA EH-PH A 25°C	APLICACIÓN
REE- NO_3 - PO_4 - H_2O	Disolución de fosfatos de REE con HNO_3 .
REE- Na - PO_4 - H_2O	Disolución de fosfatos de REE con NaOH.
REE- NH_4 - SO_4 - H_2O	Disolución de arcillas iónicas de REE con $(NH_4)_2SO_4$.
SO_4 - H_2O	Solubilidad de SO_4 en medio acuoso.
NH_4 - H_2O	Solubilidad de NH_4 en medio acuoso.

Es factible recuperar REE en las siguientes condiciones:

- Los elementos de REE en los fosfatos se lograrían lixiviar con ácido nítrico (HNO_3), trabajando en un rango óptimo de pH de $0 < pH < 1$.
- Los elementos de REE en los fosfatos se lo-

garían lixiviar con hidróxido de sodio (NaOH), trabajando alrededor de pH 14.

- Los elementos de REE presentes en las arcillas iónicas se lograrían lixiviar con sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$), trabajando en un rango de pH 5.



LIXIVIACIÓN DE CALCINAS DE VANADIO

La lixiviación de calcinas de vanadio, en medio sulfúrico, es de lenta cinética disolutiva por la formación de $CaSO_4$ sobre las partículas que se atenúa con una disgregación de la calcina antes de lixiviar.

Recuperaciones de 80% a 90 % de vanadio se

logran en 3 a 5 horas de reacción, a temperatura ambiente, con pulpas de 20% de concentración de sólidos en peso, obteniéndose soluciones ácidas de 5 a 6 g/l de V_2O_5 , que pueden ser enviadas a precipitación como *red cake*.

4.2.2

TRATAMIENTO PREVILO A LA LIXIVIACIÓN

Con el objetivo de facilitar, complementar y/o mejorar los resultados de la lixiviación, existen procesos previos que se aplican a los materiales contenedores de la mena de interés. Entre las más importantes se identifican el curado ácido y la tostación.



EXPLORANDO OTRAS OPCIONES

Existen faenas donde se reprocessa en forma conjunta relaves y rípios antiguos, empleando los tambores de aglomeración para generar la mezcla y luego formar pilas de lixiviación.

También se ha estudiado reprocessar relaves o rípios antiguos, incorporándolos en la etapa de aglomeración y curado de una planta de beneficio existente, en una proporción mineral fresco / relave o rípio antiguo tal, que no altere negativamente la estabilidad física, ni las propiedades de conductividad hidráulica de la pila de lixiviación.

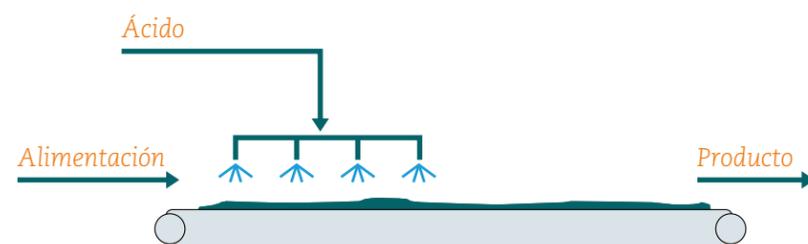
CURADO ÁCIDO

Este proceso consiste en aplicar homogéneamente sobre el mineral una dosis de ácido, de modo tal de generar el ambiente de acidez necesario para la lixiviación, acelerar la cinética de reacción e inhibir la disolución de especies no deseadas desde la ganga, principalmente la sílice coloidal. La generación de sales como producto del curado permite que estas actúen como aglutinantes entre las partículas finas y las más gruesas (aglomerado), confiriendo mejor resistencia mecánica e impidiendo la segregación de las partículas finas.

Esta técnica comúnmente complementa a la lixiviación en pilas. Las técnicas de mayor uso en la industria son:

- **Curado sobre correas transportadoras**, mediante la aplicación del ácido con sistemas rociadores.

FIGURA 10: Curado en correa

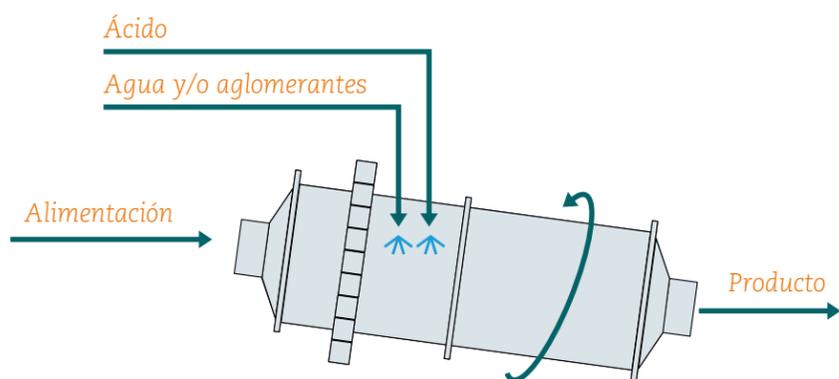


FUENTE: Elaboración propia.

- **Tambor rotario**, el cual se compone de un cilindro metálico con revestimiento de goma antiácida y provisto de tuberías perforadas por donde se inyectan los reactivos.

Este equipo además permite aglomerar el mineral, en el caso que se requiera mejorar la permeabilidad del material que será apilado.

FIGURA 11: Curado en tambor rotatorio



FUENTE: Elaboración propia.

TOSTACIÓN

Corresponde a un proceso de carácter pirometalúrgico donde el mineral se trata con aire a elevadas temperaturas, lo que promueve la oxidación de sulfuros y conversión del azufre en gas SO_2 . La operación ocurre a temperaturas entre 500 a 800 °C, parámetro que depende del tipo de producto que se desea obtener.

Este proceso se usa generalmente para tostar concentrados de cobre, molibdeno y blenda.

Entre los equipos usados en la industria, se destacan:

- **Tostador de pisos**
- **Tostador de lecho fluidizado**

La técnica de tostación puede ser aplicada para la conversión de sulfuros a óxidos en los siguientes casos:

TOSTACIÓN DE SULFUROS DE ZINC

La operación se lleva a cabo en reactores de lecho fluidizado hasta la conversión completa de los sulfuros en óxidos, llamados calcinas. Las reacciones ocurren a temperaturas entre 500 a 600 °C. Sin embargo, el sulfato se descompone a 900 °C, por lo que su contenido es relativamente bajo en calcina. El sulfuro de plomo (PbS) se convierte por completo en sulfato de plomo (PbSO_4). Por otro lado, el caudal de gas es lo suficientemente fuerte como para que la presión parcial de SO_2 sea baja, evitando así la formación de sulfato de zinc.

TOSTACIÓN DE SULFURO DE NÍQUEL Y COBRE

La tostación se realiza en lecho fluidizado por aire precalentado en el rango de 600 a 700 °C. La reacción principal que ocurre es una oxidación selectiva y parcial del sulfuro de hierro. Como la reacción es fuertemente exotérmica, la velocidad de alimentación del sólido se ajusta para mantener una temperatura en el rango indicado.

TOSTACIÓN DE ESCORIAS VANADÍFERAS

La etapa fundamental es la tostación sulfatante con escoria a bajo malla #150, mezclada con pirita fina en proporción 1:1. Ello permite generar el SO_2 necesario para transformar el CaO en CaSO_4 y favorecer el balance térmico del reactor, en ambiente oxidante, a 680 °C.

La temperatura para la extracción de Vanadio debe estar en el rango de 680 a 700 °C. Sobre los 720 °C se presenta una disminución en la recuperación de vanadio por la formación de vanadatos de calcio y reacciones con otras impurezas como Al_2O_3 , SiO_2 , MgO , dando compuestos insolubles del tipo Sílica Tie Up y otros.

TOSTACIÓN DE CONCENTRADOS DE COBALTO

La tostación de concentrado de cobalto o cobaltífero, para la obtención de óxido cobáltico, se realiza llevando a tostación el concentrado de cobalto con cloruro de sodio (NaCl), a temperatura entre los 400 y 550 °C. Se genera una calcina de cobáltica que posteriormente es lixiviada con agua.

4.3 CONCENTRACIÓN QUÍMICA

Las soluciones obtenidas en el proceso de lixiviación son tratadas mediante procesos de concentración química. Estos procesos generalmente se dividen en dos grandes etapas. La primera tiene por objetivo extraer selectivamente el o los elementos de interés desde las soluciones de tipo PLS. La segunda etapa consiste en concentrar estos elementos en una fase purificada.

El abanico de procesos de concentración y purificación química es muy

amplio. Se identifican a continuación, los que pueden tener una mayor aplicación a nivel industrial para el reprocesamiento de relaves.

- Extracción por solvente
- Intercambio iónico
- Adsorción con carbón activado (u otros substratos)
- Cristalización
- Precipitación
- Electroobtención

A continuación, se describen los procesos con mayor aplicación industrial.



Líquidos Inmiscibles
FUENTE: iStock/gyro

4.3.1 EXTRACCIÓN POR SOLVENTES (SX)

Este proceso se fundamenta en el fenómeno de transferencia de masa entre dos sistemas o fases líquidas inmiscibles entre sí.

En la práctica, estas soluciones inmiscibles corresponden a la solución enriquecida proveniente de la lixiviación (fase acuosa) y una solución de carácter orgánico (fase orgánica). El ion metálico de interés es transferido desde la fase acuosa a la fase orgánica mediante una reacción química reversible, en la que se intercambian cationes metálicos con protones contenidos en la matriz orgánica.

La fase orgánica se compone de un reactivo extractante disuelto en un diluyente orgánico, como kerosene, diésel o un derivado de estos. La gran variedad de extractantes disponibles en el mercado permite que este proceso sea altamente selectivo, ya que dichos reactivos tendrán afinidad por formar compuestos órgano-metálicos con ciertos elementos de interés, mientras que tendrá mínima o nula afinidad con iones contaminantes o metales que serán recuperados en otras etapas de extracción.

A nivel industrial, el proceso consta básicamente de dos etapas: extracción (o carga) y reextracción (o descarga),

pudiendo intercalarse etapas de lavado del orgánico cargado. En la primera etapa, las fases acuosa y orgánica se contactan mediante agitación mecánica. Luego, se separan por decantación, obteniéndose una fase orgánica cargada y una solución acuosa pobre o "refino". En la segunda etapa, la fase orgánica cargada se pone en contacto con una solución acuosa, de menor volumen y propiedades diferentes del PLS original –usualmente denominada "electrolito", por su alta concentración de ácido– en la cual se concentra el metal de interés, quedando además libre de otros metales contaminantes. La fase orgánica se descarga y recupera su capacidad extractiva, de modo que puede recircularse a la etapa de extracción.

Los equipos comúnmente empleados en la industria se denominan mezcladores-decantadores (*mixer-settlers*). Las plantas se configuran con una o más etapas de extracción y descarga, donde las fases acuosas y orgánicas fluyen en varias etapas dispuestas contracorriente. En algunos casos se incorporan etapas de lavado de orgánico, donde se pone en contacto con agua acidulada, de modo de eliminar el arrastre de impurezas.

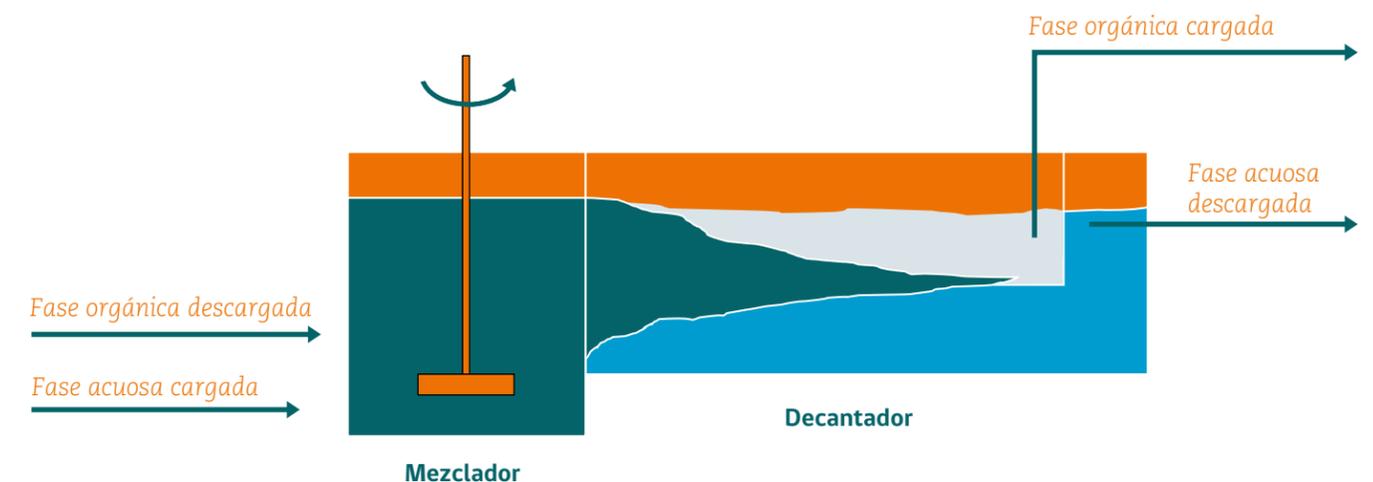
Dentro de la amplia gama de proveedores de plantas de SX se encuentran:

**OUTOTEC-TENOVA-DELKOR-GLENCORE
TECHNOLOGY-ANCOR TECMIN**

Además, dentro de los proveedores de reactivos extractantes, se encuentran:

SOLVAY-BASF-CLARIANT

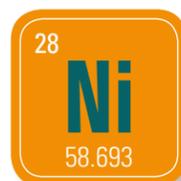
FIGURA 12: Mezclador-decantador de SX



FUENTE: Elaboración propia.

APLICACIONES DE LA EXTRACCIÓN POR SOLVENTES

Identificado el proceso y la tecnología de extracción por solventes, a continuación se describen brevemente sus aplicaciones para la recuperación de determinados elementos de interés.



CONCENTRACIÓN DE COBALTO Y NÍQUEL

El níquel y el cobalto se comportan de forma muy similar en medio acuoso, por lo que su separación resulta compleja. La aplicación de SX es una alternativa para la separación eficiente.

A diferencia del cobre, no existen todavía reactivos específicos para estos metales. La separación de cobalto

y níquel desde soluciones cloruradas se realiza con una amina terciaria por Falconbridge en Noruega; desde soluciones de sulfato usando D2EHPA por Matthey Rustenberg en Sudáfrica, MEHPA y LIX 64N por Nippon en Japón, y de sulfato a cloruro con ácido versático y alamine por Sumitomo en Japón.



CONCENTRACIÓN DE VANADIO

Las soluciones –ácidas o alcalinas– con contenido de vanadio, generalmente, son obtenidas desde el procesamiento de menas de uranio y vanadio, rocas fosfáticas, menas vanádíferas de hierro y magnetitas titaníferas.

En el caso particular del vanadio, este puede ser extraído usando el extractante D2EHPA o una amina apropiada. Posteriormente el vanadio se reextrae desde el D2EHPA con una fase acuosa de ácido sulfúrico.



CONCENTRACIÓN DE REE

De acuerdo a un Estudio de Mercado realizado en el contexto del Programa Tecnológico Estratégico 16PTEC-ME-66527, que da origen al presente manual, se identificó que en China, principal productor de REE, el proceso de SX es la aplicación industrialmente usada para concentrar y separar estos elementos. Las REE son relativamente fáciles de separar, pero no así las HREE (*Heavy Rare Earth Elements*), que requieren un

conocimiento experto, que por lo general, es protegido como secreto industrial.

Se han utilizado numerosos extractantes para la separación de tierras raras entre sí. Sin embargo, solo unos pocos se utilizan en la práctica industrial. Incluyen extractantes del tipo catiónico, como ácidos organofosforados y ácidos carboxílicos, extractantes neutros como tri-n-butil-fosfato y extractantes del tipo aniónico, como las aminas.

4.3.2

INTERCAMBIO IÓNICO (IX)

Este método se basa en el fenómeno del intercambio reversible de iones desde una solución cargada hacia una solución líquida o matriz sólida con contraiones inestables.

Por lo general, los intercambiadores iónicos de uso industrial corresponden a resinas sólidas insolubles que contienen grupos funcionales, de carga positiva o negativa. La matriz generalmente corresponde a un polímero orgánico esférico de tamaño entre 0,5 a 2 mm de diámetro. La resina más común se prepara a partir de la copolimerización de estireno y cantidades variables de divinilbenceno (DVB), el cual se utiliza como agente ligante de la matriz (*crosslinking*).

La carga iónica de los grupos funcionales dará origen a diferentes tipos de resinas:

- **Catiónicas (fuertes y débiles):** La matriz puede tratarse con ácido sulfúrico concentrado para introducir grupos sulfónicos que extraen cationes a bajo pH, pero muestran baja selectividad. Los intercambiadores ácidos débiles –como los obtenidos a partir de ácido carboxílico o ácido fosfórico– son más selectivos, pero funcionan a pH > 4.

- **Aniónicas (fuertes y débiles):** Los grupos funcionales son derivados de aminas. Son más selectivos. Operan en un rango de pH de 0 a 10.

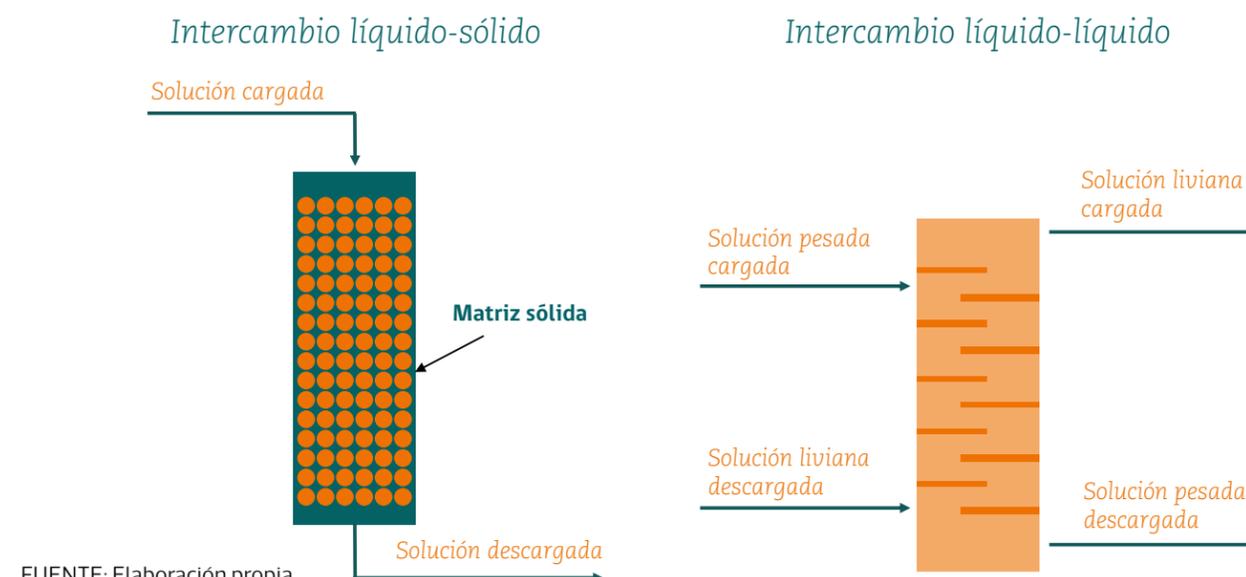
El equipo típicamente empleado para llevar a cabo este proceso es la columna de IX, en cuyo interior contiene la resina que se contacta con un flujo de solución acuosa en forma ascendente o descendente, hasta agotar la capacidad de intercambio o hasta que las condiciones de diseño lo definan.

Entre los distintos tipos de columna se cuentan las siguientes:

- Lecho fijo
- Lecho fluidizado
- Lecho móvil

Además existe el proceso denominado “*Resin-in-pulp*” en que la resina y el mineral que se está lixiviando están juntos en el mismo reactor.

FIGURA 13: Columnas de IX



FUENTE: Elaboración propia.

APLICACIONES DEL INTERCAMBIO IÓNICO

Identificado el proceso y la tecnología de IX, a continuación se describen brevemente las aplicaciones existentes para la recuperación de determinados elementos de interés.



CONCENTRACIÓN DE URANIO

La extracción de uranio, con resinas aniónicas fuertes desde soluciones de ácido sulfúrico, es una de las aplicaciones más im-

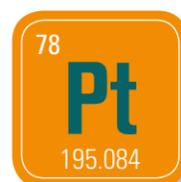
portantes. El uranio se lixivia desde sus minerales formando el ion uranilo el que, en exceso de sulfato, forma el complejo aniónico.



CONCENTRACIÓN DE RENIO

Se recupera renio como subproducto de la molibdenita. Una solución con 0,6 g/l de renio es tratada mediante IX con

una resina aniónica fuerte. La resina cargada se regenera con una solución de tiocianato de sodio.



CONCENTRACIÓN DE METALES DEL GRUPO DEL PLATINO (PGM)

La lixiviación de metales nobles requiere del empleo de agentes muy oxidantes. Estos metales tienen tendencia a formar complejos aniónicos. El desarrollo de resinas quelantes ha permiti-

do obtener procesos más selectivos. La resina poli-iso-tiourea (PITU) se ha probado con éxito en la extracción de estos metales, incluso desde condiciones muy ácidas.



Resina de intercambio iónico. FUENTE: iStock/Matt Turner

4.3.3 ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

El carbón se utiliza ampliamente debido a su capacidad de adsorción de moléculas orgánicas e inorgánicas desde gases y líquidos. La adsorción puede describirse como la adhesión de ciertas sustancias a las paredes de los poros del carbón.

Los procesos de adsorción, además de significar una disminución de la energía libre, son exotérmicos (calor de adsorción). Se divide en adsorción física (que involucra fuerzas de *Van der Waals*), generalmente reversible, y adsorción química, cuando están presente enlaces iónicos y covalentes, generalmente irreversibles.

Los factores que influyen en la adsorción son:

- Temperatura: la adsorción generalmente disminuye con el aumento de la temperatura.
- pH de la solución: el carbón tiene baja afinidad por iones, especialmente con carga alta y el pH afecta a las especies iónicas.
- Naturaleza de las especies.
- Concentración de las especies.
- Naturaleza del carbón y su tamaño (cinética).

La adsorción se aplica en la hidrometalurgia, química analítica y en el tratamiento de aguas. El carbón es un

mal adsorbente de cationes inorgánicos pequeños, como el Ni^{2+} , o aniones pequeños como el Cl^- . Sin embargo, adsorbe iones como el $AuCl_4^-$, $AuCN_2^-$ y $NiCN_4^{2-}$.



Carbón activado. FUENTE: iStock/L_Mirro

ADSORCIÓN DE ORO CON CARBÓN ACTIVADO

El interés metalúrgico del carbón activado está relacionado principalmente con los procesos de recuperación de oro desde soluciones de lixiviación.

La lixiviación del oro en forma comercial se realiza por tres rutas: con cloro (medio ácido), tiourea (medio ácido) y cianuro (medio alcalino). Este último es el método más utilizado para la extracción de oro en forma comercial y, por ende, las soluciones lixiviantes cianuradas se procesan en etapas de concentración mediante adsorción con carbón activado.

4.3.4 CRISTALIZACIÓN

La cristalización es un proceso físico que tiene por objetivo generar y separar cristales desde una solución acuosa. Generalmente este proceso se utiliza para la obtención de compuestos puros, ocasionalmente también se emplea para la

recuperación de algunos metales.

Los tres pasos básicos que incluye un proceso de cristalización son:

- Sobresaturación de la solución
- Nucleación de cristales
- Crecimiento de cristales



Mineral cristalizado. FUENTE: Envato.

Existen equipos cristalizadores batch y continuos, agitados y no agitados, entre otras técnicas. En esta línea podemos encontrar los siguientes tipos: cristalizadores de enfriamiento, cristalizadores de evaporación y cristalizadores de vacío.

4.3.5 PRECIPITACIÓN

La precipitación iónica se puede definir como un proceso en el cual el ion metálico presente en la solución se hace reaccionar con un agente apropiado para formar un compuesto metálico insoluble.

La cementación es un proceso de óxido-reducción inducido de modo que la semi-reacción sea la de precipitación del metal deseado. Los equipos más usados para la cementación de cobre son las bateas gravitacionales, bateas activadas, precipitador de tambor y precipitador tipo cono.

APLICACIONES DE LA PRECIPITACIÓN

A continuación, se detallan aplicaciones de la cementación para diferentes elementos de interés.

• Cementación de cobre

En esta técnica se precipita cobre desde soluciones mediante “cementación con hierro”, proceso que se practica desde hace siglos. La técnica es todavía utilizada en operaciones comerciales en todo el mundo. Las soluciones tratadas generalmente provienen de lixiviaciones ácidas, lixiviaciones biológicas o soluciones de descarte. En general se usa para soluciones bajo los 13-14 g/L de cobre. El consumo estequiométrico estimado de hierro es de 1 kg por cada 0,88 kg de cobre metálico producido.

A escala industrial la producción de cemento de cobre se produce contactando, en un trommel, chatarra de hierro con so-

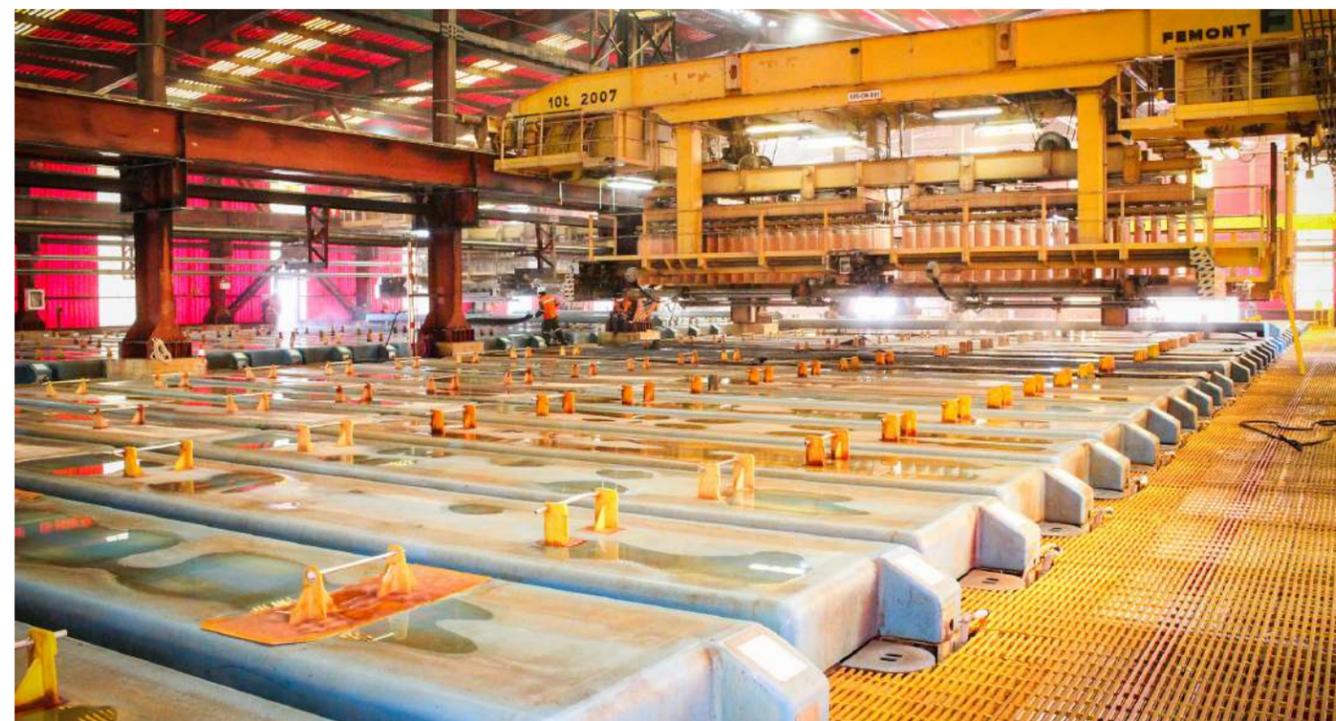
luciones ricas en cobre. Su eficiencia depende de la concentración de ion ferroso que se incrementa debido a la recirculación de la solución pobre. El contenido de cobre en el cemento no supera el 80%.

• Cementación de oro y plata

La cementación de oro y plata desde soluciones cianuradas se realiza con la adición de zinc metálico. Este proceso se realiza generalmente en equipos del tipo precipitador Merrill-Crowe (en equipos tipo trommel).

• Precipitación selectiva de REE

La precipitación con ácido oxálico permite obtener oxalatos de REE.



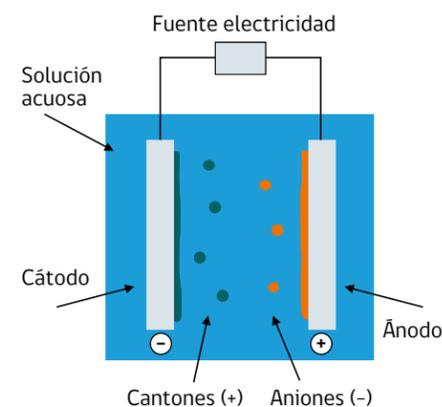
Planta de EW – Producción de cátodos de cobre. FUENTE: Gentileza de Codelco.

4.3.6 ELECTROOBTENCIÓN

La electroobtención o *electrowinning* (EW) es un proceso electrolítico que tiene por objetivo global la recuperación de una especie metálica a partir de soluciones concentradas del metal en forma de ion, mediante la aplicación de una corriente eléctrica. El catión (ion positivo) se reduce en el cátodo (normalmente una placa de acero inoxidable 316L con polaridad negativa) a expensas de la oxidación del agua en el ánodo (normalmente una placa de aleación Pb-Ca-Sn con polaridad positiva).

Industrialmente, una planta de EW se organiza por circuitos, cuya cantidad depende del tamaño de la planta. Los circuitos a su vez se ordenan por

FIGURA 14: Electroobtención



FUENTE: Elaboración propia.

secciones y estas por celdas. Los cátodos y ánodos son los responsables del funcionamiento electroquímico de la celda como unidad productiva. Estos elementos están conectados en paralelo a las celdas, las que están conectadas en serie del mismo modo que las secciones.

Esta técnica se emplea para la producción a gran escala de metales como aluminio, cobre, magnesio, níquel y zinc, así como la producción a pequeña escala de metales como oro y plata. Es un proceso que permite recuperar metales en forma pura y selectiva, y es ampliamente usado en la industria para alcanzar purzas del orden de 99,9999%.

RESUMEN

Operaciones unitarias a considerar

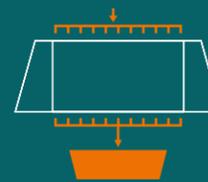
Para configurar un proceso extractivo desde relaves se requiere conocer las diferentes operaciones unitarias y alternativas tecnológicas disponibles.

EN MATERIA DE OPERACIONES DE **CONCENTRACIÓN FÍSICA** SE CUENTAN:

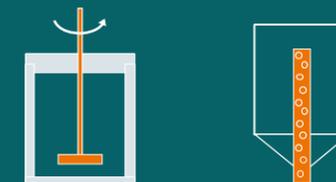
- 1 DESLAMADO** para separar la fracción gruesa de la fina. La tecnología comúnmente utilizada en relaves es el cicloneo en húmedo.
- 2 MOLIENDA DE GRUESOS** para liberar los minerales contenidos de elementos de traza de valor. En el caso de los relaves, la tecnología más apropiada son los molinos horizontales de bolas o molinos verticales.
- 3 SEPARACIÓN MAGNÉTICA** para capturar las partículas magnetizables.
- 4 FLOTACIÓN**, ya sea con celdas de flotación mecánica, neumáticas contracorriente (comúnmente denominadas columnas de flotación) o celdas neumáticas co-corriente (también denominadas celdas de contacto).
- 5 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA** para separar minerales de distintas densidades.

EN MATERIA DE **DISOLUCIÓN QUÍMICA** SE CUENTAN:

Los procesos de lixiviación permiten la disolución selectiva de elementos de interés contenidos en una fase sólida mediante el uso de un agente lixivante. Existen varias técnicas de lixiviación, pero las de mayor potencial para el retratamiento de relaves son:



LIXIVIACIÓN EN LECHO FIJO tanto en pilas dinámicas como en pilas permanentes (preferiblemente para fracciones gruesas)



LIXIVIACIÓN DE PULPAS tanto por agitación (para materiales bajo malla #65) como a presión (aumenta cinética de las reacciones en autoclaves)

También se pueden aplicar **tratamientos previos a la lixiviación** que facilitan, complementan y/o mejoran sus resultados:

CURADO ÁCIDO

TOSTACIÓN



EN MATERIA DE OPERACIONES DE **CONCENTRACIÓN QUÍMICA** PARA TRATAR SOLUCIONES EXTRAÍDAS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN, SE DISTINGUEN DOS ETAPAS

- 1** Extracción selectiva de elementos de interés desde las soluciones tipo PLS
- 2** Concentración de estos elementos en una fase purificada

PROCESOS DE MAYOR APLICACIÓN:

EXTRACCIÓN POR SOLVENTE

Transfiere masa entre dos sistemas o fases líquidas inmiscibles entre sí (solución enriquecida proveniente de la lixiviación en fase acuosa y una solución de carácter orgánico)

INTERCAMBIO IÓNICO

Permite el intercambio reversible de iones desde una solución cargada hacia una solución líquida o matriz sólida (intercambiador iónico) con contraiones inestables

ADSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVADO

U otro sustrato, para la adsorción de moléculas orgánicas e inorgánicas desde gases y líquidos

CRISTALIZACIÓN

Genera y separa cristales desde una solución acuosa

PRECIPITACIÓN

Por la cual el ion metálico presente en la solución reacciona con un agente apropiado y forma un compuesto metálico insoluble

ELECTROOBTENCIÓN

Para recuperar una especie metálica a partir de soluciones concentradas del metal en forma de ion, mediante la aplicación de una corriente eléctrica

5

Criterios de selección para definir el proceso adecuado

El reprocesamiento de relaves requiere de una configuración de equipos y tecnologías diferentes a las conocidas en el procesamiento de minerales frescos provenientes de la mina. Los arreglos más comunes en el procesamiento de minerales frescos de mina son: tronadura, chancado, molienda, flotación, separación sólido-líquido (espesamiento y/o filtrado), para finalmente depositar los relaves.

En los yacimientos que van a ser explotados es necesario levantar la mayor cantidad de información básica que permita identificar y cuantificar con el mayor detalle posible el recurso. Es así como las grandes mineras han logrado construir modelos geometalúrgicos, que intentan simular los vectores de producción, tanto de concentrados como residuos (sólidos y líquidos), con bajo nivel de riesgos. Sin embargo, para la mediana y pequeña minería, se torna inviable económicamente construir un modelo geometalúrgico de los yacimientos que explotan.

Para el caso de los depósitos de relaves, los elementos de valor se encuentran en bajas concentraciones (trazas); por consiguiente, para hacer rentable este tipo de proyectos, se debe asumir

la necesidad de explotación y reprocesamiento de varios depósitos y/o la recuperación de más de una especie de valor. Por consiguiente, una de las primeras interrogantes que deben ser resueltas para definir la estrategia del tratamiento de los relaves ya depositados en un tranque será la generación y captura de la información clave que requiere un modelo geometalúrgico (*Work Index*, granulometría, potencial de acidificación, mineralogía, difracción de rayos X, química elemental, recuperación de los elementos de valor de interés, sedimentación y otros). Esto permitirá definir un camino nítido para ir seleccionando los procesos o tecnologías más convenientes según sea el caso específico que se esté analizando.

ETAPAS

• Caracterización física y química

El punto de partida será realizar una batería completa de análisis químicos elementales. Dependiendo de las concentraciones de los elementos de interés pueden utilizarse técnicas de volumetría, espectrometría de absorción atómica (AAS) o plasma acoplado inductivamente (ICP). Para la caracterización física se deben realizar análisis granulométricos, gravedad específica, análisis

mineralógico (deseable QEMSCAN PMA), observaciones en microscopio electrónico de barrido (SEM), difracción de rayos X, etc.

• Realizar un ranking por concentración

Ordenar los elementos de interés desde los de mayor concentración a los de menor concentración. Se debe tener en cuenta que en la mayoría de los casos, algunos elementos mayores tienden a asociarse con otros elementos estratégicos en concentraciones a nivel de trazas (disueltos en los minerales que ellos componen o sus impurezas asociadas, tales como las piritas, apatito y/o arcillas). Se debe considerar la misma lógica de selección y/o definición de elementos de valor indicada en el Capítulo 1 de la Sección I.

• Análisis de liberación

Determinar en qué porcentaje están liberadas las especies que contienen los elementos de interés. Esta información es fundamental para el rendimiento en los procesos de recuperación y concentración. Si el análisis de liberación (QEMSCAN PMA) indica que el porcentaje de liberación es inferior al 50%, el mineral requerirá procesos de conminución. Como se trata de relaves –donde el

mineral ya fue reducido de tamaño– el estudio debe estar enfocado en molienda convencional (bolas en húmedo) o una molienda de finos específica.

• Análisis de la gravedad específica

En algunas ocasiones se puede dar que la especie de interés tiene una diferencia significativa de su gravedad específica con el mineral de la ganga (ej: el oro y una ganga porfídica, 19,3 vs 2,8 g/cm³, respectivamente). En estos casos, se deberán realizar estudios de separación gravitacional. Para una diferencia en las gravedades específicas no significativas (<50%), un aspecto condicionante que debe ser considerado es la granulometría, en especial de la ganga. Tamaños de partículas inferiores a 100 µm no permitirían una separación selectiva de las distintas especies que se quieren separar, por lo que esta técnica debería ser descartada.

Si el proceso de concentración gravimétrica se realizó en medio acuoso (líquidos densos, hidrociclones o concentrador Knelson), se debe realizar estudios de separación sólido-líquido (sedimentación y filtrado) para los concentrados y relaves generados por el proceso. Estos estudios pueden ser ejecutados por las empresas provee-

doras de este tipo de equipamiento y/o proveedores de reactivos para este fin (floculantes y coagulantes).

• Susceptibilidad magnética

En muchos materiales destaca una propiedad física de ellos asociada a la respuesta que tienen frente a un campo magnético. Cuando es fuerte la interacción magnética se está en presencia de materiales paramagnéticos. Por el contrario, cuando la respuesta del material (mineral) es débil, se está en presencia de un material diamagnético. No obstante, hay elementos y minerales denominados ferromagnéticos, en los cuales destaca su propiedad de generar sus propios campos magnéticos. El mayor ejemplo conocido es la magnetita (Fe₃O₄, que es un espinel compuesto por FeO y Fe₂O₃), pero también están los elementos tales como hierro, cobalto y níquel. Por consiguiente, si el análisis mineralógico revela una cantidad importante de magnetita u otro espinel (Fe-Ti, Fe-Ni o Fe-Co), ya sea ferromagnético y/o paramagnético se deben realizar estudios de concentración magnética.

La primera etapa de pruebas de laboratorio son los ensayos de Tubo de Davis. Esta técnica permitirá dimensionar la potencial recuperación de hierro y

otras especies que presenten susceptibilidad magnética (evaluando variables de procesos tales como la intensidad de campo, porcentaje de sólidos, granulometría, etc.).

La segunda etapa puede consistir en pasar de pruebas nivel de laboratorio a piloto con equipos del tipo separador magnético de baja intensidad (LIMS) o separador magnético de alto gradiente (HGMS). La elección de uno u otro equipo estará en función directa de la cantidad de magnetita y otras especies ferromagnéticas que se deseen recuperar por este medio. Por ejemplo, si el hierro es el elemento objetivo, se puede utilizar la razón de las leyes del hierro magnético y el hierro total (FeM/FeT). En la medida que esta razón aumente, el equipo LIMS debería ser suficiente para recuperar las especies ferromagnéticas. Por el contrario, si la razón FeM/FeT disminuye, quiere decir que hay una mayor cantidad de especies paramagnéticas y se requerirá inducir una intensidad del campo magnético mayor o inducir un gradiente mayor, por lo que se recomienda utilizar un equipo del tipo HGMS.

Por último, se deben realizar estudios de separación sólido-líquido (sedimentación y filtrado). Por lo general, estos estudios los ejecutan las empresas pro-

veedoras de este tipo de equipamiento y/o proveedores de reactivos para este fin (floculantes y coagulantes).

• **Concentración física-química**

En general, los relaves de la industria minera chilena del cobre provienen de la producción de concentrados sulfurados a través del proceso de flotación, por lo que no es de extrañar que aún queden especies sulfuradas de interés que puedan ser recuperadas, principalmente en los rangos de gruesos sobre 150 μm o de finos, bajo los 50 μm .

En general, para recuperar especies sulfuradas, los estudios deben orientarse a determinar:

- la química de los reactivos colectores, espumante y/o depresores/activadores.
- el pH óptimo de flotación.
- el porcentaje de sólidos óptimo de flotación.
- cinéticas de recuperación *rougher* y *cleaner*.
- el circuito óptimo (usar herramienta de los *Split Factor* u otra para simular circuitos de flotación).
- Evaluar el efecto de remolienda para liberación (P80) y remoción del envejecimiento superficial (activación) de las partículas de interés. Esta evaluación debe complementarse con el uso de equipos de flotación del tipo neumático u otro con orientación a la recuperación de partículas finas y ultra finas, que permita controlar el

tamaño de burbuja y la mecánica de transporte de la espuma, entre otras variables.

- Si se flotan dos o más especies debe evaluarse la flotación colectiva y luego la selectiva. Por ejemplo, se pueden recuperar colectivamente sulfuros de Cu, Mo, Zn y Fe, y después flotarlos de manera diferencial (variando el pH y Eh) para recuperarlos en distintos concentrados.

Por otro lado, pueden existir otras especies mineralógicas de interés distintas a los sulfuros (fosfatos, carbonatos, etc.) que puedan ser flotadas. Para esos casos se recomienda consultar la bibliografía específica o bien relacionarse con los proveedores de reactivos químicos para recoger sus consejos emanados de su dilatada actividad en este campo.

Como en todo sistema heterogéneo sólido-líquido, se deben realizar estudios de separación sólido-líquido (sedimentación y filtrado) para los concentrados y relaves generados por el proceso. Estos estudios pueden ser ejecutados por las empresas proveedoras de este tipo de equipamiento y/o proveedores de reactivos para este fin (floculantes y coagulantes).

• **Disolución química**

Los sistemas más conocidos por la industria nacional es la lixiviación de óxidos de cobre con ácido sulfúrico (como lixivante) y, en menor medida, la cianuración para la lixiviación del oro y plata. La mayoría de los sistemas se basan en traspasar los ele-

mentos de interés desde un sólido a una solución, generalmente de carácter acuoso, por lo que el análisis preliminar de la aplicabilidad de este proceso es el estudio del sistema completo, utilizando los Diagramas de Pourbaix (diagramas de potencial electroquímico versus pH).

Por otro lado, se debe tener en consideración que los relaves son minerales que han sido molidos y que generalmente los depósitos donde estos han sido confinados se han construido a través de la separación de arenas. Estas son depositadas en el muro, mientras que las lamas son depositadas en la cubeta.

Dependiendo del elemento de interés y el tipo de minerales a los cuales está asociado, este presentará mayores leyes en la fracción fina/ultrafina o bien en la fracción gruesa. En el primer caso, los minerales que contienen el elemento probablemente estarán liberados; mientras que en el segundo caso, seguramente estarán ocluidos parcial o totalmente en las arenas.

Considerando lo anterior, una opción que se debe tener presente –si los minerales de interés están como sulfuros en la fracción gruesa– es deslamar y/o moler y luego flotar, salvo que se utilice alguna técnica emergente que permita lixiviar eficientemente este tipo de materiales.

• **Concentración y purificación química**

Estos procesos están asociados al tratamiento de las soluciones obtenidas en la lixiviación, las cuales contienen los elementos de interés pero también parte de las impurezas. Para obtener resulta-

TENER PRESENTE



MATERIALES FINOS Y ULTRAFINOS

Para los materiales finos y ultrafinos que tienen importantes grados de liberación, se hace viable utilizar la lixiviación por agitación. Para ello se deben generar estudios que aborden lo siguiente:

- Solubilidad de los elementos de interés con distintos reactivos en medio acuoso. Los análisis de los diagramas de *Pourbaix* y gráficos de especiación ayudan bastante. Estos pueden ser encontrados en atlas de estos sistemas o usar software especializados (ej: HSC, Medusa, entre otros). El resultado determinará el rango de pH, potencial electroquímico en que se debe trabajar y el reactivo que se utilizará (ácidos: sulfúrico, clorhídrico o nítrico; bases: hidróxido de sodio o amoníaco).

- Selección del reactivo de lixiviación, procurando que este sea selectivo sobre la mayor cantidad de elementos de valor y no de las impurezas.

- Plan de pruebas de lixiviación por agitación, evaluando la liberación de los minerales de interés (D80), porcentaje de sólidos, concentración de reactivos, temperatura, entre otras variables.

- Cinética de lixiviación a ser realizada con las mejores condiciones.

Por último, con las pulpas lixiviadas se deben realizar estudios de separación sólido-líquido (sedimentación y filtrado), donde el líquido será el PLS contenedor de los elementos de interés recuperados y el sólido será el ripio. Por lo general, estos estudios los ejecutan las empresas proveedoras de estos equipos y/o proveedores de reactivos para este fin (floculantes y coagulantes).

dos satisfactorios en esta etapa se debe considerar qué técnica o método de concentración aplicar. Esto dependerá de la concentración del elemento de interés en el PLS, teniendo en cuenta que para concentraciones del nivel de ppm o mg/L se deben utilizar resinas de intercambio iónico (IX), y para concentraciones en el orden de g/L es más conveniente aplicar técnicas de extracción por solventes (SX) y/o cristalización. Para el caso de la cristalización se puede utilizar el concepto de sobresaturación adicionando reactivos o evaporando agua, tal que los elementos de interés queden

sobresaturados en la solución y/o formen especies insolubles, y por consiguiente, precipiten selectivamente.

Es recomendable realizar estos estudios con las empresas proveedoras de estos equipos, proveedores de reactivos para este fin, empresas de servicios metalúrgicos, institutos técnicos o universidades.

• **Productos o semi-productos**

Teniendo las soluciones purificadas, con el o los elementos de interés concentrados, se deben extraer como productos o subproductos de la mayor pureza posi-

ble. La experiencia nacional masificada está en torno al cobre, donde el proceso de SX y EW está muy bien estudiado y hay mucha experiencia en su aplicación industrial. Para el oro y plata también los procesos de concentración y refinación son muy bien conocidos. Sin embargo, para otros elementos de interés como el cobalto, vanadio, tierras raras, entre otros, la metalurgia de extracción y refinación no es bien conocida en la comunidad minero-metalúrgica nacional, razón por la cual se deberá iniciar un proceso de generación masiva de conocimiento, teniendo en cuenta que la minería secundaria ha llegado para quedarse.

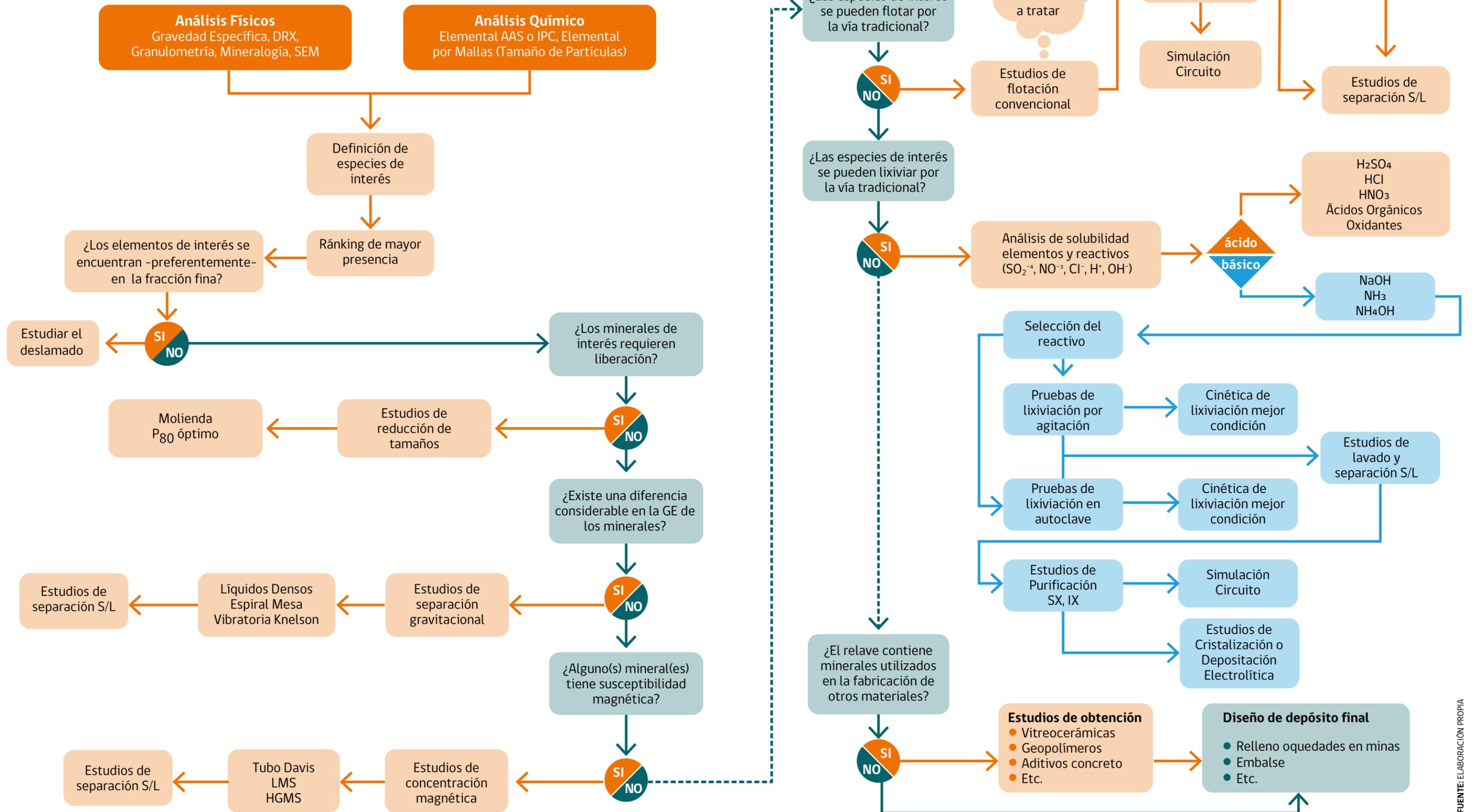
En este sentido, la recuperación y posterior refinación de estos elementos no convencionales requieren sucesivas etapas de concentración-precipitación hasta llegar a niveles altos de pureza. El punto de partida será obtener un precipitado polielemental de elementos de interés. Esto dependerá de los elementos contenidos en las soluciones a refinar, los cuales pueden ser agrupados por familias respecto a sus valencias (+1, +2, +3 o +4).

Para el caso de las tierras raras, cuya valencia es +3, es muy probable que los precipitados obtenidos desde el PLS contengan la mayoría de las tierras raras.

Sin embargo, los elementos con valencia +2, se pueden segregar de acuerdo con el valor de pH de la solución.

Es recomendable realizar estos estudios con las empresas proveedoras de estos reactivos para este fin, empresas de servicios metalúrgicos o universidades.

Árbol de decisión de procesos de recuperación de elementos de valor



6

Caso de estudio

En este capítulo, se describe la aplicación de la metodología antes indicada para identificar, concentrar y extraer elementos de valor desde relaves, durante la ejecución del Programa Tecnológico Estratégico 16PTECME-66527, que da origen al presente manual.

Este ejemplo incorpora la identi-

cación preliminar de los elementos de valor, que no constituye una estimación de reservas.

El alcance de las pruebas corresponde hasta pruebas de banco (TRL5) y la evaluación técnico económica corresponde a una ingeniería de perfil.

Adicionalmente, se señalan los siguientes pasos para llegar a un producto comercial (TRL 9).

6.1 IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE VALOR Y POTENCIAL ECONÓMICO

Los pasos para la identificación de los elementos de valor son los siguientes:

1 Definición de los elementos de valor

A Elementos estratégicos de la Comunidad Europea

- i. Suma total de Tierras Raras (livianas y pesadas) > 350 ppm.

ii. Co, Ta, Sb, W, Nb > 200 ppm.

iii. Contenido de Mg > 1000 ppm.

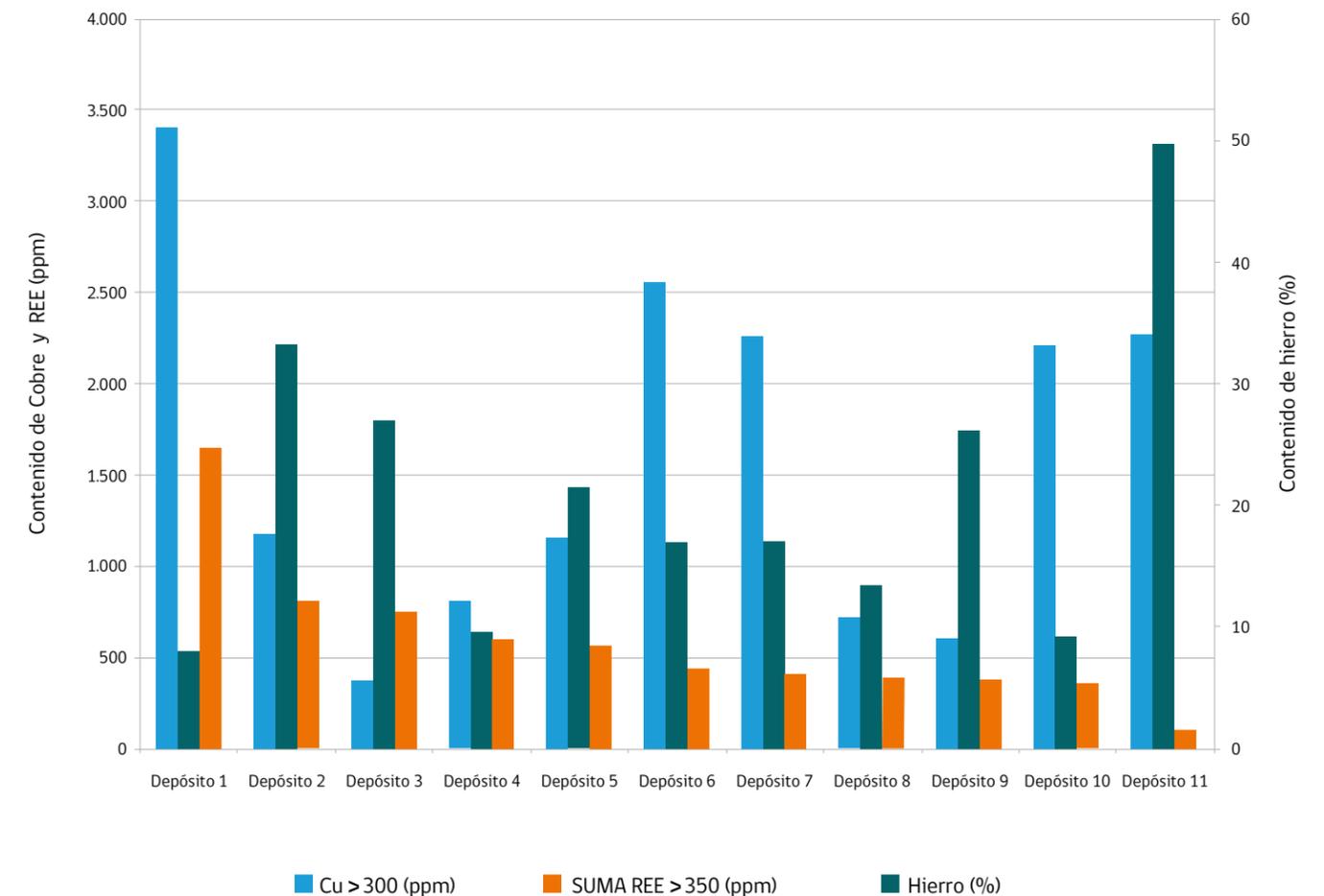
B Contenido de Cu > 1000 ppm. Podrá ser menor siempre y cuando estén presente otros (subproductos) elementos de valor con concentraciones interesantes.

C Contenido de Fe > 7% (10% Fe₃O₄).

2 **Búsqueda de los elementos seleccionados** y sus concentraciones en la base de datos geoquímica de los relaves, dispuesta por Sernageomin.

3 **Preselección de once depósitos** de relave ubicados en la franja ferrífera.

GRÁFICO 2: Depósitos preseleccionados. Contenido de Cu, Fe y REE



FUENTE: Elaboración propia.



FUENTE: Imágenes tomadas en terreno por el Programa 16PTECME-66527.

4 Muestreo de relaves con barreno

Se visitan los depósitos preseleccionados y se toman muestras en los mismos puntos reportados por Sernageomin a distintas profundidades de hasta cuatro metros.

5 Caracterización química (ICP) y mineralógica (QEMSCAN PAM y SEM)

Se realiza una caracterización química a todas las muestras tomadas, usando una metodología que asegura su representatividad.

TABLA 4: Resultados de caracterización química de los depósitos preseleccionados

MUESTRA	∑LREE (ppm)	∑HREE (ppm)	∑REE (ppm)	Cu (ppm)	Fe (%)
RELAVE 1	57	8	65	348	23
RELAVE 2	186	5	191	1.175	25
RELAVE 3	145	19	164	714	9
RELAVE 4	392	26	418	726	43
RELAVE 5	69	4	74	672	20
RELAVE 6	36	34	70	395	10
RELAVE 7	363	5	368	1.479	18
RELAVE 8	91	18	109	3.603	8
RELAVE 9	202	6	208	876	10
RELAVE 10	124	24	148	2.416	12
RELAVE 11	252	16	269	3.017	13

FUENTE: Elaboración propia.

Se realiza la caracterización mineralógica a un total de cinco relaves que presentaron contenidos interesantes de los elementos de valor definidos anteriormente.

TABLA 5: Resultados de caracterización mineralógica de los depósitos preseleccionados con mayor contenido de elementos de valor

GRUPO MINERALÓGICO	RELAVE 1	RELAVE 2	RELAVE 3	RELAVE 4	RELAVE 5
Cuarzo-feldespatos	0,082	0,529	0,333	0,336	0,564
Filosilicatos	0,072	0,185	0,336	0,355	0,257
Otros silicatos	-	0,025	0,072	0,033	0,015
Óxidos de hierro e hidróxidos	0,634	0,176	0,112	0,096	0,079
Sulfuros de hierro	0,012	0,025	0,045	0,013	0,018
Ferro magnesianos	0,104	0,054	0,094	0,159	0,055
Apatito	0,096	0,007	0,009	0,007	0,013
TOTAL	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

FUENTE: Elaboración propia.

6 Análisis mineralógico

Una vez seleccionados los relaves con mayor concentración de REE, se realiza un análisis más detallado de los minerales portadores de estos elementos, encontrándose que la asociación principal son los fosfatos y arcillas.

TABLA 6: Resultados del análisis mineralógico de los depósitos seleccionados

RELAVE	CUARZO-FELDESPATOS	FILOSILICATOS	ÓXIDO DE HIERRO	FERRO-MAGNESIANOS	FOSFATOS
Depósito 4			Hematita/ Magnetita	Piroxeno	Apatito
Depósito 7	Plagioclasas	Arcillas Sericita/muscovita Clorita		Piroxenos Anfibolas	Apatito
Depósito 11		Arcillas Clorita		Anfibolas	Apatito

FUENTE: Elaboración propia.

7 Generación de compósito

Una vez seleccionados los relaves que serán sometidos a un proceso metalúrgico para la extracción de los elementos de valor, se decide generar un compósito en una proporción: Relave 4: Relave 7: Relave 11: 50%: 25%: 25% en peso.



6.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROCESO METALÚRGICO

Para la identificación del proceso se consideran los antecedentes obtenidos tanto del análisis químico como físico. Las pruebas metalúrgicas se realizaron a través de contratos con laboratorios certificados y en colaboración con las universidades. El control de los resultados se realiza principalmente usando un análisis químico ICP, en cada una de las pruebas metalúrgicas. Dado el alto costo de los análisis mineralógicos, este tipo de análisis se realiza solo para la caracterización inicial y para los resultados más promisorios.

A La caracterización inicial de la granulometría descarta la utilización de técnicas de concentración gravitacional. Sin embargo, los contenidos de óxidos de hierro justificaron realizar pruebas de separación magnética. Pruebas con tubo de Davis, lograron disminuir la masa no magnetizable en un 50%. Estas pruebas mostraron que las REE se concentran en la fase no magnetizable.

B Luego, pruebas de flotación muestran la factibilidad de concentrar los fosfatos y REE con esta técnica.

C Por medio de pruebas de lixiviación en estanque agitado Figura 24, se analiza la disolución química de los elementos de interés (REE y Cu), explorando con diferentes agentes lixiviantes (ácidos y alcalinos).

D El PLS de la lixiviación con mejores resultados es sometido a pruebas de extracción por solvente -empleando reactivos gentileza de Solvay- en embudos de



Prueba de separación magnética en tubo de Davis.
FUENTE: Imágenes tomadas en laboratorio del CI-JRI por el Programa 16PTECME-66527.



Pruebas de flotación.
FUENTE: Imágenes tomadas en laboratorio del ASMIN por el Programa 16PTECME-66527.

Pruebas de lixiviación.
FUENTE: Imágenes tomadas en laboratorio de Solespectro por el Programa 16PTECME-66527.



decantación. En esta etapa es importante la búsqueda del extractante adecuado.

E Finalmente se realizan pruebas de precipitación iónica con un agente apropiado, para generar un compuesto de REE.

Basándose en los resultados de las distintas pruebas metalúrgicas, se generó un diagrama de flujos y balance de masa del proceso completo, para obtener los siguientes elementos:



Pruebas de extracción por solventes.
FUENTE: Imágenes tomadas en laboratorio de Solvay por el Programa 16PTECME-66527.

Precipitado de REE.
FUENTE: Imágenes tomadas en laboratorio de Solespectro por el Programa 16PTECME-66527.

- Hierro magnetizable
- Cobre
- Fosfatos
- Tierras raras

A partir del balance de masas, se efectúa el dimensionamiento de los equipos principales y estimación de la mano de obra y consumo de los suministros claves (agua, energía eléctrica, reactivos).

Luego se realiza una estimación de costos de operación y costos de inver-

sión, a un nivel de precisión Clase 5 (Ingeniería de Perfil). Finalmente se realiza una evaluación económica y sensibilización de la misma para varios escenarios de operación.

Según la evaluación económica se identifica hasta qué punto del proceso es rentable la extracción de elementos de valor, y a partir de dónde se requiere optimizar o tomar la decisión de llegar hasta un semiproducto.

6.3 VALIDACIÓN DEL PROCESO

Una validación a escala de laboratorio permite evaluar la viabilidad técnica del proceso probado. Es posible hacer una estimación de la viabilidad económica con estas pruebas, pero existe una gran probabilidad de que los resultados obtenidos no se puedan escalar a una instalación industrial con resultados económicos positivos.

Es por esta razón que, para llegar a una instalación industrial con resultados económicos satisfactorios, se requiere de un proceso de escalamiento. Este depende de diversos factores como la cantidad de muestras y, quizás lo más importante, los recursos económicos disponibles.

Para una validación a nivel TRL 5 (tecnología validada en un entorno relevante), bastarían pruebas de banco (*batch*) con escalas geométricas de 1:50 o 1:100. Este tipo de pruebas no requiere de una inversión considerable y se recomienda para demostrar la viabilidad del proceso y para la búsqueda de financiamiento de

pruebas con propiedades variables del relave, mayor tiempo y reproducibilidad.

Un pilotaje podría corresponder a un TRL 6. Este tipo de escalamiento requiere de una inversión importante en recursos económicos.

TRL 7 a TRL9 corresponden a prototipos a escala industrial, con miras a una implementación comercial.

Específicamente, en el desarrollo del Programa 16PTEC-66527, se realizan las siguientes pruebas de banco para la concentración física: separación magnética en HGMS a una masa de 8 t de muestra compósito; y luego flotación, en celdas convencionales de 12 L, alimentando a esta operación unitaria el descarte de la separación magnética.

A continuación de estas pruebas, se planifica realizar la campaña de pruebas de disolución y concentración química a nivel de banco.

Al momento de la edición de este manual, estas pruebas aún no comienzan.

Prueba de separación magnética en HGMS



Prueba de flotación a nivel de banco



FUENTE: Imágenes tomadas en instalaciones del CDI-JRI por el Programa 16PTECME-66527

RESUMEN

Caso de estudio

En el Programa Tecnológico Estratégico 16PTECME-66527, que da origen a este manual, se configuró un proceso de extracción de Cu, Fe y REE a nivel de laboratorio, que está en proceso de desarrollo de pruebas a escala banco.

29
Cu
63.546

26
Fe
55.847

REE

Relaves
con
lor

Se **preseleccionaron once depósitos** de relave a partir de la base de datos de Sernageomin.



Se tomaron muestras de los once depósitos mediante la técnica de barrenos a distintas profundidades. Se les realizó caracterización química, mediante la técnica ICP y análisis mineralógico, mediante QEMSCAN.



Se seleccionaron los relaves con **mayor concentración de REE** y se generó un compósito para ser sometido a diferentes operaciones unitarias de concentración física, disolución química y concentración química, a fin de definir un proceso metalúrgico.

PRINCIPALES RESULTADOS

La caracterización inicial de la granulometría descartó la utilización de técnicas de concentración gravitacional. Sin embargo, los contenidos de óxidos de hierro justificaron realizar pruebas de separación magnética. Las pruebas de flotación mostraron factibilidad de concentrar los fosfatos y REE. Las pruebas de lixiviación permitieron explorar con diferentes agentes lixiviantes la disolución química de los elementos de interés (REE y Cu). El PLS de la

LX fue sometido a pruebas de SX, probando diferentes extractantes. Se realizaron pruebas de precipitación iónica con un agente apropiado para generar un compuesto de REE. Basándose en los resultados de las pruebas metalúrgicas se generó un diagrama de flujos y balance de masa del proceso completo para obtener hierro magnetizable, cobre, fosfatos y REE. A partir del balance de masas se dimensionaron los equi-

pos principales, mano de obra y consumo de suministros claves, para pasar a una estimación de Opex y Capex. Finalmente, se realizó la evaluación económica y sensibilización de la misma para diversos escenarios de operación, con un nivel de precisión Clase 5 (Ingeniería de Perfil).



PARTE

III

**Otros aspectos
claves a considerar**



7

Deposición de los residuos

El reprocesamiento de relaves mineros, sean frescos o antiguos, producirá nuevos residuos que dependerán del tratamiento que se les haya dado. En términos generales se distinguen los siguientes:

- **Relaves residuales.** Corresponden a los residuos sólidos de un tratamiento de concentración esencialmente físico, como por ejemplo, separación magnética, concentración gravimétrica o flotación. En la sección 8.1 se describen alternativas para redepositar los relaves residuales.

- **Residuos de minerales tratados por lixiviación.** Estos constituyen los residuos sólidos de un proceso de disolución química.

En el caso de la lixiviación en pilas, estos residuos comúnmente son denominados rípios de lixiviación. La forma de depositarlos es mediante botadero, el cual debe cumplir con los requisitos establecidos por Semageomin.

En el caso de la lixiviación agitada, si los residuos sólidos son neutralizados podrían ser redepositados como relaves. Esto es

un aspecto clave que deberá ser analizado caso a caso de acuerdo a la normativa vigente. Por ejemplo, en el caso específico de la lixiviación de oro y plata, la Guía para la Descripción de Proyectos de Desarrollo Minero de Cobre y Oro-Plata en el SEIA⁷, define los residuos de la lixiviación agitada de oro-plata como relaves.

- **Residuos líquidos.** En todo proyecto de reprocesamiento de relaves se debe priorizar la reutilización del agua de proceso, recuperándola mediante procesos de separación sólido-líquido y recirculándolas a las operaciones consumidoras de agua. Siempre debe primar el concepto de cero descarte, no obstante, algunos procesos requieren efectuar purgas menores y controladas, que deben ser gestionados como residuos líquidos industriales, respetando la normativa vigente.

Cabe destacar que la humedad residual en los relaves residuales o residuos de lixiviación, forman parte del residuo sólido. Por ende, el depósito final de estos debe impedir que los fluidos percolen hacia el terreno donde sean dispuestos. Solo en forma impermeable o confinada se puede almacenar soluciones saturadas o con impurezas disueltas.

TENER PRESENTE

REUSO DE LOS RELAVES

Una de las líneas de I+D planteadas por la Hoja de Ruta de la Minería Chilena¹ es la búsqueda de nuevos usos industriales para los relaves. Por su granulometría y composición podrían ser empleados como:

- **Materia prima** para la fabricación de productos comerciales, por ejemplo, materiales cerámicos o vidrios.

- **Insumo para preparar materiales de construcción**, por ejemplo, producción de cemento o mezclarlos con cemento ("relaves cementados"); o generación de geopolímeros.



7.1 REDEPOSITACIÓN DE RELAVES

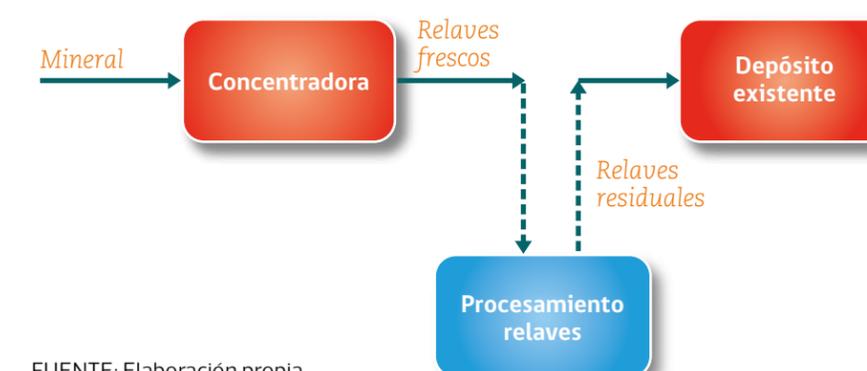
Estos residuos pueden ser almacenados como depósito final en cualquiera de las siguientes opciones.

- **TRANQUE O EMBALSE EXISTENTE**

Esta es la alternativa más conveniente en el caso de relaves frescos que son reprocesados antes de ser depositados, ya que no constituye un aumento en la capacidad final del depósito.

Incluso, los relaves finales tienen un volumen menor a los relaves frescos, contribuyendo a disminuir el tamaño final del depósito o bien permitiendo extender su vida útil.

FIGURA 15: Redeposición en depósito existente. Caso relaves frescos como materia prima.



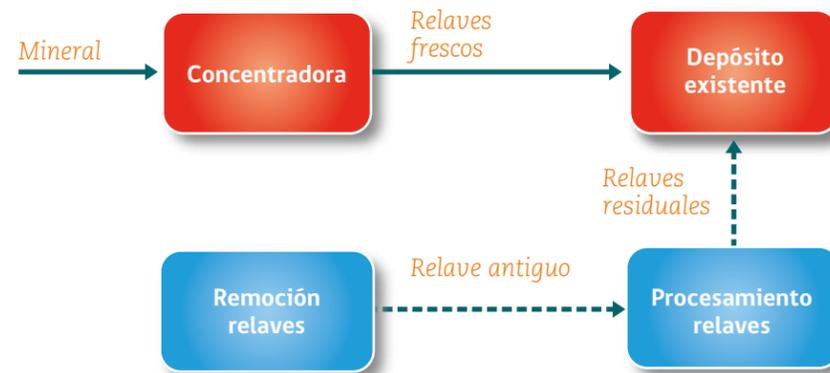
FUENTE: Elaboración propia.

7 https://sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2017/01/25/guia_proyectos_mineros_cobre_oro_plata.pdf

En el caso del tratamiento de relaves antiguos, el uso de un depósito existente es una alternativa atractiva siempre y cuando la instalación donde sea reprocesado el relave esté a una distancia técnica y económicamente viable del depósito. Como regla general, se debe privile-

giar que la planta de reprocesamiento de relave esté cerca del depósito, mientras que las labores de remoción incluyan el traslado hacia la planta. Este escenario implica un aumento de la capacidad final del depósito existente, lo que requiere de la autorización del Sernageomin y SEA.

FIGURA 16: Esquema redepósito en depósito existente. Caso relaves antiguos



FUENTE: Elaboración propia.

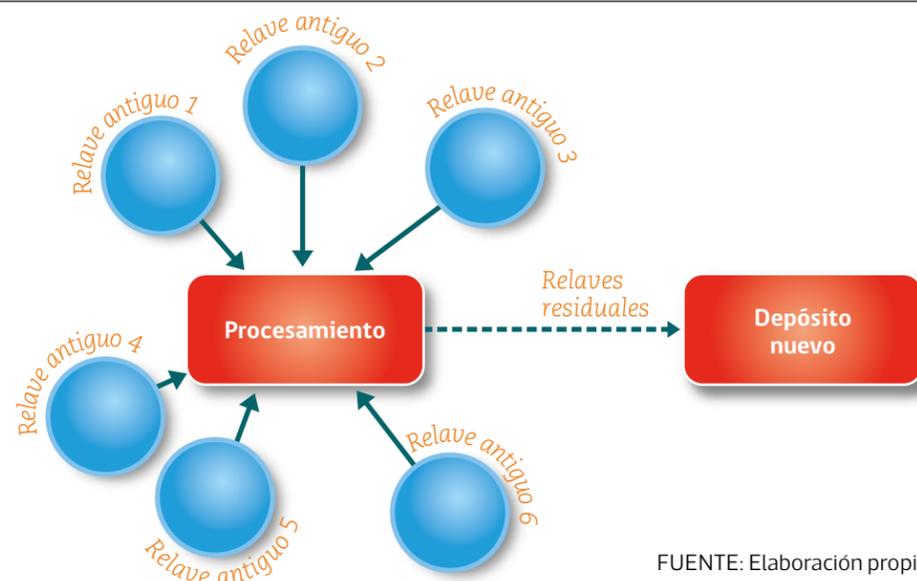
• NUEVO TRANQUE O EMBALSE AD-HOC

El diseño y construcción de un nuevo depósito para relaves debe respetar la normativa vigente para los depósitos de relaves.

En un futuro escenario de la minería, en el cual se procesen múltiples depósitos de relaves antiguos, esta es una opción que puede ser considerada como estratégica por una em-

presa o inversionista único. O bien puede ser considerada como una alternativa coejecutada por varias empresas o inversionistas, ya que el nuevo depósito puede ser concebido para almacenar los relaves residuales de distinta procedencia (depósito zonal). Esta práctica es muy habitual en Sudáfrica.

FIGURA 17: Redepósito en nuevo depósito (zonal)



FUENTE: Elaboración propia.

• REDEPOSITACIÓN EN EL MISMO LUGAR DE ORIGEN

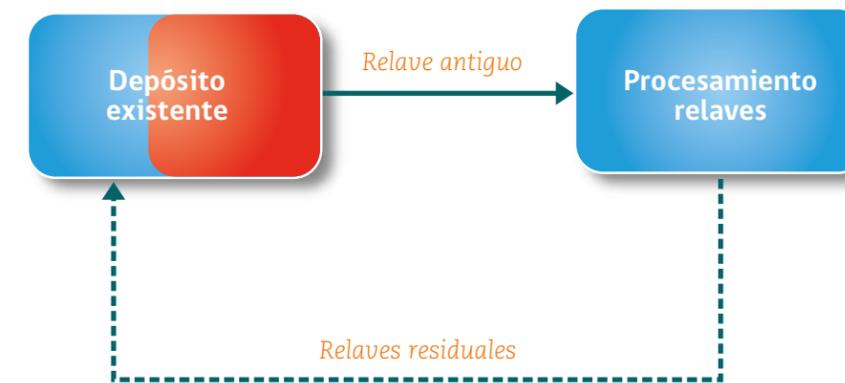
Si se tratase de un relave antiguo, así como en casos especiales y debidamente justificados –como lo sería un proyecto de saneamiento y estabilización de un pasivo ambiental–, el relave residual puede ser depositado en el mismo lugar desde el cual se ha removido.

Esto requiere de una operación coordinada entre labores de remoción y redepósito, por zonas en forma rotativa, y se deben tomar todas las medidas necesarias para asegurar la estabilidad

física y química del depósito final.

Esta práctica se ha usado en Sudáfrica y Estados Unidos. En Chile, un aspecto clave a considerar es la normativa vigente. Los relaves deben ser dispuestos en un depósito de relaves autorizado, por ende, considerar el lugar de origen como depósito final, a priori debiese considerarse solo para aquellos casos donde sea factible emplear dicho lugar como depósito de relaves.

FIGURA 18: Redepósito en mismo lugar de origen



FUENTE: Elaboración propia.

• RELLENO DE RAJOS ABANDONADOS Y CONDENADOS (SIN POSIBILIDAD DE EXPLOTACIÓN DE BOLSONES MINERALIZADOS REMANENTES)

Esta forma de depositar los relaves esta asociada a una etapa previa de desagado intensivo, ya que la depositación debe realizarse a una alta concentración en peso, de modo que se impida la migración de sólidos, posibilitando sellar todo tipo de grietas o fracturas con pulpa de alta densidad y no disgregada, que presente una muy baja permeabilidad y que impida la fluencia de agua hacia la napa freática del terreno.

Adicionalmente, se debe controlar que la eventual formación de lagunas de aguas

emergentes nunca entre en contacto con terrenos naturales permeables. Se debe dejar las facilidades (bolsones con bomba de achique) para bombear el agua clarificada de vuelta al proceso.

Existen casos en la minería nacional donde se ha empleado esta opción, ya que presenta ventajas importantes, –como eliminar la necesidad de un terreno para construir el depósito–, se usa una instalación existente reduciendo el costo de inversión y se minimiza el riesgo de inestabilidad física del depósito.

• RELLENO DE CASERONES ABANDONADOS Y OBRAS SUBTERRÁNEAS CONDENADAS (SIN POSIBILIDAD DE EXPLOTACIÓN POSTERIOR)

Para llevar a cabo esta opción se debe identificar y aislar el(los) sector(es) más adecuados para rellenar, instalando estructuras (hormigón o tierra compactada por ejemplo) que cumplan la función de sellar galerías de modo de permitir el almacenaje.

Al igual que el relleno de rajos, esta alternativa estará asociada a una etapa previa de desaguado para generar relaves en altas concentraciones en peso. Inclusive se podría considerar la mezcla con cemento ("relaves cementados") o reactivos con tratamientos térmicos que permitan su consolidación a alta resistencia mecánica.

En caso de un relleno total de la mina, se deben sellar todos los accesos del complejo minero y dejarlo debidamente relleno y consolidado.

Esta alternativa ya cuenta con algunas aplicaciones en la mediana minería nacional y presenta ventajas similares al relleno de rajos. Entre estos últimos está eliminar la necesidad de intervenir la superficie y requerir un terreno para construir el depósito. Permite usar una instalación existente reduciendo el costo de inversión, y se elimina el riesgo de inestabilidad física de un depósito en superficie.



FUENTE: Gentileza Novatech (Tencate Geotube).

• RELLENO EN TUBOS GEOTEXILES

En el caso de una baja cantidad de relave –menor a un Mt– se puede considerar la opción de rellenar grandes tubos geotextiles que permiten el drenaje del líquido en forma paulatina, mientras que los sólidos remanentes se consolidan en el interior, formando "ladrillos" de gran volumen. Estos contenedores de relaves pueden acumular hasta varios cientos de toneladas cada uno y, por su forma, pueden ser

acumulados unos sobre otros formando "tortas" o "pirámides" de muy alta estabilidad, siempre confinados dentro de un área delimitada que puede ser declarada como depósito de relaves ante la autoridad.

Esta opción ya cuenta con aplicaciones en Europa, y puede ser una solución práctica para el almacenamiento de relaves residuales generados a partir del reprocesamiento de relaves antiguos.

• DEPÓSITO COMO PASTA

Para esta alternativa se debe considerar espesadores de alta compresión, de modo de generar relaves con alta tensión de fluencia, que permitan la formación de playas o conos de pendiente relevante. Deben ser depositados en un terreno en cuyo perímetro se instalen muros de empréstito de baja altura.

Para evaluar esta opción se requiere efectuar estudios previos de sedimenta-

ción y reología a diferentes concentraciones, de modo de validar si las características particulares de un relave permitirían la aplicación de esta alternativa.

A nivel mundial esta opción se ha usado mucho en relaves y en Chile ya existen aplicaciones en la gran y mediana minería. Entre sus ventajas destacan su mayor estabilidad física, un uso más eficiente del agua y baja erosión eólica.



FUENTE: Ecometales.

• DEPÓSITO FILTRADO

Si el agua escasea o es muy cara, una opción válida es filtrar los relaves hasta lograr queques con contenido de agua entre 15 a 17% en peso. Antes de ser filtrados, los relaves siempre deben ser espesados.

Luego, el material filtrado es transportado por camiones o cintas transportadoras hacia el nuevo depósito, donde es compactado para asegurar su estabilidad.

Entre las tecnologías disponibles para filtrar se encuentran:

- **Filtros que aplican vacío.** Estos presentan baja presión de filtrado –1 bar o menos si la ubicación del sitio está en altura– ya que cada 100 msnm la presión atmosférica disminuye aproximadamente 0,012 bar. Están los filtros de banda, de tambor y de discos.

- **Filtros de prensa** (horizontales o verticales). Estos otorgan una presión de filtrado no superior a 10 bar.

- **Filtros de tubo.** Aplican una alta presión de filtrado, alrededor de 100 bar.

La elección de una tecnología u otra no es trivial, pues si bien los filtros tubulares son los más eficientes en términos de extracción de agua, se deben considerar otras variables como el volumen de procesamiento y la cantidad de equipos requeridos, la disponibilidad de espacio y suministro de electricidad, costos de capital y costos de operación.

En Chile existen algunas aplicaciones de relaves filtrados y en la mayoría se ha optado por filtros de banda en vista del gran volumen de tratamiento (> 10.000 t/d).



FUENTE: iStock/Alfo Mancigli

RESUMEN

Depositación de los residuos



EL REPROCESAMIENTO DE RELAVES MINEROS -FRESCOS O ANTIGUOS-
PRODUCE NUEVOS RESIDUOS

A

RELAVES RESIDUALES

residuos sólidos de un
tratamiento de concentración
esencialmente física

B

RESIDUOS DE MINERALES

tratados por lixiviación

C

RESIDUOS LÍQUIDOS

principalmente purgas
que no es posible
reutilizar

ALTERNATIVAS DE DEPÓSITO FINAL PARA ALMACENAR RELAVES RESIDUALES

- Tranque o embalse existente
- Nuevo tranque o embalse ad hoc
- Redeposición en el lugar de origen
- Relleno de tubos geotextiles
- Relleno de rajos, caserones y/u obras subterráneas abandonadas y condenadas
- Depósito como pasta
- Depósito filtrado

8

Suministros críticos

8.1
AGUA

En cualquier proyecto de reprocesamiento de relaves se requiere de servicios e insumos claves, cuya naturaleza y niveles de consumo dependerán de las alternativas tecnológicas que se seleccionen para las labores de remoción, re-tratamiento y redeposición.

A continuación se describen los aspectos esenciales que se deben considerar para los siguientes suministros críticos:

- Agua
- Electricidad
- Combustibles y lubricantes
- Reactivos
- Equipos principales

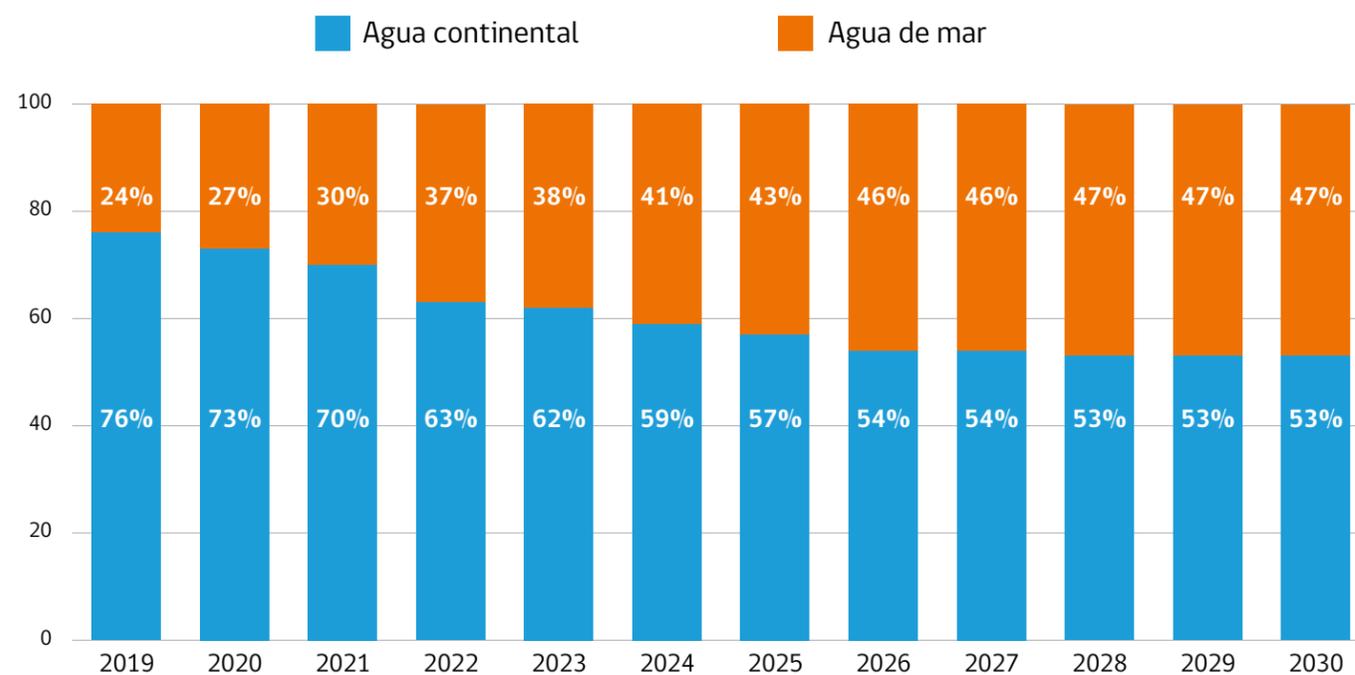
El consumo de agua fresca (*make-up*) debe ser el mínimo posible. Para ello, el tratamiento de los relaves se debe realizar en un contexto de recirculación de aguas desde todos los procesos u operaciones unitarias consideradas.

El mejor escenario está dado para aquellos proyectos que consideren el tratamiento de relaves frescos, pues estos ya contienen gran parte del agua que requerirán las operaciones de procesamiento. En estos casos, las pérdidas por evaporación, humedad de productos finales, purgas y/o fugas es lo más relevante, y para suplirlo se requiere *make-up* no superior a 0,1m3 de agua por tonelada de relave reprocesado. Inclusive, en este escenario

se podría dar un caso de superávit de agua industrial, si los relaves secundarios son desaguados de forma intensiva, para depositarlos en forma de pasta o filtrados.

En un proyecto donde se traten relaves antiguos, el requerimiento de *make-up* depende de varios factores, entre los que destacan el nivel de humedad y saturación del depósito antiguo, y la forma en la cual son desaguados los relaves secundarios antes de su disposición final.

El mínimo consumo hídrico posible ocurre cuando el depósito antiguo tiene una humedad media superior al 20% (con zonas internas saturadas) y su depósito considere el filtrado del relave final. En esa condición, las pérdidas por

GRÁFICO 3: Distribución porcentual del consumo de agua en la minería del cobre según origenFUENTE: Cochilco¹⁰.

evaporación, humedad de los productos, purgas y fugas, son lo más importante y es posible considerar un *make-up* en el rango de 0,1 a 0,2 m³ de agua por tonelada de relave reprocesado.

El caso intermedio considera algún grado de humedad del depósito de relaves –entre 10 y 20%– y un desaguado final en forma muy espesada o como pasta, con concentraciones entre 65% y 70% de sólidos en peso. En este caso, el *make-up* de agua alcanza un rango de 0,3 a 0,4 m³ agua por tonelada de relave reprocesado.

Finalmente, en el caso de depósitos de relaves antiguos muy secos –con

humedades entre 5 y 10%– y un desaguado final mediante espesamiento convencional, con pulpas entre 55% y 60% de sólidos en peso, el *make-up* de agua puede alcanzar valores entre 0,4 y 0,6 m³ de agua por tonelada de relave reprocesado.

Por otra parte, la fuente del agua es otro aspecto clave a considerar. En las últimas dos décadas, el origen del agua en la minería chilena ha migrado hacia el uso de agua de mar directa o tratada, en lugar de agua continental, ya sean de tipo superficial o subterránea, tal como se muestra en el Gráfico 3.

El uso de agua de mar, si no es desa-

lada, por lo general influye en los rendimientos de los procesos metalúrgicos, por ende, las pruebas experimentales deben ser realizadas con este insumo si será considerado como la fuente de suministro para un eventual proyecto.

Finalmente, si el flujo requerido de agua es pequeño, se puede considerar el transporte mediante camiones aljibe hacia un estanque cabeza que deberá ubicarse en las inmediaciones de la planta de reprocesamiento de relaves. Si el requerimiento es mayor a 3 l/s, la única solución es bombear el agua desde su origen hasta el lugar de consumo.

8.2 ELECTRICIDAD

Todas las operaciones llevan implícito un consumo de energía eléctrica.

Las operaciones de remoción y redistribución pueden o no consumir energía eléctrica, pero siempre en cantidades menores que la operación de procesamiento. Su requerimiento eléctrico dependerá del tipo de tratamiento que se vaya a aplicar al relave para extraer sus elementos de interés, y de las tecnologías que se empleen.

Para la remolienda de gruesos, los consumos específicos de energía fluctúan entre 3 a 6 kWh/t. Para la flotación convencional, lo hace entre 1,5 a 3 kWh/t.

Para otros procesos los consumos están estrechamente relacionados con las tecnologías, por ejemplo, el consumo de electricidad en una operación de lixiviación aumenta desde la modalidad en riego de pilas, lixiviación agitada y lixiviación a presión (autoclave).

En cuanto a la infraestructura para el suministro eléctrico, si el ritmo de reprocesamiento es reducido –por ejemplo, bajo 1.000 t/d– normalmente es viable que el suministro provenga desde grupos generadores arrendados para ese propósito.

Si el ritmo de toneladas es superior a

1.000 t/d, es imprescindible una conexión a la red nacional de suministro de energía, idealmente desde la S/E disponible más cercana y transportar la energía mediante postación en media tensión.

El costo del suministro de energía eléctrica en Chile tiende a disminuir con el tiempo. Hoy en día es posible contratar suministro de energía con valores entre 70 y 90 US\$/MWh. En un futuro cercano los precios pueden caer hasta 50 a 60 US\$/MWh, producto del fuerte incremento de generación eléctrica renovable mediante energía solar y eólica.

8.3 COMBUSTIBLES Y LUBRICANTES

Estos insumos son un suministro crítico en los casos de la remoción de relaves antiguos, debido a que las alternativas tecnológicas disponibles (equipos de carguío, camiones, dragas) son altamente demandantes de estos insumos.

El costo de combustible es muy variable en el tiempo y a nivel de usuario normalmente oscila entre 600 y 800 US\$/m³.

Como infraestructura, normalmente los proyectos deben contemplar un taller para los equipos móviles donde se realice el

cambio de aceites lubricantes y un adecuado manejo de los residuos. Para el carguío de combustible, lo usual es considerar las estaciones de servicios disponibles en carretera o dentro de las mismas faenas mineras.

8.4 REACTIVOS

Dependiendo del tipo de reprocesamiento que se aplique a los relaves, el abanico de reactivos es muy amplio. Dentro de los insumos más frecuentes se encuentran los siguientes:

- Reactivos de flotación (colectores y espumante)
- Cal (gruesa y fina)
- Floculantes para espesamiento
- Agentes lixiviantes (ácidos y/o alcalinos)

• Reactivos de extracción por solventes (extractantes y diluyentes)

La mayoría de estos reactivos son clasificados como sustancias peligrosas, y por ende, su transporte, almacenamiento, etiquetado y manejo debe contemplar los requisitos estipulados en la normativa vigente.

La infraestructura para los reactivos que son suministrados en forma líquida, normalmente, requiere de estanques de almacenamiento que tengan capacidad

equivalente para suministrar la planta de procesamiento por uno o más días, de modo de permitir el abastecimiento desde el exterior. En el caso de reactivos suministrados en forma sólida –que por lo general son diluidos antes de inyectarse al proceso– se requiere de bodegas de almacenamiento que cumplan con las exigencias de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente que permitan disponer de un inventario confiable.



Aspectos legales

9.1 MEDIO AMBIENTE

Cualquier proyecto está afecto al régimen jurídico nacional vigente en un determinado momento. Existe toda una estructura de leyes, decretos y reglamentos para asegurar la protección y cuidado del medio ambiente, los trabajadores y trabajadoras, así como las comunidades.

En lo que respecta al medio ambiente, y en particular al reprocesamiento de relaves, el marco regulatorio actual está constituido por lo siguiente:

- **Ley N°19.300. Ley sobre bases generales del medio ambiente.**

Establece las disposiciones que regulan el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental.

- **D.S. N°40 de 2012. Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental.**

Establece las disposiciones por las cuales se rige el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental y la Participación de la Comunidad en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, de conformidad con los preceptos de la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

- **D.S. N°132 de 2002. Reglamento de seguridad minera.**

El Decreto aprueba el reglamento que tiene como objetivo “proteger la vida e integridad física de las personas que se desempeñan en dicha industria y de aquellas que bajo circunstancias específicas y definidas están ligadas a ella”, así como también “proteger las instalaciones e infraestructura que hacen posible las operaciones mineras, por ende, la continuidad de sus procesos”.

- **D.S. N°248 de 2006. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.**

Es la normativa específica que aborda los relaves mineros, que se producen de las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas de molienda. El término relave se aplica también a la fracción sólida de la pulpa descrita precedentemente.

Esta norma otorga al Sernageomin atribuciones y facultades de control y fiscalización en esta materia, facultándolo para la aplicación de sanciones en caso de contravención al mismo y a las resoluciones que para su cumplimiento se dispongan, en conformidad al Reglamento de Seguridad Minera.

Este Decreto señala que se necesita una aprobación del Sernageomin para construir y operar cualquier depósito de desechos o relaves mineros. Cualquier modificación al proyecto aprobado durante la construcción u operación debe ser autorizada por este servicio público antes de su implementación.

Fija normas sobre:

- Procedimientos para la aprobación de los proyectos de depósitos de relaves mineros.
- Requisitos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves mineros, así como la disposición de sus obras anexas que garanticen la seguridad de las personas y de los bienes.

- **Ley N°20.551. Ley que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras.**

Establece la obligación de presentar y aprobar, en forma previa a su ejecución, un Plan de Cierre ante el Sernageomin de modo de asegurar la estabilidad física y química de las instalaciones y faenas, exigencia que es extensible a toda la industria extractiva minera, tanto existente como futura.

- **D.S. N°41 de 2012. Reglamento de la ley de cierre de faenas e instalaciones mineras.**

Establece las normas que regulan el cierre de faenas e instalaciones mineras, de conformidad con los preceptos de la

Ley N° 20.551, necesarios para la prevención y control de los riesgos sobre la vida, la salud y la seguridad de las personas y el medio ambiente, y que puedan derivarse del cese de las operaciones de las faenas e instalaciones mineras.

Complementa el marco regulatorio establecido en la Ley N° 20.551 para efectos de su implementación, sin perjuicio de otras normas especiales que se dicten respecto de la misma Ley.

Fija normas relativas a los procedimientos de aprobación de los planes de cierre de faenas e instalaciones mineras, y además materias establecidas en la Ley N° 20.551, que requieren ser reguladas en el presente Reglamento.

- **D.F.L N°1122. Código de aguas.**

Este código considera a las aguas como un bien social y, a la vez, como un bien económico. Separa la propiedad del agua del dominio de la tierra y le transfiere la prerrogativa al Estado de conceder los derechos de aprovechamiento de aguas a privados de forma gratuita y a perpetuidad, dando origen al mercado de las aguas.

Define el acceso al agua potable y saneamiento como un derecho humano esencial e irrenunciable que debe ser garantizado por el Estado.

- **D.S. 50 de 2015. Establece las condi-**

ciones técnicas que deberán cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas identificadas en el Artículo 294 del referido texto legal.

Este reglamento establece las condiciones técnicas que deben cumplirse en el proyecto, construcción y operación de las obras hidráulicas del art. 294 del Código de Aguas, entre los cuales se encuentran los depósitos cuyos relaves presentan una concentración de sólidos menor al 65% de concentración en peso.

- **D.S. N°148 de 2003. Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.**

Establece las condiciones sanitarias y de seguridad mínimas a que debe someterse la generación, tenencia, almacenamiento, transporte, tratamiento, reutilización, reciclaje, disposición final y otras formas de eliminación de los residuos peligrosos.

- **D.F.L N°725/1967. Código Sanitario.**

Rige todas las cuestiones relacionadas con el fomento, protección y recuperación de la salud de los habitantes de todo el país.

- **D.S. N°594 de 2000. Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo.**

Este reglamento establece las condiciones sanitarias y ambientales que se deben cumplir en todo lugar de trabajo,

además de los límites permisibles de exposición ambiental a agentes químicos, físicos y biológicos.

• **D.F.L. N° 3557 de 1980. Disposiciones sobre protección agrícola.**

Establece disposiciones sobre protección agrícola para establecimientos fabriles, mineros o cualquier otra entidad, obligándolos a tomar medidas tendientes a evitar o impedir la contaminación de la agricultura.

• **Ley N° 2.222 de 1978. Sustituye ley de navegación.**

El artículo 142 del decreto ley N° 2.222 ya considera una prohibición de derrame de residuos mineros en el mar, que es de carácter absoluta. Sin embargo, faculta a la autoridad marítima para autorizar el vertimiento de residuos cumpliendo ciertas condiciones.

• **Decreto N° 136 de 2011. Promulga el Protocolo de 1996 relativo al convenio sobre la prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias.**

Establece el convenio sobre la necesidad de proteger el medio marino y de fomentar el uso sostenible y la conservación de los recursos marinos.

• **D.S. N° 1 de 1992. Reglamento para el control de la contaminación acuática.**

Este reglamento establece el régimen de prevención, vigilancia y combate de la contaminación en las aguas del mar, puertos, ríos y lagos sometidos a la jurisdicción nacional.

En general, la reglamentación vigente en materia de relaves está enfocada en establecer los requisitos para los depósitos finales y el aseguramiento de su estabilidad física y química durante y posterior al cierre de las faenas mineras. Además, existen prohibiciones tácticas como las de no contaminar suelos de actividad agrícola y de no contaminar ríos, lagos y el mar. En consecuencia,

⁹ De acuerdo al Artículo 14 del D.S. 148, se considera que un residuo tendrá la característica de toxicidad extrínseca cuando su eliminación pueda dar origen a una o más sustancias tóxicas agudas o tóxicas crónicas en concentraciones que pongan en riesgo la salud de la población.

TENER PRESENTE



CONSIDERACIONES PARA EL INGRESO AL SEIA

En lo que respecta a la aprobación ambiental, todo proyecto de reprocesamiento de relaves a razón superior a 5.000 ton/mes, deberá ingresar al SEIA.

Para ello es importante que tenga analizado los siguientes aspectos claves para una adecuada calificación de los organismos estatales, y evitar la oposición de la ciudadanía, o que sus inquietudes sean atendibles en un tiempo de respuesta adecuado:

- En el caso de relaves antiguos, la remoción del depósito debe ser ejecutada en forma segura, sin afectar su estabilidad física, incluso en caso de ocurrir grandes tormentas o sismos de gran intensidad.

La remoción nunca puede provocar daño ambiental por derrames superficiales, generación excesiva de polvo, contaminación de la napa freática y otros.

Idealmente se debe presentar el método de explotación del yacimiento artificial, señalando al menos lo siguiente:

- Caracterización física y química del depósito.
- Identificación de la propiedad del depósito.
- Descripción de la operación de remoción y detalle de la flota (tipo y cantidad) de los equipos principales y de apoyo que serán utilizados, y dotación del personal (carga y cantidad).
- Identificación de los riesgos del método a emplear y medidas de mitigación a implementar.
- El reprocesamiento del relave debe minimizar el consumo de agua fresca y controlar la emisión de polvo, gases y derrames.

En la presentación del proyecto se debe señalar la(s) fuente(s) de origen del agua fresca y los procedimientos y/o instalaciones que permitirán capturar y tratar las emisiones y efluentes.

El manejo de insumos y productos clasificados como sustancias peligrosas debe contar con una adecuada infraestructura para su almacenamiento y gestión.

- El depósito final de los diferentes residuos debe ajustarse a la legislación vigente.

los relaves residuales que se generen del reprocesamiento de relaves frescos o antiguos, estarán regulados por todo lo anterior y, especialmente por el D.S. N° 248 y normativa de cierre de faenas (Ley 20.551 y D.S. N° 41).

La planta de reprocesamiento, por su parte, está regulada por el D.S. N° 132 y la normativa asociada al cierre de faenas (Ley 20.551 y D.S. N° 41).

Es importante destacar que la norma-

tiva actual clasifica los relaves y residuos de lixiviación como residuos mineros masivos y, por tanto, existen requisitos específicos de diseño, operación y cierre, los que deben ser considerados al presentar el proyecto a la autoridad.

En lo que respecta a la peligrosidad, los relaves son clasificados como residuos no peligrosos, no obstante, la autoridad podría solicitar demostrar que no presentan riesgo por toxicidad extrínseca⁹,

mediante la aplicación de pruebas de Lixiviación por Precipitación Sintética y cuyos efluentes no pueden exceder las concentraciones dictadas en el D.S. 148. Por lo general esta prueba se realiza aplicando el método 1312 de la EPA¹⁰, también conocido como SPLP (*Synthetic Precipitation Leaching Procedure*), la que generalmente se complementa con un ensayo TCLP (*Toxicity Characteristic Leaching Procedure*), aplicando el método 1311 de la EPA.

En Chile existen diferentes laboratorios autorizados por el Ministerio del Medio Ambiente para cumplir funciones de entidad técnica fiscalizadora ambiental (ETFA), y que son los más apropiados para la realización de pruebas SPLP. El costo unitario de esta prueba fluctúa entre 4 a 10 UF.

Finalmente, es importante destacar que el marco regulatorio está siempre sujeto a modificaciones.

Sin ir más lejos, a la fecha de emisión del presente manual, el Ministerio de Minería está ejecutando el Plan Nacional de Depósitos de Relaves (PNDR)¹¹. El objetivo de este plan es avanzar hacia una minería futura más segura con la población y sustentable ambientalmente, haciéndose también cargo del pasado de la minería, a través de la gestión sostenible de los PAM. Para alcanzar este objetivo, el plan se sustenta en tres pilares: seguridad de la población, medio ambiente, y economía circular e innovación. Cada uno de ellos tiene asociado un plan de acción específico, con distintos programas y herramientas para su desarrollo.

Dentro del plan de trabajo del eje de Economía Circular e Innovación, se proyecta modificar al ordenamiento jurídico para regular el reprocesamiento de relaves, para lo cual se considera una revisión y actualización del D.S. 248 y D.S. 132, y un proyecto de ley que regule el reprocesamiento en la Ley 20.551.



SABÍAS QUE...

El Sernageomin y el SEA han elaborado guías para orientar a los titulares, evaluadores y comunidad en general, en el cumplimiento de los requisitos y condiciones que establece la normativa legal.

Acá podrás ver las guías publicadas por ambos organismos:



<https://www.sernageomin.cl/mineria/>
<https://www.sea.gob.cl/documentacion/guias-evaluacion-impacto-ambiental>

¹⁰ Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

¹¹ <http://www.planderelaves.cl/>

¹² Artículo 6 de la Ley 18.248 "Código de la Minería".

¹³ Cortés, Alberto. Derechos sobre desmontes, escorias y relaves frente a las reglas de policía ambiental. Revista de Derecho Administrativo Económico, 2003.

9.2 PROPIEDAD

De acuerdo con la legislación vigente¹², los relaves son cosas accesorias del establecimiento de beneficio del que provienen, lo que significa que pertenecen a ese establecimiento, es decir, a la compañía minera que los ha generado.

En esta lógica, el dueño de los relaves no es el propietario de la concesión minera del yacimiento que generó los relaves. El dueño de los relaves es el propietario o arrendatario de la faena que los generó y por ende puede disponer de ellos como cualquier otro bien.

En la misma Ley 18.248 Código de la Minería, se indica que una vez extinguida la pertenencia, o abandonado del establecimiento, podrá constituirse concesión sobre las sustancias minerales concesibles que los relaves contengan. Mientras que en la Ley 18.097 de Concesiones Mineras se indica que son susceptibles de concesión minera, las sustancias minerales contenidas en relaves, abandonadas por su dueño.

RELAVES ABANDONADOS

De acuerdo con un análisis, desde el punto de vista legal¹³, en el caso de los relaves abandonados, se deben considerar los siguientes aspectos claves:

• **Abandono del establecimiento y abandono del residuo**

Se debe resolver si la ley se está refiriendo a abandono de la planta de beneficio que generó los relaves o al abandono del relave mismo.

Existirán casos sencillos, donde se abandona toda la faena minera, planta

de beneficio más relaves, caso en el que los relaves son susceptibles de concesión. Sin embargo, podría haber casos donde la planta continúa operando y los relaves se encuentran en una situación de abandono. Si este último es el escenario, el depósito abandonado es susceptible a concesión independiente que la planta que los generó esté aún operativa.

• Sentido de abandono

Este punto es complejo y la doctrina del derecho de la minería ha entendido que cuando la ley se refiere a abandono del relave, consiste en la desafectación, dejación del dueño del relave sin dejar un signo visible sobre la ocupación del mismo.

Un ejemplo sencillo de entender, son aquellos relaves que antiguamente fueron vertidos a orillas de ríos u bordes costeros y que hoy se encuentran en clasificados como PAM.

• Situación del terreno sobre el cual están los relaves

Según la ley, los relaves no pueden ser susceptibles a concesión si se encuentra sobre un terreno cubierto por una concesión minera. Los relaves deben estar sobre "terreno abiertos y francos".¹⁴

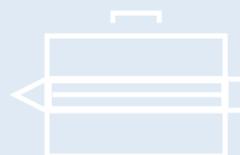
• Obligaciones sobre los residuos

Una nueva concesión sobre los relaves abandonados, implicará para el beneficiario derecho exclusivo para el aprovechamiento de estos, debiendo asumir las obligaciones sobre los residuos mineros que se generen.

¹⁴ Artículo 6 de la Ley 18.248 "Código de la Minería".

RESUMEN

Aspectos legales



- Cualquier proyecto minero debe considerar el régimen jurídico nacional, que busca asegurar la protección y cuidado del medio ambiente, de los trabajadores y trabajadoras, así como de las comunidades.

- En general, la reglamentación vigente en materia de relaves se enfoca en establecer los requisitos para los depósitos finales y el aseguramiento de su estabilidad física y química durante y posterior al cierre de las faenas mineras. Los relaves residuales que se generen del reprocesamiento están regulados principalmente por el D.S. N°248 y la normativa asociada al cierre de faenas (Ley 20.551 y D.S. N°41). Se deben considerar normas que incluyen prohibiciones tácitas como no contaminar suelos de actividad agrícola, los ríos o el mar.

- Las plantas de reprocesamiento estarán reguladas principalmente por el D.S. N°132 y normativa asociada al cierre de faenas (Ley 20.551 y D.S. N°41).

- El Ministerio de Minería está ejecutando el Plan Nacional de Relaves, en cuyos ejes de trabajo se considera modificar el ordenamiento jurídico para regular el reprocesamiento de relaves.

- Es posible señalar que el dueño de los relaves es el propietario o arrendatario de la faena que los generó y, por ende, puede disponer de ellos como cualquier otro bien. Además, las sustancias minerales contenidas en relaves abandonados por su dueño son susceptibles de concesión minera.



Relación con las comunidades

Como cualquier proyecto minero, la recuperación de valor desde relaves debe considerar las características específicas del territorio y la presencia de comunidades.

Por sus características, deberá someterse a evaluación ambiental a través de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). No obstante, adicional al cumplimiento de la legislación, es recomendable contar con un diagnóstico socio ambiental que levante riesgos y oportunidades específicas para el proyecto.

La experiencia y las políticas de desarrollo de proyectos sustentables recomiendan el relacionamiento temprano con las comunidades y la participación ciudadana anticipada (PACA). Las recomendaciones se fundamentan en el derecho de las comunidades a estar informados oportunamente del proyecto, comprendiendo sus impactos y expresando sus opiniones, dudas, temores y sugerencias.

Considerando que el reprocesamiento de relaves constituye la remediación de un pasivo ambiental, que ha afectado a las comunidades y su entorno, es esperable una recepción favorable. El desafío, sin embargo, es que la remediación no cause impactos adicionales o estos sean debidamente compensados.

En términos prácticos, se debe obtener la Licencia Social para Operar (LSO) de todo el sistema de manejo de relaves (remoción, retratamiento, redepósito). La LSO es la percepción de la sociedad sobre qué tan bueno es para ellos y su entorno la realización de un proyecto específico y se refiere a la aprobación o rechazo de la comunidad y otros grupos de interés a un proyecto o empresa.

Algunos aspectos relevantes a la hora de obtener y mantener la LSO son:

- **Aspectos ambientales:** Evitar molestias innecesarias a los vecinos, en cuanto a impactos de la operación en materia de emisiones (generación de polvo, congestión vehicular) RILes, (derrames) RISes (generación de basura en campamentos provisorios), entre otros.

- **Externalidades positivas:** Publicitar adecuadamente la conveniencia del proyecto, sobre todo cuando se remueva un depósito en calidad de PAM que pudiese significar un riesgo ecológico y/o a las personas. Favorecer la contratación y capacitación de personas locales para las etapas de construcción y operación.

- **Seguridad:** Transmitir a la comunidad las medidas de seguridad de la operación, sobre todo cuando se remueva un depósito antiguo, informando las medidas preventivas para mitigar riesgos operacionales o de origen climático.

11

Análisis de riesgos y oportunidades

11.1

RIESGOS DE LA NATURALEZA

En general las empresas mineras y de consultoría emplean diferentes metodologías para analizar riesgos y oportunidades, y definen sus propios planes de mitigación y acción en función de sus políticas internas y presupuestos.

Cualquiera sea el método de evaluación, entre los principales riesgos y oportunidades que un proyecto de reprocesamiento de relaves debiese considerar, están los siguientes.

- Terremoto de alta intensidad y/o maremoto que puedan afectar las instalaciones.
- Lluvias intensas que generan aluviones, inundaciones o socavaciones sobre las instalaciones.
- Tormentas eléctricas que afectan las instalaciones y/o a las personas.
- Avalanchas de nieve sobre campamentos, instalaciones de faena, instalaciones industriales, etc.
- Deslizamientos de terreno que afectan las instalaciones (reptación, asentamientos, caída de rocas, etc.).
- Fuertes vendavales que afectan las instalaciones.
- Deshielos rápidos y/o no monitoreados que provocan crecidas o aluviones sobre las instalaciones.
- Sequía extrema que restringe los derechos hídricos con los que cuenta el proceso industrial.



11.2

RIESGOS DEL NEGOCIO

- La remoción debe ser planificada de modo que nunca se deteriore la estabilidad del mismo, y que en cualquier nivel de avance del proceso se pueda soportar sismos severos y temporales intensos. Lo anterior implica asegurar la estabilidad del material al interior del depósito antes de remover los muros perimetrales.

- El transporte del material removido, ya sea por camión o tuberías, debe ser realizado sin provocar impacto ambiental ni social, vale decir sin congestión de camino, generación de polvos ni derrames de pulpa. El riesgo de provocar un daño ecológico relevante podría generar la crispación de los vecinos afectados y la empresa podría llegar incluso a perder la LSO. La mitigación más conveniente es la operación impecable en el transporte de relaves removidos (sin polvo ni derrames ni congestión ni accidentes).

- La construcción de la planta de retratamiento debe ser realizada de acuerdo a la reglamentación vigente y las buenas prácticas de la ingeniería. En especial se debe precaver que no tenga derrames al medio ambiente, no generar polvo, ruidos ni malos olores que pudieran molestar a los vecinos. La operación debe ser impecable para evitar molestias que pudiesen arriesgar perder la LSO por vecinos crispados que impidan la operación de dicha planta.

- El abastecimiento de agua debe estar garantizado, ya sea comprando derechos de terceros, aprovechando los excedentes durante las precipitaciones o las acumulaciones de aguas al interior de minas abandonadas. La extracción de

aguas desde napas freáticas en zonas agrícolas, puede ser foco de conflictos, así como la utilización de aguas saladas o provenientes de plantas sanitarias. La operación debe considerar siempre el mínimo consumo de agua fresca que sea posible, maximizando la recirculación de aguas de proceso, y evitando a todo evento el descarte de aguas de proceso contaminadas al medio ambiente (siempre debe primar el concepto de cero descartes).

- La depositación de relaves, residuos de lixiviación y otros residuos debe ser realizada en forma acorde a la legislación y regulaciones vigentes. Especial atención debe darse a que los nuevos depósitos sean estables y puedan soportar sismos, lluvias o tormentas de gran intensidad. Igualmente se debe precaver que el relave depositado no provoque contaminación de las aguas subterráneas, dando preferencia a depósitos de pasta o filtrados.

- Prever problemas de gestión, con aumento del Capex por sobre lo estimado o comprometido, incumplimiento del programa de implementación, retrasos en las ingenierías y/o en la tramitación de permisos, ingenierías incompletas, cambios de alcances y/o estrategias de desarrollo.

- Evitar falta de información o errores graves en la captura de datos de entrada para desarrollar los diseños o considerar tecnologías no probadas. El desarrollo minero en Chile es de larga data y se debe aprovechar todo el conocimiento extrapolable de la minería primaria hacia la minería secundaria.

- Contar con un Plan Minero de extracción de relaves, bien conceptualizado y/o estimado. Por ello es clave que los organismos competentes definan los requisitos para una adecuada caracterización de recursos y reservas cuando se trata de yacimientos antropogénicos como los depósitos de relaves antiguos.

- Evitar problemas durante la ejecución del proyecto, tales como:

- Adjudicación de obras a un contratista con poca experiencia y con debilidades de personal y/o maquinaria.

- Inconvenientes durante las compras, tales como falta de stock, plazos de entrega y costos del proveedor superiores a los considerados en la Capex del proyecto.

- Problemas durante la construcción, tales como logística con el contratista de construcción, condiciones del sitio adversas o accesibilidad compleja, empal-

...(continuación)

mes o conexiones (*tie-in*) complejas, necesidad de obras especiales de construcción, accidente grave o fatal, hallazgo arqueológico, disputas territoriales o de servidumbres, para el paso de caminos y/o instalaciones para el transporte de pulpas mineras.

- Retraso en la gestión de los permisos correspondientes y/o problemas con las autorizaciones por parte de la autoridad.
- Existencia de compromisos ambientales anteriores que obligan a modificar el proyecto o a realizar otras inversiones no consideradas inicialmente.
- Fuerte oposición de la comunidad y/o de las autoridades a que se materialice el proyecto.
- Condición de mercado desfavorable que afectan las promesas, ingresos y evaluación económica del proyecto.
- Cambios normativos que afectan las autorizaciones necesarias para desarrollar el proyecto.

11.3 OPORTUNIDADES

- La remoción de un depósito de relaves antiguo evita la contaminación por erosión eólica a su entorno, mejorando la calidad de los suelos agrícolas cercanos y la calidad de vida de los lugareños.
- La superficie donde se había depositado el relave, al quedar disponible, puede ser utilizada para otros propósitos (habitacional, agrícola, industrial). Siempre y cuando se verifique que la calidad del terreno disponible puede dársele el uso deseado.
- El retratamiento de relaves siempre considera la recuperación de las especies valiosas habituales (Cu, Mo, Ag, Au), existiendo además la opción

de recuperar otras especies (Fe magnético, Co, REE, fosfatos, entre otros). La empresa debe evaluar la máxima recuperación de especies valiosas, tanto las tradicionales como las no tradicionales en la minería chilena.

- La remoción de depósito permite mejorar el paisaje de algunas localidades, lo que debe ser adecuadamente resaltado frente a los vecinos y autoridades.
- La mano de obra local de los primeros proyectos se especializan en minería secundaria, pudiendo migrar más tarde hacia faenas mineras que tengan mejor nivel de remuneraciones.

RESUMEN

Análisis de riesgos y oportunidades

En general las empresas mineras y de consultoría emplean diferentes metodologías para analizar riesgos y oportunidades, y definen sus propios planes de mitigación y acción en función de sus políticas internas y presupuestos.



RIESGOS DEL NEGOCIO: Estabilidad de los depósitos, impacto ambiental del transporte del material, cumplimiento de normativa de construcción y funcionamiento de la planta, acceso y uso adecuado del agua, aspectos de gestión, correcta captura de datos de entrada, adecuada extrapolación de experiencias, elaboración de un plan bien conceptualizado, calidad de contratistas e insumos, gestión de permisos, relación con la comunidad, cumplimiento de normas ambientales y condiciones de mercado.

Oportunidades



La remoción de un depósito de relave antiguo evita la contaminación por erosión eólica de su entorno, mejorando la calidad de vida y de suelos agrícolas.



Al recuperarse la superficie previa al depósito del relave, esta puede reutilizarse para otros propósitos.



Recuperar la mayor cantidad de especies valiosas tradicionales y no tradicionales en la minería nacional.

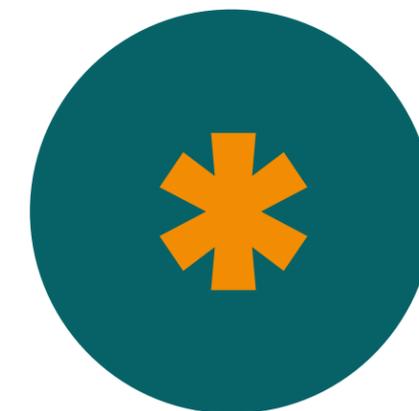


Contribuir con mejoras en el paisaje.



Alcanzar un potencial de aprendizaje de mano de obra local en minería secundaria que posteriormente podría migrar a la minería primaria.

Glosario



Cierre: Cese de la operación del depósito de relaves por un plazo mayor de dos (2) años; en forma definitiva; o cuando se da por terminada su vida útil y se han efectuado las acciones tendientes a asegurar la obra en el tiempo¹⁵.

Depósito de Relaves: Toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales. Además, contempla sus obras anexas. Su función principal es la de servir como depósito, generalmente, definitivo de los materiales sólidos proveniente del relave transportado desde la planta, permitiendo así la recuperación, en gran medida, del agua que transporta dichos sólidos¹⁶.

Minería Secundaria: Corresponde a la explotación y procesamiento de residuos mineros para recuperar menas remanentes con valor económico. La Minería Secundaria se enmarca en la Economía Circular, pues sigue uno de los principios claves: reutilización o reciclado de residuos.

Muestra (representativa): Corresponde a un subconjunto de un conjunto mayor, de un tamaño suficiente para representar las propiedades del conjunto mayor.

Pasivo Ambiental Minero: En la literatura se encuentra más de una definición para este concepto. En este docu-

mento se empleará el término definido por Sernageomin en múltiples publicaciones: "faena minera, abandonada o paralizada, incluyendo sus residuos, que constituye un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente".

Relave: Suspensión de sólidos en líquidos, formando una pulpa, que se generan y desechan en las plantas de concentración húmeda de especies minerales que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina. El término también se aplica a la fracción sólida de la pulpa descrita anteriormente¹⁷.

Residuos Mineros Masivos: Corresponden a los residuos generados en las operaciones de extracción, beneficio o procesamiento de minerales: a) estériles; b) minerales de baja ley; c) residuos de minerales tratados por lixiviación; d) los relaves; e) escorias¹⁸.

Tierras Raras: Las tierras raras o elementos de tierras raras, en inglés *Rare Earth Elements* (REE), es la denominación que se le da al grupo de los 15 elementos de la tabla periódica conocidos como lantánidos (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) además del escandio (Sc) y el itrio (Y), ambos con propiedades físico-químicas similares a los lantánidos.

Estos elementos suelen encontrarse en minerales como fosfatos, fluoruros y silicatos. La palabra "rara" se debe a que no se encuentran como metal nativo si no como parte de un mineral, lo que hace que su recuperación sea un proceso tecnológico complejo.

Tierras Raras Livianas: Las REE se clasifican según su abundancia: las que tienen menor número atómico (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Sc) son generalmente más abundantes, denominándose tierras raras livianas, en inglés *Light Rare Earth Elements* (LREE).

Tierras Raras Pesadas: En contraste a las LREE, el grupo de elementos menos abundante son los de mayor número atómico (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y), denominándose tierras raras pesadas, en inglés *Heavy Rare Earth Elements* (HREE).

Yacimiento antropogénico o artificial: Depósito de minerales procedente de la actividad humana. Un depósito de relave se puede definir como un yacimiento antropogénico o artificial, generado a partir de minerales que han sido explotados para concentrar vía flotación uno o más elementos abundantes en Chile, tales como Cu, Mo, Au, Ag y Fe. La exploración y explotación de un yacimiento geológico es muy diferente a la de un yacimiento antropogénico, aunque en ambos casos los productos a extraer sean minerales.

Yacimiento geológico (de minerales): Depósito de minerales presentes en la corteza terrestre, acumulados a raíz de procesos geológicos.

¹⁵ Decreto 248 Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.

¹⁶ Ibídem.

¹⁷ Ibídem.

¹⁸ Decreto 148 Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos



Abreviaturas

CAPEX: Capital Expenditure (Costos de Capita)

Corfo: Corporación de Fomento de la Producción

Cochilco: Comisión Chilena del Cobre

D.F.L.: Decreto con Fuerza de Ley

D.S.: Decreto Supremo

Eh: Potencial de Óxido Reducción

EW: Electrowinning (Electro-obtención)

GE: Gravedad Específica

HREE: Heavy Rare Earth Elements (Tierras Raras Pesadas)

I+D: Investigación y Desarrollo

LREE: Light Rare Earth Elements (Tierras Raras Livianas)

OPEX: Opex Expenditure (Costos de Operació)

PAM: Pasivo Ambiental Minero

P₈₀: Tamaño de tamiz que deja pasar 80% de las partículas de un conjunto

pH: Potencial Hidrógeno

PLS: Pregnant Leaching Solution (Solución de lixiviación cargada)

REE: Rare Earth Elements (Tierras Raras)

RMM: Residuos Mineros Masivos

SEA: Servicio de Evaluación Ambiental

SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental

Sernageomin: Servicio Nacional de Geología y Minería

SX: Solvent Extraction (Extracción por Solventes)

TRL: Technology Readiness Levels (Nivel de Madurez Tecnológica)

TIR: Tasa Interna de Retorno

Ty: Tyler (malla o tamiz)

VAN: Valor Actualizado Neto



Tabla Periódica

SIMBOLOGÍA:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1 H Hidrógeno 1.007.10091	2 He Helio 4.003	3 Li Litio 6.941	4 Be Berilio 9.012	5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.011	7 N Nitrógeno 14.007	8 O Oxígeno 15.999	9 F Flúor 18.998	10 Ne Neón 20.180	11 Na Sodio 22.990	12 Mg Magnesio 24.305	13 Al Aluminio 26.982	14 Si Silicio 28.086	15 P Fósforo 30.974	16 S Azufre 32.065	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argón 39.948	19 K Potasio 39.098	20 Ca Calcio 40.078
21 Sc Escandio 44.956	22 Ti Titanio 47.883	23 V Vanadio 50.942	24 Cr Cromo 52.004	25 Mn Manganeso 54.938	26 Fe Hierro 55.845	27 Co Cobalto 58.933	28 Ni Níquel 58.693	29 Cu Cobre 63.546	30 Zn Zinc 65.380	31 Ga Galio 69.723	32 Ge Germanio 72.630	33 As Arsénico 74.922	34 Se Selenio 78.960	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Kriptón 83.800	37 Rb Rubidio 85.468	38 Sr Estroncio 87.62	39 Y Ytrio 88.906	40 Zr Zirconio 91.224
41 Nb Níobio 92.906	42 Mo Molibdeno 95.940	43 Tc Tecnecio 98.906	44 Ru Rutenio 101.07	45 Rh Rodio 102.905	46 Pd Paladio 106.42	47 Ag Plata 107.868	48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Estanho 118.710	51 Sb Antimonio 121.757	52 Te Telurio 127.6	53 I Yodo 126.905	54 Xe Xenón 131.29	55 Cs Cesio 132.905	56 Ba Bario 137.327	57-71 Lantánidos	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tántalo 180.948	74 W Wolframio 183.84
75 Re Renio 186.207	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.222	78 Pt Platino 195.084	79 Au Oro 196.967	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Talio 204.387	82 Pb Plomo 207.2	83 Bi Bismuto 208.980	84 Po Polonio 209	85 At Astatio 210	86 Rn Radón 222	87 Fr Francio 223	88 Ra Radio 226	89-103 Actínidos	104 Rf Rutherfordio 261	105 Db Dubnio 262	106 Sg Seaborgio 263	107 Bh Bohrio 264	108 Hs Hasio 265
109 Mt Meitnerio 268	110 Ds Darmstadtio 271	111 Rg Roentgenio 272	112 Cn Copernicio 285	113 Nh Nihonio 284	114 Fl Flerovio 289	115 Mc Moscovio 288	116 Lv Livermorio 293	117 Ts Tennessio 289	118 Og Oganesson 294	119 Uu Ununnonio 290	120 Uub Unbinunio 291	121 Uut Untrienio 292	122 Uuq Unquencio 293	123 Uuq Unquencio 293	124 Uup Unpentonio 294	125 Uuq Unquencio 293	126 Uuh Unheptonio 294	127 Uuq Unquencio 293	128 Uuq Unquencio 293
129 Uuq Unquencio 293	130 Uuq Unquencio 293	131 Uuq Unquencio 293	132 Uuq Unquencio 293	133 Uuq Unquencio 293	134 Uuq Unquencio 293	135 Uuq Unquencio 293	136 Uuq Unquencio 293	137 Uuq Unquencio 293	138 Uuq Unquencio 293	139 Uuq Unquencio 293	140 Uuq Unquencio 293	141 Uuq Unquencio 293	142 Uuq Unquencio 293	143 Uuq Unquencio 293	144 Uuq Unquencio 293	145 Uuq Unquencio 293	146 Uuq Unquencio 293	147 Uuq Unquencio 293	148 Uuq Unquencio 293



Tranque El Mauro, Minera Los Pelambres. FUENTE: Gentileza de Antofagasta Minerals.

Proyecto apoyado por

