



Estado Actual de la Hidrometalurgia de Cobre en Chile

DEPP 25/2023

Resumen Ejecutivo

En 1990 casi la totalidad del cobre chileno exportado era cobre metálico. Sin embargo, actualmente cerca del 70% se exporta como concentrados y, de acuerdo a proyecciones de Cochilco, la producción de concentrados de cobre a partir de la próxima década sería de cerca del 94% del total de la producción de cobre de Chile.

Ello se explica porque las operaciones mineras en Chile están afectadas por temas estructurales; agotamiento de los minerales oxidados y los sulfuros secundarios. Los sulfuros primarios son tratados por procesos pirometalúrgicos debido a que aún no se desarrolla a escala competitiva una tecnología hidrometalúrgica para la recuperación de cobre desde minerales sulfurados primarios.

Chile y la República Democrática del Congo son los principales productores mundiales de cátodos SxEw, representando entre ambos casi un 70 % de la producción mundial. Al 2034, la participación de ambos países caería a un 47% lo que implicará una disminución del 11% de la producción mundial respecto de la producción actual.

En Chile las dos grandes líneas de producción de cobre son: el procesamiento de minerales sulfurados primarios (los cuales siguen una línea de producción de flotación y concentración) que utilizan métodos pirometalúrgicos y, por otro lado, los minerales oxidados y sulfuros secundarios o de baja ley, que siguen una línea de lixiviación o de hidrometalurgia para la obtención de cátodos de cobre.

La pirometalurgia ha existido desde la prehistoria, desde el principio de la metalurgia del cobre y sigue vigente para el tratamiento de sulfuros y concentrados de cobre debido a su alta cinética y, que en el cobre blister y en el anódico están contenidos los metales nobles y muchos otros elementos que se recuperan desde los barros anódicos.

En tanto, los métodos hidrometalúrgicos han resultado ser exitosos en minerales oxidados y sulfuros secundarios. Estos métodos tienen ventajas de menores costos de inversión y de operación por unidad de cobre, entre ellos menor consumo de agua y de energía, por tanto más competitivo en aspectos ambientales y, por la posibilidad de un desarrollo modular.

Debido a temas mineralógicos estructurales que enfrenta Chile, la producción de cátodos SX/EW que hoy se obtienen a partir de la hidrometalurgia, en gran parte será reemplazado por producción de concentrado de cobre, por lo que se estima necesario buscar soluciones alternativas de procesamiento de minerales sulfurados primarios y de los concentrados, conjuntamente con estudiar las posibilidades de aumentar la capacidad de fundición país.

Chile tiene ventajas para investigar nuevas soluciones tecnológicas, ya que probablemente posee la mayor experiencia del mundo en lixiviación en pilas y botaderos, y al mismo tiempo, cuenta con capacidades importantes de instalaciones de SX/EW.

El principal obstáculo para utilizar hidrometalurgia en sulfuros primarios y concentrados, es el contenido de calcopirita. Desde hace más de cincuenta años se busca a nivel mundial la lixiviación de la calcopirita, pero hasta ahora sin éxito comercial.

En nuestro país ha habido avances en la lixiviación con soluciones cloruradas de minerales de baja ley (incluyendo aplicaciones industriales). En 2001, Minera Michilla inicia el uso de

soluciones clorurada para la lixiviación de sulfuros, con una alta recuperación del cobre de los sulfuros secundarios. En la actualidad esta tecnología es aplicada en otras faenas, continuando con investigación de su uso para lixiviar sulfuros primarios.

Agradecemos al Sr. Fernando Pino, Ingeniero Civil en Minas de la Universidad de Chile, quien generosamente compartió sus conocimientos y colaboró con comentarios en la elaboración del presente informe.

Tabla de contenido

Resumen Ejecutivo	1
Introducción	4
1. Estado actual hidrometalurgia en Chile	6
2.1 Situación actual	6
2.2 Perspectivas futuras	7
2.3 Chile frente al resto del mundo	8
3 Principales tecnologías en hidrometalurgia	11
3.1 Hidrometalurgia convencional	11
3.1.1 Etapas de hidrometalurgia convencional	11
3.1.2 Tipos de Lixiviación según contacto con mineral	12
3.1.3 Lixiviación medio cloruro	14
3.1.4 Biolixiviación	15
3.2 Lixiviación de sulfuros primarios y concentrados de cobre	15
3.2.1 Hidrometalurgia en concentrados de cobre	16
3.2.2 Investigación chilena en lixiviación de sulfuros primarios en minerales y en concentrados	19
4 Comentarios Finales	23
5 Anexos	24
6 Referencias	26

Índice de Figuras

Figura 1: Secuencia típica de minerales en los yacimientos de cobre	4
Figura 2: Procesos productivo de la minería del cobre	5
Figura 4: Producción real y proyectada de cobre en Chile por tipo de producto	8
Figura 5: % de Producción por tipo de Producto 2022. Chile vs Resto del Mundo	8
Figura 6: % de Producción esperado por tipo de Producto. Chile vs Resto del Mundo	9
Figura 7: Etapas de una hidrometalurgia convencional	12
Figura 8: Tipos de Lixiviación según contacto con mineral	14
Figura 9: Aplicación tecnología Biocobre en minera Pucobre	20
Figura 10: Procesos de tecnología Biocobre	21
Figura 11: Cronología desarrollo de tecnología Biocobre	22

Introducción

En los yacimientos de cobre se distinguen normalmente cuatro zonas, desde la superficie hacia la profundidad: zona estéril, minerales oxidados, sulfuros secundarios y sulfuros primarios.

Figura 1: Secuencia típica de minerales en los yacimientos de cobre



- La parte superior de los yacimientos suele ser estéril y se acostumbra a llamarla “sombbrero de fierro” o sobrecarga.
- Para llegar a la zona mineralizada se realiza el “pre-stripping”, extrayendo el estéril.
- A continuación, están los minerales oxidados, que para extraer el cobre se lixivian (se disuelven).
- Luego viene la zona de enriquecimiento, con los sulfuros secundarios, que se pueden lixiviar o concentrar.
- Finalmente los sulfuros primarios, que se concentran.

Fuente: Presentación “Exportar o Fundir nuestros concentrados”, Fernando Pino al Comité Ética del IIMCH, noviembre 2023.

Según sea la mineralogía es el proceso para extraer el cobre. Es así como en Chile se identifican dos líneas de producción de cobre de acuerdo con el mineral procesado. Primero, se identifica el procesamiento de minerales sulfurados primarios, los cuales siguen una línea de producción de flotación y concentración. Por otro lado, los minerales oxidados, y sulfuros secundarios o de baja ley, que siguen una línea de lixiviación o de hidrometalurgia para la obtención de cobre.

En la Figura 2 (primera fila) se muestran los principales procesos productivos para los sulfuros primarios (especialmente calcopirita y bornita) que son: extracción mina, chancado-molienda-concentración por flotación y tratamiento pirometalúrgico-electro refinación. Los residuos son los relaves, las escorias y los gases de las fundiciones que deben ser tratados para eliminar el 95% de los contaminantes definidos en el D.S.N° 28.

En la misma figura (segunda fila) se detallan los principales procesos involucrados en la extracción de cobre desde minerales oxidados y sulfuros secundarios: extracción mina, lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

Figura 2: Procesos productivo de la minería del cobre



* Pregnant Leach Solution (PLS)

Fuente: Informe Consumo de Energía en la minería del cobre chilena al 2022, Cochilco, 2023

En relación con los minerales oxidados, dada su alta cinética, el proceso normal es la lixiviación química (se disuelven) con soluciones de ácido sulfúrico (hidrometalurgia). En tanto los sulfuros se concentran por flotación y el producto es un concentrado que sigue la línea pirometalúrgica. Por ambos caminos el producto final es un cátodo; electro obtenido en la hidrometalurgia y electro refinado en la pirometalurgia. En el caso de los sulfuros secundarios se puede usar la concentración o la biolixiviación.

En Chile¹, Chuquicamata usó la lixiviación en bateas de mineral chancado y electroobtenido, procesos que emergieron a principios del siglo XX. Para minerales oxidados de mayor ley se usó la lixiviación por agitación de mineral molido, seguido por CCD (counter current decantation) para la separación sólido-líquido, y EW o cementación con chatarra de hierro.

Uno de los saltos tecnológicos más importantes fue el uso de la extracción por solventes (SX), una tecnología desarrollada para la extracción del uranio en el tratamiento de minerales de cobre de muy baja ley en botaderos y en pilas en Estados Unidos. A partir de los años 80's la tecnología fue aplicada en Chile permitiendo al país aprovechar grandes reservas existentes de minerales oxidados y participar activamente en la producción de cobre fino a un costo de inversión y operación competitivos. El procesos es la lixiviación / extracción por solventes y electroobtención (LX/SX/EW), con mineral chancado en la lixiviación en pilas y ROM (run of mine) en los botaderos.

También en Estados Unidos se desarrolló la lixiviación bacteriana de sulfuros secundarios a nivel de laboratorio y piloto, pero el primer desarrollo a nivel industrial fue en Lo Aguirre a través de lixiviación en capas delgadas (TL). Posteriormente, Chile desarrolló a gran escala el potencial hidrometalúrgico de minerales sulfurados secundarios como parte de los tratamientos alternativos de sulfuros. A inicios de la década de los '80 comenzó un gran desarrollo de la lixiviación bacteriana en pilas y en botadero², lo que permite procesar los sulfuros secundarios (calcosina y covelina). Es así como la producción de cobre

¹ La historia de desarrollo de hidrometalurgia en Chile ha sido extraída del relato de Fernando Pino, consultor

² Los botaderos son lugares especialmente destinados para recibir el material estéril de la mina a rajo abierto y de los ripios que se obtienen en las pilas de lixiviación dinámica

hidrometalúrgico que tuvo Chile en los años '90 se basó en los procesos de lixiviación en pilas o en botaderos/SX/EW de minerales oxidados y sulfuros secundarios y, en paralelo, se inicia la construcción de grandes proyectos de plantas concentradoras como el de las mineras Collahuasi y Escondida.

En tanto, en los últimos años se ha estado desarrollando la lixiviación con soluciones cloruradas, las que han reemplazado la biolixiviación de sulfuros secundarios.

En Chile se han ido profundizando los yacimientos, por tanto, agotando los minerales oxidados y los sulfuros secundarios. Los yacimientos más profundos implican mayor proporción de sulfuros primarios, los cuales son tratados por procesos pirometalúrgicos ya que aún no se genera a una escala competitiva una línea hidrometalúrgica para la recuperación de cobre desde los minerales sulfurados primarios, siendo hoy una materia de numerosas investigaciones debido a las ventajas que presenta este proceso.

En este contexto, se busca recopilar la mayor cantidad de información al respecto y así reconocer las oportunidades y desafíos que enfrentará la minería del cobre a futuro en Chile.

1. Estado actual hidrometalurgia en Chile

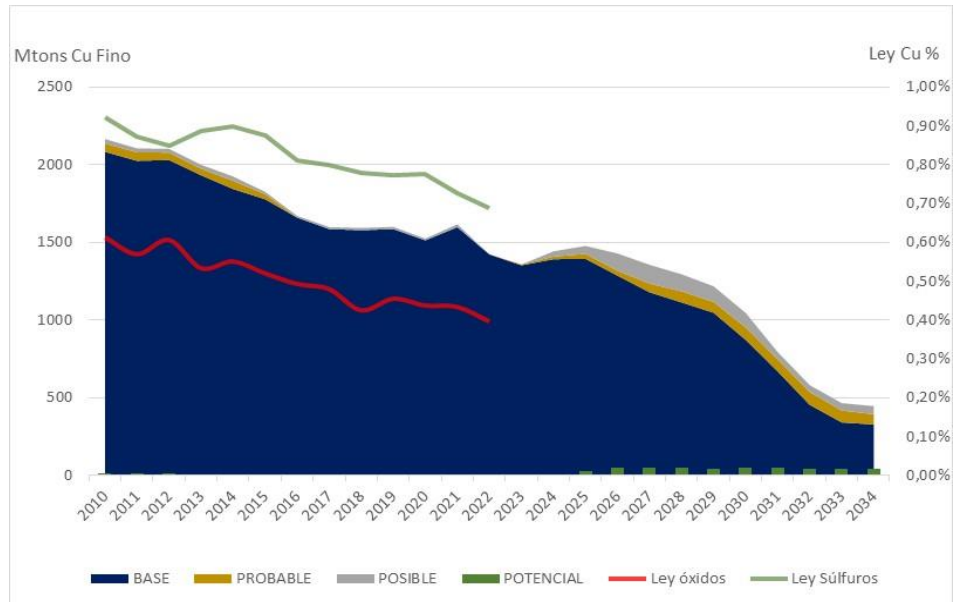
2.1 Situación actual

La hidrometalurgia ha tenido un rol relevante en el desarrollo minero de Chile. Sin embargo, progresivamente se han ido agotando los minerales oxidados y los sulfuros secundarios debido a la antigüedad de algunas operaciones, lo que implica tratar una mayor proporción de sulfuros primarios, lo que actualmente se realiza por procesos pirometalúrgicos.

Por tanto, ha habido una disminución de producción de cátodos Sx-Ew debido principalmente al agotamiento de recursos lixiviables y al cierre de operaciones hidrometalúrgicas de algunas faenas de cobre previsto para los próximos años, lo que dejaría en desuso una amplia capacidad instalada para la lixiviación de minerales.

La producción hidrometalúrgica en Chile en los últimos 10 años ha tenido una participación promedio de casi un 30% en la producción total, desde representar casi un 40% el año 2009. Hacia el año 2034, la participación de este tipo de proceso descendería a un 6,3%.

Figura 3: Producción esperada SxEw vs Ley óxidos-Chile



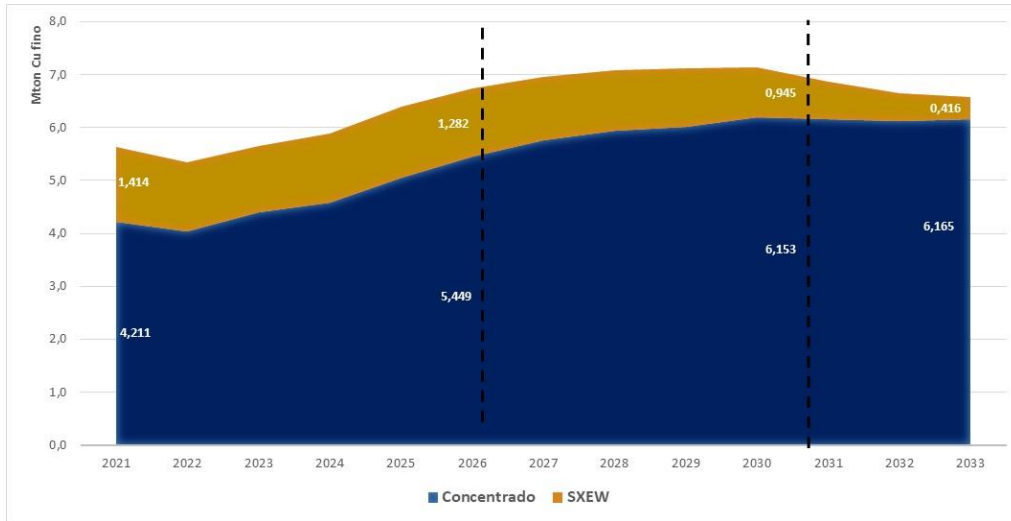
Fuente: Cochilco

Las principales operaciones hidrometalúrgicas al año 2022 (ver Anexo1) de acuerdo a la capacidad máxima productiva de sus plantas SxEw son: Radomiro Tomic (~220 mil toneladas), Escondida (~203 mil toneladas), Spence (~120 mil toneladas), Gabriela Mistral (~110 mil toneladas), El Abra (~92 mil toneladas), Zaldívar (~88 mil toneladas) y Lomas Bayas (~72 mil toneladas).

2.2 Perspectivas futuras

A partir del 2024 se proyecta la puesta en marcha de 9 iniciativas las que en conjunto aportarían aproximadamente 230 mil toneladas (cuyo peak se daría el año 2028) como producción máxima, considerando proyectos probables, posibles y potenciales. Son principalmente proyectos de reposición o continuidad operacional de faenas actualmente operativas o paralizadas. Los más importantes son la reapertura de la planta de Collahuasi (~45 mil toneladas), Polo Sur (~40 mil toneladas), Sierra Gorda Óxidos (~45 mil toneladas), y Marimaca (~30 mil toneladas). No obstante, se prevé que hacia el 2030, de las 35 operaciones actuales sólo queden 19 activas -incluyendo los 9 proyectos anteriormente mencionados- con lo que se lograría una producción 23% inferior a la alcanzada en 2022.

Figura 4: Producción real y proyectada de cobre en Chile por tipo de producto



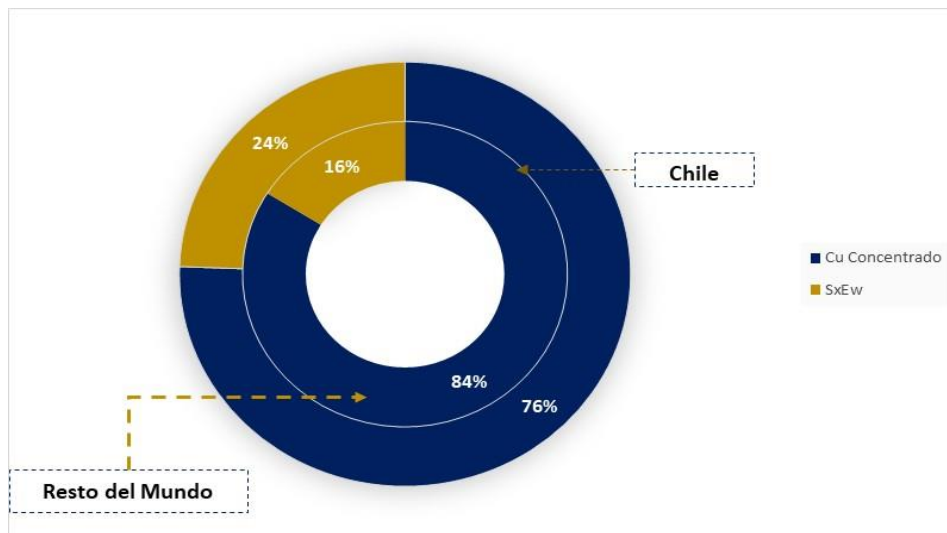
Fuente: Cochilco

Se proyecta que al año 2033 cerca de un 94% de nuestro cobre se produciría como concentrados, por lo que se hace necesario estudiar las posibilidades de aumentar la capacidad de fundición país o buscar soluciones alternativas.

2.3 Chile frente al resto del mundo

La importancia del proceso hidrometalúrgico dentro de la producción local ha ido disminuyendo desde el año 2009. El año 2022 la proporción de SxEw respecto del total de la producción de cobre de Chile representó un 24%, aún por sobre el 16% del resto del mundo. El promedio en la participación de la producción esperada de SxEw hasta el año 2034 para el resto del mundo es de 12,4%, que en el caso de Chile estaría en torno al 15%, mostrando un drástico descenso a partir del año 2030, reduciendo su participación a sólo un dígito de la producción total.

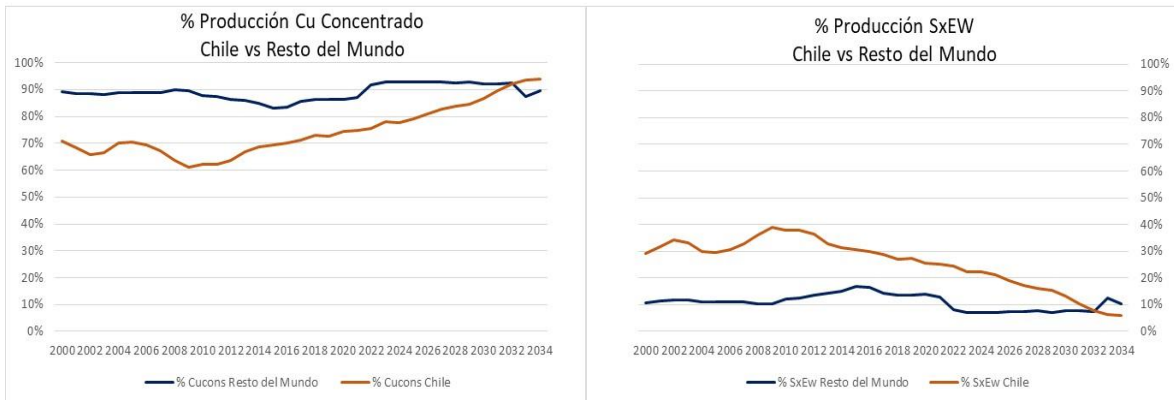
Figura 5: % de Producción por tipo de Producto 2022. Chile vs Resto del Mundo



Fuente: Elaboración propia en base a datos Cochilco y Wood Mackenzie

La distribución de la matriz productiva de Chile respecto del resto del mundo tendrá a partir del año 2031 un vuelco hacia la producción de concentrado, que tal como se mencionó tiene que ver con que los recursos oxidados de los yacimientos actualmente en producción se han ido agotando, entrando a zonas de sulfuros primarios donde la hidrometalurgia tiene menores rendimientos técnicos y económicos con respecto al proceso de concentración.

Figura 6: % de Producción esperado por tipo de Producto. Chile vs Resto del Mundo



Fuente: Elaboración propia en base a datos Cochilco y Wood Mackenzie

De los 51 países productores de cobre en el mundo, sólo 18 producen a través de procesos hidrometalúrgicos. Dentro de estos, Chile y D.R. Congo producen casi un 70% de la producción mundial.

Tabla 1: Ranking Principales Países Productores de SXEW (Kt)

	2022	2034	Variación%
Chile	1.418	638	-55%
DR. Congo	1.126	883	-22%
Estados Unidos	511	521	2%
México	148	203	37%
Zambia	122	130	7%
Perú	105	393	274%
China	65	58	-11%
Kazajistán	49	5	-90%
Irán	22	25	14%
Indonesia	20		-100%
Total Mundial	3647	3262	-11%

Fuente: Elaboración propia en base a datos Cochilco y Wood Mackenzie

En la Tabla 1 se observa el ranking de los 10 principales productores de SxEw el año 2022 versus la perspectiva de producción de estos países al año 2034.

El año 2022 la producción de Chile de SxEw representó un 38,9% del total de la producción mundial (1.4 millones de toneladas) de cátodos a través de este método, siendo un claro protagonista del mercado, seguido por D.R. Congo cuya producción representó un 30.9% de la producción total. Para el año 2034 se proyecta una caída de 55% en la producción nacional, a 638 mil toneladas, con lo que Chile aportará con un 20% de la producción mundial, descendiendo al 2do lugar detrás de R.D. Congo.

Para el año 2034 se proyecta un descenso en la producción mundial de SxEw de 11% (respecto del 2022), que a diferencia de la situación actual, tendrá un mercado distribuido de manera más homogénea entre tres principales actores, D.R. Congo (883 mil tm), Chile (638 mil tm) y Estados Unidos (521 mil tm). Perú con 393 mil tm, será el país con mayor incremento en la producción de cobre a través de SxEw (274% respecto del año 2022) gracias a la puesta en marcha de Tia María SxEw (~115 mil toneladas) el año 2027 y la entrada en operación de La Granja (~100 mil toneladas) y Los Chancas (~30 mil toneladas).

3 Principales tecnologías en hidrometalurgia

3.1 Hidrometalurgia convencional

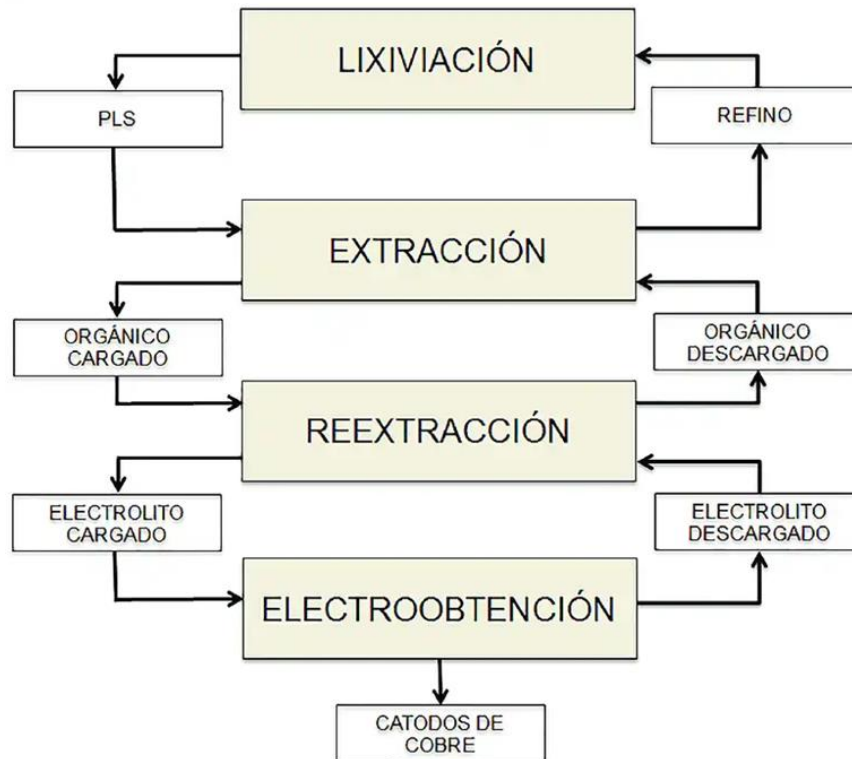
La hidrometalurgia es el conjunto de procesos para la extracción de metales, desde los minerales oxidados que los contienen, a través de medios físicoquímicos acuosos. Se desarrolla en tres etapas distintivas y secuenciales³ descritas a continuación.

3.1.1 Etapas de hidrometalurgia convencional

- **Lixiviación (Leaching):** proceso mediante el cual se provoca la disolución selectiva de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis.
- **Extracción por solvente (Solvent Extraction, SX):** Método de separación de una o más sustancias de una mezcla mediante el uso de extractantes diluidos en un solvente, que en el caso del cobre es keroseno. En el proceso de extracción del cobre, la resina orgánica permite capturar el cobre en solución, dejando las impurezas tales como el hierro, aluminio, manganeso y otros en la solución original. La solución orgánica cargada con cobre es separada en otro estanque, donde se la pone en contacto con electrolito pobre (no es totalmente descargado) que tiene una alta acidez, lo cual provoca que la resina suelte el cobre y se transfiera a la solución electrolítica rica o cargada, la cual es enviada finalmente a la planta de electroobtención.
- **Electroobtención (electrowinning, EW):** Proceso electrometalúrgico donde se disponen alternadamente un ánodo y un cátodo dentro de una solución electrolítica previamente concentrada. El proceso se realiza mediante la aplicación de una corriente eléctrica de bajo voltaje, pero de alto amperaje (sobre 400 amp/m²), la cual provoca que los cationes de Cu sean atraídos hacia el cátodo y se depositen sobre éste en forma metálica.

³ Definiciones plasmadas en documentos de Acuerdo Producción Limpia y Minería, 2002

Figura 7: Etapas de una hidrometalurgia convencional



Fuente: Presentación “Exportar o Fundir nuestros concentrados”, Fernando Pino al Comité Ética del IIMCH, noviembre 2023

3.1.2 Tipos de Lixiviación según contacto con mineral

Existen diferentes métodos para lixiviar, que corresponden a la forma en que se contactan las soluciones lixiviantes con el mineral. Los métodos más comunes son⁴:

- **Lixiviación In Situ:** Se realiza en yacimientos que no se pueden explotar de forma convencional por razones técnicas o económicas regando directamente el yacimiento. Las leyes son variables ya que se puede aplicar a óxidos y mineral mixto. La recuperación de cobre toma periodos largos de tiempo (del orden de años) y las recuperaciones son muy variables. Características: Bajos costos de inversión y de operación; método de explotación con poca perturbación de los terrenos; existe riesgo de que las soluciones ácidas contaminen las aguas subterráneas y superficiales si no existe un control adecuado de sus flujos.
- **Lixiviación en botaderos (dump leaching):** Se aplica a desmontes o sobrecarga de minas a rajo abierto a mineral de baja ley, según sea la ley de corte que es variable y normalmente fluctúa entre 0,20 y 0,25 % de cobre y que no se puede procesar por métodos convencionales. Características: No requiere inversión en mina, no tiene costos asociados a transporte (salvo el de la mina al botadero) y las recuperaciones

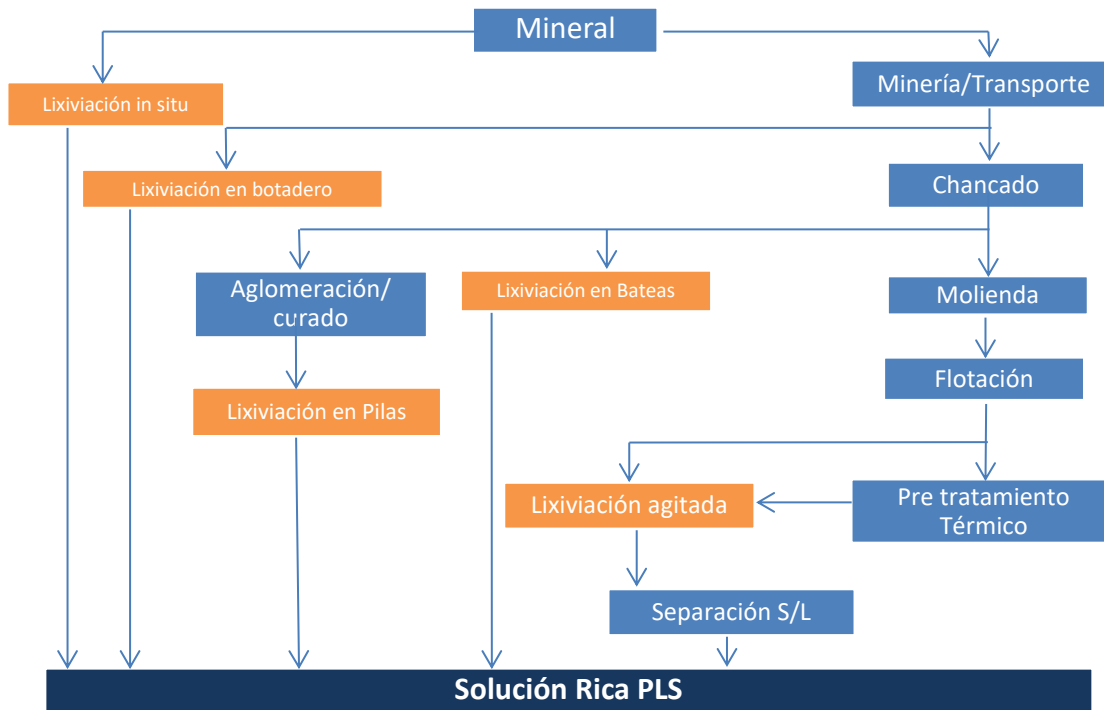
⁴ Informe hidrometalurgia sulfuros primarios desafíos, Cochilco, 2017

fluctúan entre 40 y 60% para el caso del cobre en alrededor de tres años de operación. Es posible realizar lixiviación bacteriana de sulfuros de cobre, en ese caso se puede requerir riego intermitente y nutrientes.

- **Lixiviación por percolación o en bateas:** Se aplica para mineral con granulometría de $\frac{3}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ ". Consiste en llenar una estructura con forma de paralelepípedo, de hormigón con mineral, protegido interiormente provisto de un fondo falso de madera y una tela filtrante. Se inunda con soluciones de lixiviación las cuales se recirculan para traspasarlas a la siguiente batea. Las sucesivas recirculaciones permiten subir el contenido de cobre, las recuperaciones típicas oscilan entre 70 y 85% en un tiempo de 1 a 2 semanas. Características: método está prácticamente obsoleto para el cobre.
- **Lixiviación en pilas química y bacteriana (heap leaching):** En este caso el mineral tiene una mayor ley que el utilizado en botadero (mayor a 0,4% soluble en ácido), por lo tanto se justifica económicamente recurrir un tratamiento más complejo a través de una planta de chancado. El mineral puede ser óxido, mixto o sulfuro y puede recibir pre-tratamientos de lixiviación como curado férrico, curado ácido y /o aglomeración. Se amontona en pilas de 2 a 12 m (en general la altura máxima de cada levante es normalmente alrededor de 8 m) y se riega con la solución lixiviante. Una vez que se agota la pila, se puede construir un nuevo piso sobre la misma (pila estática o pila permanente) o se puede remover el piso lixiviado y construir una nueva pila en su lugar (pila dinámica). La solución rica de lixiviación conocida como PLS –del inglés Pregnant Leach Solution- tiene una concentración de 3 a 10 g/L de Cu. La recuperación varía desde 75% a 90% dependiendo del mineral. El cobre se recupera en un periodo de 2 a 3 meses en el caso de óxidos y sobre 12 meses en el caso de sulfuros. Para el caso de lixiviación bacteriana de minerales sulfurados, las bacterias se pueden reproducir de forma natural en las pilas, dependiendo de las condiciones en las que se encuentren, así como también es posible controlar su reproducción en reactores y ser transportadas a la pila como solución lixiviante. Es importante considerar que ciertas especies son tóxicas para las bacterias como cloruros y nitratos, pero con tiempo estas se pueden acondicionar para tolerar especies tóxicas en concentraciones de hasta 2 a 3 g/L. En términos estrictos, el balance metalúrgico se calcula con el cobre recuperado desde el cobre alimentado en un período largo de tiempo.
- **Lixiviación por agitación:** Para aplicar este método se requiere que el mineral esté finamente molido, por esta razón se aplica a minerales con leyes muy altas, que por su mayor valor contenido justifican la molienda húmeda, a cambio de mayores recuperaciones y menos tiempos de procesos. Se puede realizar por medios mecánicos o bien con aire. Una particularidad de este método es que es adecuado para la aplicación de factores aceleradores de la cinética como velocidad de agitación, temperatura, presión, uso de reactivos exóticos y oxidantes altamente agresivos, y juntos a ellos, la posibilidad de utilizar materiales de construcción de alta resistencia. Generalmente se requiere de una etapa posterior de lavado en contracorriente. Cuando se exceden las condiciones de temperatura y/o presión

ambientales, el reactor es conocido como autoclave. Los autoclaves se utilizan con frecuencia para concentrados más refractarios, como calcopirita o piritas auríferas, que requieren temperaturas y presiones elevadas, manteniendo el requisito de desarrollarse en medio acuoso. Por otra parte la lixiviación bacteriana de concentrados (BioCop-BacTech) utilizan bio-reactores mecánicos, con condiciones de operación controlada: velocidad de agitación, temperatura, tamaño de partículas sólidas, al igual que el proceso de lixiviación amoniacal de Escondida en Coloso, utiliza un reactor mecánico agitado. Estos procesos obtienen altas recuperaciones, entre 75% y 90% en menos de 24 horas, pero tienen altos costos de operación.

Figura 8: Tipos de Lixiviación según contacto con mineral



Fuente: Cochilco sobre Domic (2001), Informe Sulfuros Primarios desafíos 2017

A la fecha, la lixiviación en pilas para minerales oxidados es el método más usado en Chile. Las ventajas principales de las operaciones de lixiviación en pilas y en botadero/SX/EW son sus menores costos de inversión, de operación y su menor consumo de agua y también de energía al no realizar la molienda del mineral, obteniendo como resultado la producción de cátodos de cobre electro obtenido.

3.1.3 Lixiviación medio cloruro

La lixiviación química puede usar diferentes tipos de agentes lixiviantes, los más comunes son sulfatos, cloruros, nítricos y amoniacales. En Chile se ha desarrollado la lixiviación con un medio clorurado, tal es el caso de Michilla que en los años 90 empezó a usar agua de mar en la lixiviación y desarrolló el proceso CuproChlor® de lixiviación clorurada. A este tipo de lixiviación se le ha visto un potencial para sulfuros primarios de baja ley.

Asimismo, en los últimos años ha habido un rápido desarrollo de la lixiviación con ácido sulfúrico y alto contenido de cloro. Las características de este tipo de lixiviación, son una cinética rápida a temperatura y presión atmosférica. Es una tecnología probada en sulfuros secundarios en reemplazo de la lixiviación bacteriana, con menor tiempo de lixiviación y buenas recuperaciones del cobre que ya ha resuelto los antiguos problemas de corrosión.

3.1.4 Biolixiviación

La lixiviación bacteriana o biolixiviación, es un proceso basado en la oxidación del ion ferroso (Fe^{+2}) y del azufre elementales a ion férrico (Fe^{+3}) e ion sulfato (SO_4^{2-}) respectivamente, catalizada por la acción de bacterias. Las bacterias son microorganismos que se pueden clasificar según su fuente de energía, utilización de oxígeno y temperatura del medio. Estas actúan produciendo enzimas catalizadoras de los procesos de oxidación.

La biolixiviación permite obtener cobre a través de la disolución de minerales sulfurados asistida por microorganismos, ahora bien, la eficacia del proceso y su cinética dependen de la especie mineralógica de cobre. Desde el punto de vista de la velocidad de disolución, cualitativamente se aprecian grandes diferencias entre las especies minerales, así se pueden agrupar en cinco categorías según su relativa: muy rápida, rápida, moderada, lenta y muy lenta por lo que se requiere encontrar las condiciones que aceleraran el proceso.

Actualmente en Chile la biolixiviación, se usa exitosamente para minerales sulfurados secundarios tales como la calcosina (Cu_2S).

3.2 Lixiviación de sulfuros primarios y concentrados de cobre

La sección 3.2 tiene como fuente el Estudio realizado por el *Grupo Internacional de Estudios del Cobre GIEC*: “Smelting and Hydrometallurgy Treatment for Copper Sulphide Ores and Concentrates: Technologies, Challenges, and Trends” del año 2019, que contó con un equipo consultor experto en hidrometalurgia. La sección sobre tecnologías hidrometalúrgicas estuvo a cargo del profesor Juan Carlos Salas Morales, del Departamento de Minería de la Pontificia Católica Universidad de Chile, Andrés Reghezza, Ahmad Ghahreman, Felipe Lagno, Roberto Parada, Philip Mackey, Igor Wilkomirsky, Leonel Contreras y Boyd Davis.

A la fecha, lo expuesto en ese estudio sigue vigente, por lo que en el presente apartado se expondrán los principales resultados.

Los sulfuros primarios tales como la calcopirita (CuFeS_2), que son la especie más abundante en Chile hoy, tienen la característica de ser minerales altamente refractarios, con cinética muy lenta y por tanto a escala industrial, la obtención de cobre de sulfuros primarios sigue siendo la pirometalurgia, que ha existido desde el principio de la metalurgia del cobre y se puede considerar una tecnología madura y probada que incluye procesos de flotación y fundición.

Sin embargo, se continúan realizando grandes esfuerzos para desarrollar procesos hidrometalúrgicos que puedan lixiviar sulfuros primarios con calcopirita. En el caso chileno ha habido un interés mayor por razones tanto ambientales como de eficiencia productiva, considerando que a mediano plazo aumentará considerablemente la capacidad ociosa de plantas SxEw (debido a la disminución de cerca de 800 mil tm que se espera hacia el año 2034) y que la opción de construir nuevas fundiciones implica un significativo costo tanto por la inversión como por las externalidades que se le asocian.

Dentro de los principales mecanismos de lixiviación de la calcopirita que han sido estudiados en Chile y el mundo están:

- 1.- Lixiviación química en medio de sulfato
- 2.- Biolixiviación
- 3.- Lixiviación a alta presión
4. Activación mecánica para la lixiviación
- 5.- Lixiviación de cloruro y cloruro/sulfato
- 6.- Mejora Galvánica de la Lixiviación
- 7.- Agentes Complejantes en la Lixiviación
- 8.- Líquidos iónicos en la lixiviación
- 9.- Lixiviación de especies con Arsénico (ejemplo energita)

Estos mecanismos han sido factibles a nivel laboratorio, sin embargo aún no han llegado a ser económicamente viables. Por ejemplo, una lixiviación química en medio de sulfato (que es tradicionalmente el proceso más eficiente para el tratamiento de minerales oxidados de cobre dado su alta cinética de reacción) para sulfuros primarios, tiene la desventaja de tener una cinética más lenta que sulfuros secundarios pues tienden a formar una capa pasivante que impide que el agente lixivante reaccione con el mineral. Tal limitación cinética es probablemente el desafío más relevante en la lixiviación del sulfuro primario, ya que limita la recuperación máxima de cobre en un periodo razonable.

3.2.1 Hidrometalurgia en concentrados de cobre

Los mayores esfuerzos que se realizan a nivel mundial están dirigidos más bien a la lixiviación de concentrados primarios y no a la lixiviación de minerales como alternativa a los procesos de fusión.

Los concentrados de cobre tienen alta concentración de calcopirita, por lo que un proceso alternativo para superar la refractariedad (que resiste altas temperaturas sin descomponerse) de la calcopirita a la lixiviación, es el uso de alta presión de oxígeno y temperatura, acelerando la reacción y permitiendo tiempos de resistencia de solo unas pocas horas. Este tipo de proceso se realiza con la inyección de oxígeno en autoclaves agitadas a presiones mayores que la presión atmosférica. El proceso es autógeno, especialmente si hay pirita presente, y normalmente requiere evacuación de calor para el control de la temperatura. Dado que los autoclaves son tanques agitados, el proceso

requiere la molienda de la alimentación sólida, normalmente concentrados, para permitir la adecuada agitación de la pulpa. Dependiendo del rango de temperatura, se identifican dos opciones de proceso: temperatura media y temperatura alta. Casos puntuales han sido estudiados en Chile, los que no han logrado avanzar tanto por costos como por escala de operación.

Las alternativas vigentes –que se encuentran en diferentes etapas de desarrollo: laboratorio, escala piloto o demostración comercial- más validadas como alternativas para procesar concentrados de cobre mediante la hidrometalurgia son:

- 1.- Proceso BHAS
- 2.- Proceso Sunshine y especies de nitrógeno catalizado (NSC)
- 3.- Proceso de Cobre INTEC
- 4.- Proceso Activox
- 5.- Proceso CESL
- 6.- Proceso de Albión
- 7.-Proceso Bactech/Mintek
- 8.-Proceso Biocop
- 9.-Proceso Dynatec
- 10.-Lixiviación a alta presión y temperatura (HPOX)
- 11.-Lixiviación a presión y temperatura media (MPOX)
- 12.-Geocapa
- 13.-Cuprex
- 14.-Hidrocobre
- 15.-Proceso Brisa (Biolixiviación rápida Indirecta con separación de acciones)
- 16.-Proceso Platsol
- 17.-Proceso Galvanox
- 18.-Proceso claro
- 19.-Proceso Sumitomo
- 20.-Proceso Arbiter
- 21.-Proceso Cymet

En relación a su nivel de madurez se puede observar un resumen en Tabla 2 a continuación.

Tabla 2: Resumen del nivel de madurez de tecnologías hidrometalúrgicas para el tratamiento de concentrados de Cu

	Laboratorio	Piloto	Demostración	Industrial
Medio Sulfato		Galvanox Dynatec MPOX		HPOX BHAS
Medio Sulfato/cloruro		Platsol Noranda	CESL	
Medio Cloruro/haluro	Hiperlixiviación	Cuprex Cymet Sumitomo	Intec Hydrocopper	Clear
Actividad Mecánica	Lixiviación Oxidativa Rápida	Activox		Albion
Amonio/nitrógeno	NSC	Sunshine		Arbiter
Biolixiviación	BRISA	Bactech Geocoat		Biocop*

Fuente: Estudio GIEC “Smelting and Hydrometallurgy Treatment for Copper Sulphide Ores and Concentrates: Technologies, Challenges, and Trends”, 2019

La mayoría de estas tecnologías han sido descontinuadas (representadas dentro de la tabla en color verde) tanto antes como después de obtener una aplicación industrial, y solo unas pocas tecnologías han llegado a escala industrial. Sólo el proceso HPOX aplicado por Freeport MacMoRan en Morenci se mantiene como una tecnología madura para concentrados de cobre.

Cabe señalar que esta tecnología de lixiviación se probó en 1999 en Minera Candelaria en concentrado cobre aurífero. De esa campaña de evaluación surgieron dos procesos potencialmente viables: (1) la lixiviación a alta presión y temperatura HPOX en la que se logra que todo el sulfuro de azufre en concentrado se convierta en ácido sulfúrico y (2) la de media presión y temperatura MPOX en la que una proporción significativa de sulfuro de azufre en concentrado se convierte en azufre elemental y esto a su vez se convierte en ácido sulfúrico. La definición entre alta o media temperatura dependen de la economía (H₂SO₄). Esta tecnología tiene varias ventajas: ácido sulfúrico como subproducto para ser utilizado en lixiviación en pilas y, que es posible utilizar en instalaciones e infraestructura EW existentes.

Otro proceso en el que se han concentrado muchos esfuerzos, es en la biolixiviación de concentrado de cobre. Si bien esta tecnología ya no está activa a nivel industrial, cabe destacar algunos puntos interesantes. El proceso patentado Biocop utiliza bacterias termófilas para oxidar y lixiviar cobre de concentrados de sulfuro a 65–80 °C. Para ello se utiliza oxígeno en lugar de aire y es interesante además que el arsénico puede eliminarse produciendo un residuo estable. El cobre puede recuperarse por SX/EW y el exceso de ácido puede usarse en lixiviación de óxido si las condiciones locales lo permiten. Uno de los grandes desafíos es encontrar condiciones y microorganismos necesarios para lograr cobre aceptable, extracción y tiempo de residencia, y el diseño del sistema de agitación para asegurar cinética y uso de oxígeno.

A pesar de los esfuerzos, se puede observar que la vía hidrometalúrgica para el procesamiento de concentrados no ha logrado desarrollarse lo suficiente como para ser una alternativa viable al proceso pirometalúrgico. Varias propuestas han sido probadas a nivel piloto, pero no han podido avanzar a una aplicación industrial, salvo en el caso del proceso utilizado en Morenci.

La lixiviación a presión es la tecnología que presenta el mayor nivel de madurez, pero no está totalmente desarrollada. La elección entre HPOX y MPOX dependerá de la economía y de consideraciones especiales en términos de neutralización final del ácido

3.2.2 Investigación chilena en lixiviación de sulfuros primarios en minerales y en concentrados

Chile ha participado de algunas de las investigaciones y desarrollo de alternativas para lixiviar los sulfuros primarios. Nuestro país tiene ventajas comparativas, dentro de las que están: probablemente la mayor experiencia del mundo en lixiviación en pilas y botaderos; la necesidad de utilización de la capacidad disponible de instalaciones de SX/EW; el significativo avance en la lixiviación con soluciones cloruradas de minerales de baja ley (incluyendo aplicaciones industriales) y las investigaciones y desarrollos prometedores que se encuentran en progreso.

Actualmente AMSA, BHP y otras empresas están investigando la lixiviación clorurada para lixiviar sulfuros primarios en botaderos, pilas o en concentrados. El proceso Cuprochlor T de AMSA se aplica actualmente a escala industrial, en una pila de 40 kt de sulfuros primarios que produce cobre en Centinela. El lograr resultados exitosos en este proceso tendría significaría un impacto muy positivo para el país, ya que permitiría utilizar la capacidad instalada SX-EW. En Spence de BHP el proceso de lixiviación secundaria reemplazó la lixiviación bacteriana por lixiviación con alto cloro, y a la fecha se sabe que tienen previsto aplicarlo en sulfuros primarios de baja ley proveniente de la extracción de minerales para la planta concentradora.

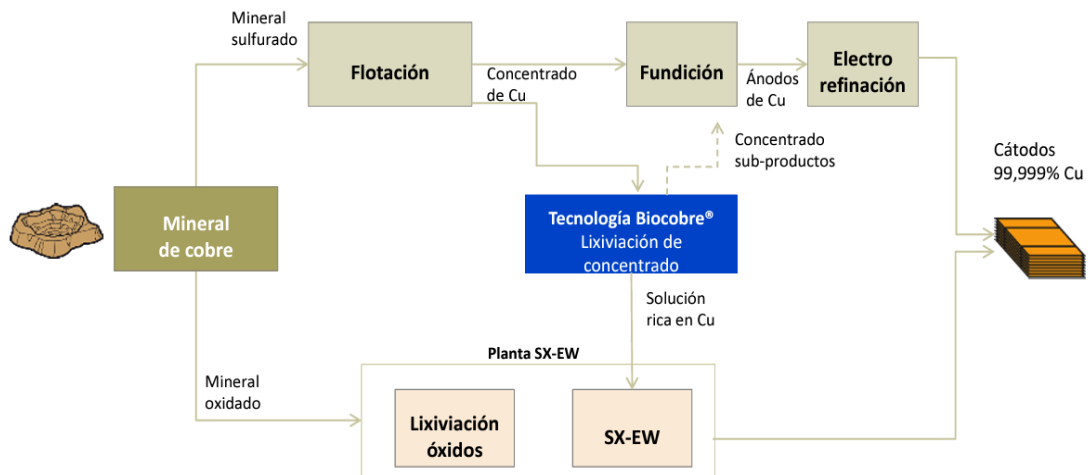
Otra iniciativa fue el proyecto conjunto entre BHP y Codelco en que patentaron un tipo de tecnología para biolixiviar concentrados de cobre, la llamada Biocop. Hubo un período de alrededor de 30 años entre el primer intento de laboratorio y el inicio de la planta de demostración de Biocop, que logró realizar los primeros ensayos con concentrados con arsénico tras 10 años de trabajo. Las pruebas consiguieron validar la tecnología en una escala significativa y la biolixiviación de concentrados de cobre podría ser considerada como una tecnología probada, sin embargo conflictos entre las partes resultaron en una disolución del *joint venture*, quedando BHP con los derechos de patente y Codelco con las instalaciones. Tras experiencia industrial de Biocop, se observa baja actividad de uso masivo de la lixiviación de concentrados.

Hoy están en progreso investigaciones para tratar los concentrados combinando procesos piro e hidrometalúrgicos; a modo de ejemplos:

- Retirar el metal blanco en forma continua desde el Convertidor Teniente y granallararlo puede disminuir en forma significativa las emisiones de gases al medio ambiente, dar mayor continuidad a la operación y aumentar la capacidad. Entre las alternativas para tratar el metal blanco (calcosina sintética) está la lixiviación-SX-EW.

- Proceso Biocobre⁵ creado por minera Pucobre y empresa chilena LIAP SpA⁶, proyecto desarrollado entre los años 2012 y 2022, que consiste en una biolixiviación en pilas de concentrados sulfurados con un soporte de plásticos reciclados como matriz de aglomeración y que tendría efectos catalíticos. El residuo se puede concentrar y contiene Au, Ag, Mo y otros elementos y se puede tratar por pirometalurgia. Es un proceso pionero y ha logrado 95% de recuperación del cobre en concentrados con muy alta proporción de sulfuros primarios (Calcopirita), reemplazando la fundición y refinación para obtener cátodos. Es así como desde el año 2012, Pucobre usa esta tecnología que permite producir cátodos de cobre a partir de concentrado del 29% de cobre y estarían iniciando la ingeniería para una instalación industrial.

Figura 9: Aplicación tecnología Biocobre en minera Pucobre



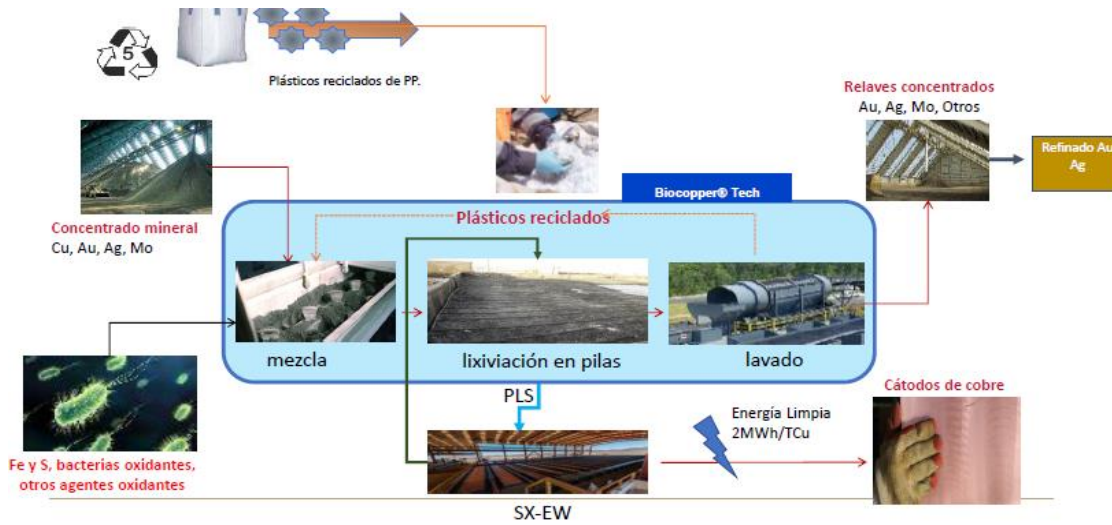
Fuente: Presentación Pucobre a Sonami, 2015

Más detalle de los procesos involucrados en la Tecnología Biocobre, se pueden ver en Figura 10.

⁵ Pucobre, 2015

⁶ Empresa chilena de biotecnología fundada en 2012, que ha desarroll, utiliza y transfiere exclusivamente la Tecnología Biocobre® para el refinado de concentrados minerales sulfurados

Figura 10 Procesos de tecnología Biocobre



Fuente: Presentación de LIAP SpA en Seminario FURE 2023

Esta tecnología utiliza una matriz plástica de polipropileno reciclado que a bajo pH es capaz de aglomerar en su superficie concentrados sulfurados de cobre que se apilan en reactores de lixiviación logrando la oxidación de microorganismos de los componentes metálicos dispuestos en la matriz cristalina del concentrado, recuperando el cobre contenido como sulfato de cobre soluble. Todo esto mediante inyección de aire y riego de soluciones aciduladas. Una vez finalizado el ciclo de lixiviación, los componentes minerales aun adosados a la matriz plástica son lavados en soluciones de pH neutro, recuperándose el plástico, que será utilizado en un nuevo ciclo, y obteniendo finalmente un concentrado residual.

Cabe destacar, que el desarrollo de Biocopper fue también posible al desarrollo que tuvo ya desde 2003 al 2011 de un laboratorio de investigación en minería verde Pucobre (Ver Figura 11 para cronología).

Figura 11: Cronología desarrollo de tecnología Biocobre



Fuente: Presentación de LIAP SpA en Seminario FURE 2023

En el pasado seminario FURE 2023 organizado por el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, LIAP presentó resultados de aplicación de Biocopper a mayor escala, con resultados de pruebas de pilotaje integrado de 300 toneladas de concentrados complejos, con 72 T de cátodos producidos, equivalente a una recuperación del 90% de cobre fino contenido producidos en la Planta Piloto Paipote Atacama.

4 Comentarios Finales

La hidrometalurgia ha desempeñado un papel crucial en el desarrollo minero de Chile, pero su situación actual enfrenta desafíos considerables. Las proyecciones esperadas apuntan hacia una importante caída de la producción hacia el término de la presente década y, por otra parte, se observa la ausencia de proyectos mineros que reviertan la tendencia a la baja de la producción nacional de cátodos SxEw.

Asimismo, la nueva composición de la matriz productiva de cobre representa desafíos a nivel mundial, ya que se proyecta una tendencia descendente tanto en Chile como en R.D Congo, principales actores del mercado, lo que hacia el 2034 representaría una caída de 11% en la producción mundial de cátodos SxEw.

La profundización de los yacimientos, el agotamiento de minerales oxidados y sulfuros secundarios (quedando en mayor proporción sulfuros primarios), así como la falta de tecnología competitiva para el tratamiento de sulfuros primarios a través de la hidrometalurgia, implica la conversión hacia procesos pirometalúrgicos en yacimientos más profundos para dar continuidad a la producción de cobre en Chile, lo que implica que la capacidad instalada para la lixiviación de minerales en desuso será considerable en el futuro.

Este cambio en la dinámica de la oferta y la necesidad de adaptación requerida, relevan la importancia que la industria minera debe otorgar a esta materia en pos de mantener la eficiencia y sustentabilidad de la minería del cobre.

Por ello, se estima necesario buscar soluciones alternativas para el procesamiento de minerales sulfurados primarios y concentrados, conjuntamente con estudiar las posibilidades de aumentar la capacidad de fundición país.

A la fecha, no se ha desarrollado a escala competitiva un proceso de hidrometalurgia para la recuperación de cobre desde los minerales sulfurados primarios ni de concentrados, ya que el principal obstáculo de usar hidrometalurgia en sulfuros primarios y concentrados es el contenido de calcopirita. Por tanto, la lixiviación de concentrados de cobre tiene limitaciones estructurales en comparación con la vía pirometalúrgica.

En Chile se han realizado esfuerzos para lixiviar sulfuros primarios y concentrados de cobre con calcopirita. Los mayores logros están en la lixiviación con soluciones cloruradas de minerales de baja ley (incluyendo aplicaciones industriales). En la actualidad esta tecnología es aplicada en otras faenas (AMSA, BHP, Pucobre), siguiendo la investigación de su uso para lixiviar sulfuros primarios.

5 Anexos

							Etapa de desarrollo:	OPERACIÓN
							Producto	: SxEw
Propietario	Minera	Sector	Región	Año Puesta en Marcha	Cierre	Reservas (Mt)	Recursos (Mt)	
ANTOFAGASTA MINERALS	Antucoya	Gran Min Cu	Antofagasta	2015	2035	717,6	302,3	
PAN PACIFIC Copper	Caserones	Gran Min Cu	Atacama	2013	2036	850,0	121,0	
CEMIN	Catemu	Med Min Cu	Valparaíso	<2005	2035	N/A	N/A	
BHP BILLITON	Cerro Colorado	Gran Min Cu	Tarapacá	<2005	2024	9,4	1746,6	
CERRO NEGRO	Cerro Negro	Med Min Cu	Valparaíso	<2005	2032	1,9	3,0	
FREEPORT McMoRan	El Abra	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	2030	1615,0	1614,0	
ANTOFAGASTA MINERALS	Encuentro Óxidos	Gran Min Cu	Antofagasta	2017	2030	115,3	949,4	
BHP BILLITON	Escondida Biolix.	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	N/A	1653,0	N/A	
BHP BILLITON	Escondida Óxidos	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	N/A	182,0	N/A	
LAS CENIZAS	Franke - Continuidad Operacional	Med Min Cu	Antofagasta	2017	2024	19,0	3,3	
CODELCO-CHILE	Gabriela Mistral	Estatal	Antofagasta	<2005	2030	247,0	519,0	
GLENORE-XSTRATA	Lomas Bayas HEAP	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	2029	294,0	710,0	
ANGLO AMERICAN CHILE	Los Bronces	Gran Min Cu	Metropolitana	<2005	2034	1710,5	759,5	
CAPSTONE COPPER	Mantos Blancos	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	2035	120,3	46,0	
MANTOS DE LA LUNA	Mantos de Luna	Med Min Cu	Antofagasta	<2005	2030	43,7	N/A	
CAPSTONE COPPER	Mantoverde	Gran Min Cu	Atacama	<2005	2034	457,4	676,1	
HALDEMAN	Michilla Reapertura	Med Min Cu	Antofagasta	2018	2030	1,4	60,3	
CODELCO-CHILE	Mina Sur Chuqui y Otros	Estatal	Antofagasta	<2005	2025	29,0	N/A	
PAMPA CAMARONES	Pampa Camarones	Med Min Cu	Arica y Parinacota	2014	2027	2,3	N/A	
ENAMI	Planta El Salado	Med Min Est Cu	Atacama	2008	N/A	N/A	N/A	
ENAMI	Planta J.A. Moreno (Taltal)	Med Min Est Cu	Antofagasta	<2005	N/A	N/A	N/A	
ENAMI	Planta Matta	Med Min Est Cu	Atacama	<2005	N/A	N/A	N/A	
ENAMI	Planta Vallenar	Med Min Est Cu	Atacama	<2005	N/A	N/A	N/A	
PUCOBRE	Pucobre*	Med Min Cu	Atacama	<2005	2028	63,0	139,0	
CODELCO-CHILE	R.Tomic Óxidos	Estatal	Antofagasta	<2005	2030	1940,0	5,3	
CODELCO-CHILE	Rajo Inca (Salvador)	Estatal	Atacama	2022	2035	49,0	1,7	
BHP BILLITON	Spence	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	2026	1542,0	897,2	
LAS CENIZAS	Taltal Óxidos	Med Min Cu	Antofagasta	<2005	2024	N/A	12,4	
ANTOFAGASTA MINERALS	Centinela (El Tesoro SxEw) + Esperanza	Gran Min Cu	Antofagasta	2001	2030	413,0	N/A	
SPROTT RESOURCES	Tres Valles	Med Min Cu	Coquimbo	<2005	2025	88,1	139,4	
CODELCO-CHILE	TTE. Recuperación Cu	Estatal	O'Higgins	2014	2040	N/A	N/A	
ANTOFAGASTA MINERALS	Zaldivar	Gran Min Cu	Antofagasta	<2005	2031	413,2	39,2	

* Reservas totales: Sulfuros + Óxidos

Anexo 1: Operaciones Mineras en Chile, SxEw

Fuente: Datos Cochilco

6 Referencias

1. Presentación “Exportar o Fundir nuestros concentrados”, Fernando Pino al Comité Ética del IIMCH, noviembre 2023.
2. Revista International Mining, Antofagasta readies primary sulphide leaching technology options, Nota de prensa, 13 de julio 2022. <https://im-mining.com/2022/07/13/antofagasta-readies-primary-sulphide-leaching-technology-options/>
3. Copper Leaching Practices. Metallurgist & Mineral Processing Engineer. Reportaje, 5 de febrero, 2021. [Metallurgist & Mineral Processing Engineer \(911metallurgist.com\)](http://Metallurgist & Mineral Processing Engineer (911metallurgist.com))
4. Grupo Internacional de Estudios del Cobre GIEC (2019). Smelting and Hydrometallurgy Treatment for Copper Sulphide Ores and Concentrates: Technologies, Challenges, and Trends.
5. COCHILCO (2017), Sulfuros primarios: desafíos y oportunidades, Daniela Villela Olavarría, Constanza Kutscher Monckeberg, Emilio Castillo Dintrans.
6. Institution of Chemical Engineers (2020), Experimental and theoretical study on strengthening leaching of sulfide ores by surfactants, Wei Pana, Huimin Jina, Zhengzhou Liuc, Jiahui Tang, Shuangyi Chenga.
7. Universidad de Chile (2013). Innovación Para Reducir La Brecha Entre Hidrometalurgia Y Flotación-Fundición-Refinación, Tesis Para Optar Al Grado De Magister En Gestion Y Direccion De Empresas, Juan Mauricio Larenas Matcovich.

Este trabajo fue elaborado en la
Dirección de Estudios y Políticas Públicas por:

Paulina Ávila Cortés

Analista de Mercados Mineros

Rosana Brantes Abarca

Analista de Estrategia y Políticas Públicas

Patricia Gamboa Lagos

Directora de Estudios y Políticas Públicas

Diciembre / 2023