



Universidad de Concepción

CALIDAD DEL AGUA Y SU USO EN LA MINERÍA

Andrés Ramírez / Leopoldo Gutiérrez / José Luis Arumí

Serie Comunicacional CRHIAM

Escasez Hídrica **Agua Minería**
Huella del Agua **Sequía**
Servicios Ecosistémicos **Recursos Hídricos**
Calidad del agua **Agricultura Tecnología**
Comunidades
Cambio Climático **Reutilización de aguas**
Investigación
Ecosistemas Gestión Sustentable **Aguas Subterráneas**

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

Directora:

Gladys Vidal Sáez

Comité editorial:

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

Serie:

Calidad del agua y su uso en la minería.

Andrés Ramírez, Leopoldo Gutiérrez

y José Luis Arumí.

Enero 2022

Agradecimientos:

Centro de Recursos Hídricos
para la Agricultura y la Minería
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl



Universidad de Concepción

CALIDAD DEL AGUA Y SU USO EN LA MINERÍA

Andrés Ramírez / Leopoldo Gutiérrez / José Luis Arumí

CALIDAD DEL AGUA Y SU USO EN LA MINERÍA

PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal
Directora de CRHIAM

DATOS DE INVESTIGADORES



Andrés Ramírez

Ingeniero Civil de Materiales.
Doctor en Ciencia e Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Colaborador CRHIAM.



Leopoldo Gutiérrez

Ingeniero Civil Metalúrgico.
Doctor of Philosophy in Mineral Processing,
University of British Columbia, Canadá.
Profesor Asociado del Departamento de
Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.



José Luis Arumí

Ingeniero Civil.
Doctor of Philosophy. Major on Engineering
Profesor Titular Departamento de Recursos Hídricos
Facultad de Ingeniería Agrícola,
Universidad de Concepción.
Investigador Principal CRHIAM.

RESUMEN

La demanda de consumo de agua para beneficio directo o indirecto a la sociedad, la mega sequía que atraviesa Chile en la última década y la necesidad creciente de materias primas para soportar la demanda de bienes, hace necesario visualizar el panorama del consumo de agua y pensar en cómo llegar a condiciones adecuadas para un uso eficiente del recurso hídrico, especialmente en la zona centro y norte del país donde se explota la mayor cantidad de recursos mineros y se tiene el desierto más árido del mundo. Esta serie comunicacional busca dar un contexto del consumo de agua en las regiones de Chile donde se realiza actividad minera, presenta las condiciones de calidad del agua que se requiere para cada actividad y termina mostrando alternativas actuales que se han estudiado o se han implementado, buscando un uso más eficiente y responsablemente el recurso hídrico del que se dispone en el norte del país.



INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso necesario para el desarrollo de todas las actividades cotidianas, y las condiciones actuales hacen necesario tomar medidas enfocadas en generar y promover un consumo responsable de éste. Es por ello por lo que, desde los diferentes enfoques productivos, cada día se desarrolla mayor cantidad de acciones para aprovechar al máximo el recurso disponible, buscando dar un mayor uso y reúso enfocado en una economía circular, realizando procesos para verter efluentes con la mejor calidad posible, de forma que éstos puedan ser utilizados para otras actividades.

Entre los focos de optimización del uso del recurso hídrico se encuentra la agricultura, minería y la demanda de agua potable, lo que es de una gran relevancia, porque son las actividades que promueven la supervivencia y el bienestar de la sociedad. En el caso de la agricultura, el beneficio y la necesidad de realizar estas actividades se puede decir que son evidentes, teniendo en cuenta que la gran mayoría de los productos alimenticios que consumimos, por no decir que la totalidad, provienen en principio de la actividad agrícola. La demanda de agua potable tiene una relevancia especial, pues la calidad y cantidad de agua para el consumo da indicadores de calidad de vida, promueve condiciones de equidad por acceso a este recurso y controla posibles problemas asociados a la salud pública, debido a que, si el agua no tiene calidad suficiente y/o posee acceso restringido, se genera desigualdad.

Por su parte, la minería es una actividad económica que está de forma directa o indirecta en nuestra cotidianidad, de la cual todos nos beneficiamos, se podría decir que: "es un mal necesario". Teniendo presente que de forma cotidiana necesitamos productos de la minería para el desarrollo común de nuestras actividades, existen claros ejemplos de artículos que usamos a diario, algunos de ellos son: un vaso de vidrio, un tazón o plato cerámico, cubiertos (servicios) metálicos, una olla, herramientas tecnológicas como celular, computador o electrodomésticos, medios de transporte como un vehículo automotor, o una bicicleta. En general, podemos afirmar que estamos rodeados de productos de la explotación minera (Figura 1).



Figura 1.

Ejemplos de algunos artículos posibles por productos de la explotación minera.

Ahora bien, el problema no es aprovechar los recursos para el beneficio y la comodidad de nuestra sociedad, sino cómo hacemos un consumo responsable y promovemos mejores prácticas en los procesos de explotación y transformación de los recursos. Esta pregunta se debe plantear en todos los ámbitos de nuestra cotidianidad, teniendo en cuenta que nuestras comodidades y consumos hacen parte de la problemática, en especial teniendo presente que, según la WWF al 29 de julio del 2021, la humanidad consumió la capacidad de recursos disponibles para el año (WWF, 2021), lo que implica que en general la capacidad de carga es mayor que la capacidad de producción, requiriendo aproximadamente 1.75 planetas tierra para suplir la demanda de consumo anual actual (Figura 2). La sobre explotación del planeta significa mayor demanda de agua potable asociada al crecimiento de la población mundial, aumento de la cantidad de áreas cultivadas y dedicadas a la explotación agrícola, aumento de la productividad de las zonas agrícolas y en términos de los procesos mineros, un alto consumo de recursos implica un aumento en la capacidad de producción, y con ello se requiere procesar cada vez más toneladas de mineral necesitando mayor cantidad de recurso hídrico para poder realizar los diferentes procesos mineros.



Figura 2.

Demanda de recursos anuales en el 2021.

Fuente: Adaptación WWF, (2021).

Si nos detenemos en la minería chilena, según el reporte "Cifras actualizadas de la Minería" (Consejo minero, 2021), la mayor parte de los productos de la minería metálica han presentado aumento durante la década comprendida entre el 2010 y 2020. Esto se puede asociar a la gran demanda de diferentes productos tecnológicos, al aumento de consumo y a la aceleración generalizada de muchos sistemas de producción a nivel mundial. Al ser Chile el mayor productor de cobre del mundo necesariamente ve acelerada su capacidad productiva. Se puede afirmar que la producción agrícola ha aumentado en el tiempo, basándose en la estadística de comercio exterior. Entre el 2008 y el 2018 creció la cantidad y el valor de los productos silvoagropecuarios del país, reflejándose en un incremento del 165% del valor de las exportaciones en dicho transcurso de tiempo (ODEPA, 2019).

Sin embargo, existe disminución de la disponibilidad de agua para los diferentes usos, lo que se asocia a la denominada "mega sequía" y a condiciones en las cuales la cantidad de precipitaciones y nieve de invierno han aminorado, reduciendo de esta forma la disponibilidad de agua en el verano. Igualmente se atraviesan condiciones como una aceleración del retroceso de los glaciares que ponen cada vez más en evidencia el cambio climático, y la falta de disponibilidad de agua dulce o continental para los diferentes usos en un futuro próximo.

DEMANDA DE CONSUMO DE AGUA EN REGIONES DONDE EXISTE MINERÍA EN CHILE

Como se afirmó anteriormente, el agua es un recurso que se requiere para las diferentes actividades humanas y para la producción de alimentos y bienes. En esta serie comunicacional se tendrá un enfoque en las regiones donde se desarrolla la minería en el país, en este sentido la Tabla 1 presenta la demanda de agua para la actividad minera, el uso agrícola y de agua potable en regiones donde se presenta actividad minera y agropecuaria al mismo tiempo.

Tabla 1.

Demanda de agua en la industria minera al 2015.

Fuente: Adaptado de DGA, (2017); MOP-Hidrica Consultores Spa y Aquelarre Ingenieros Ltda., (2017 a,b).

Región*	Demanda de agua para la minería %	Demanda de agua agrícola %	Demanda de agua potable %
Arica y Parinacota	0.65	83.4	15.5
Tarapacá	54.2	18.0	23.1
Antofagasta	56.7	17.3	14.68
Atacama	20.1	77.7	8.8
Coquimbo	7.5	83.1	8.2
Valparaíso	4.4	62.6	10.4
Metropolitana	1.1	61.6	32.5
O' Higgins	3.7	90.9	3.7
Aysén	22.4	5.7	50.5
Magallanes	2.7	9.7	50.9

* Las regiones que no están mencionadas tienen un consumo menor al 0.01% en actividad minera o no reportaban actividad minera al año 2015.

Los procesos de reutilización de agua para diferentes fines es un tema en el que se debe ahondar, en especial cuando se tocan aspectos como la demanda agrícola y la demanda de agua potable, debido a que implican directamente a la sociedad y necesariamente se debe apostar por la disponibilidad del recurso con una adecuada calidad para estas actividades. Para ello, se debe tener como foco los problemas actuales de abastecimiento y acceso equitativo al agua como forma de garantizar el derecho a la vida y la salud, en especial cuando existen cuerpos de agua con contaminación inducida por el hombre y otros tantos que, por la naturaleza de sus causas, promueven la contaminación por disolución de algunos componentes minerales presentes en su recorrido.

En lo relacionado con la minería, para hablar de la demanda de agua es necesario contextualizar un poco. La industria minera utiliza 3% del agua que se consume a nivel nacional (COCHILCO, 2020), entre toda la industria minera la más dominante en Chile es la minería del cobre, la cual consume aproximadamente el 2.3% del agua a nivel nacional. Si bien estos no son valores demasiado altos en forma porcentual, se debe tener en consideración que la mayor producción minera se encuentra en zonas áridas y semiáridas, en el centro y norte del país, lo que implica que este consumo sea significativamente mayor en las regiones que tienen una abundancia de recursos minerales explotables encontrados actualmente, como es el caso de las regiones de Antofagasta y Atacama, las que para el año 2015 tenían un consumo de agua por la minería de 54.2 y 56.7 respectivamente (Tabla 1).

Sin embargo, se ha incursionado en el uso de agua de mar por parte de los proyectos mineros y es una tendencia que continuará aumentando, ya que mayoritariamente en la industria minera se usa agua de mar desalinizada, siendo pocos los proyectos que hacen adecuaciones o generan diseños para usar el agua de mar sin remoción de iones. Esto en gran medida se debe a que el agua de mar de forma natural es un medio altamente corrosivo, que implica un desgaste acelerado de equipos o cambio de componentes utilizados en la industria.

AGUA EN LA AGRICULTURA Y EL CONSUMO HUMANO

En general el agua para la agricultura y el consumo humano requiere de estándares mayores que el agua utilizada para la minería, teniendo en cuenta que de forma directa o indirecta este recurso es consumido por las personas y, un mal control de los procesos y de las especies iónicas, implican que contaminantes sean consumidos por la población, lo que puede traer problemas de salud pública. En la Tabla 1 se presentó el consumo de agua en la agricultura y la demanda de agua potable en zonas del país donde se desarrolla esta actividad y la minería, destacándose una alta demanda de consumo en Arica y Parinacota. En tanto, en Coquimbo y O'Higgins la demanda de agua para la agricultura es superior al 83%, teniendo cultivos enfocados en el consumo nacional y cultivos que son netamente realizados para la exportación de sus frutos o productos obtenidos del procesamiento de éstos.

El consumo de agua para aplicaciones agrícolas requiere una calidad alta, teniendo limitaciones de concentración de algunos iones y compuestos químicos. En general se puede afirmar que se requiere agua con una concentración de iones baja según la NCh 1333. En la Tabla 2 se puede observar que las mayores concentraciones permitidas son para sulfatos y para cloruro con 250 y 200 mg/l respectivamente. Sin embargo, existen otras variables importantes que tienen que ver con la calidad requerida según aplicaciones específicas como es el caso de la conductividad, sólidos disueltos, coliformes fecales, aceites, concentraciones de compuestos residuales como son los herbicidas, pesticidas, plaguicidas, y otros tantos que pueden afectar las diferentes producciones agrícolas enfocadas en el crecimiento de las plantas, la bioacumulación de metales, contaminación de los frutos u hortalizas y con ello de forma directa o indirecta pueden afectar a los humanos como consumidores finales.

Tabla 2.

Concentraciones máximas de elementos químicos en agua para riego. Fuente: INN, (2020).

Elemento	Símbolo	Unidad	Límite máximo agua de uso agrícola
Aluminio	Al	mg/l	5.00
Arsénico	As	mg/l	0.10
Bario	Ba	mg/l	4.00
Berilio	Be	mg/l	0.10
Boro	B	mg/l	0.75
Cadmio	Cd	mg/l	0.010
Cianuro	CN-	mg/l	0.20
Cloro	Cl-	mg/l	200.00
Cobalto	Co	mg/l	0.050
Cobre	Cu	mg/l	0.20
Cromo	Cr	mg/l	0.10
Flúor	F-	mg/l	1.00
Hierro	Fe	mg/l	5.00
Lito	Li	mg/l	2.50
Litio (cítricos)	Li	mg/l	0.075
Manganeso	Mn	mg/l	0.20
Mercurio	Hg	mg/l	0.001
Molibdeno	Mo	mg/l	0.010
Níquel	Ni	mg/l	0.20
Plata	Ag	mg/l	0.20

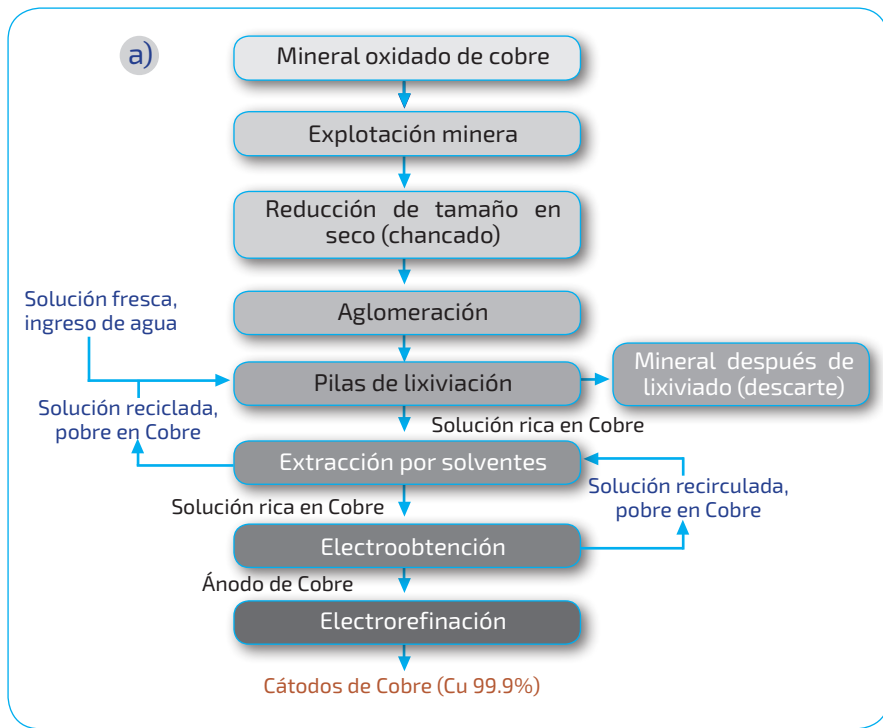
Plomo	Pb	mg/l	5.00
Selenio	Se	mg/l	0.020
Sodio porcentual	Na	%	35.00
Sulfato	SO ₄₌	mg/l	250.00
Vanadio	V	mg/l	0.10
Zinc	Zn	mg/l	2.00
Coliformes Fecales		NMP/100 m	1000

Al estudiar la exigencia de calidad del agua para el consumo humano se encuentra que es mayor (Ministerio de Salud, 2021), implicando menor cantidad de iones y concentración de contaminantes permitidos, lo que es esperable, pues un agua de baja calidad para el consumo humano es sinónimo de un problema de salud pública, lo cual se busca prevenir a partir de los procesos de potabilización para obtener agua de alta calidad.

El consumo de agua en la agricultura está en constante crecimiento, y se espera que sea proporcional al incremento de la población. En las zonas rurales este porcentaje es mayor, ya que se asocia a sistemas menos eficientes de consumo y al requerimiento de aguas para riego (DGA, 2017). Se estima que el mayor crecimiento de la demanda de agua para usos agropecuarios se presentará principalmente en las regiones de Valparaíso, O'Higgins, Maule y Biobío; mientras que en las regiones de Antofagasta, Metropolitana y Tarapacá habrá crecimiento de la demanda de agua potable a causa de la expansión de las zonas urbanas.

CONSUMO DE AGUA EN LA MINERÍA EN CHILE

Para poder observar los consumos de agua en cada parte de la industria minera, se presenta una descripción general de la obtención de cobre a partir de minerales oxidados y de minerales sulfurados. En este sentido, se puede afirmar que los minerales oxidados de cobre se procesan por procesos hidrometalúrgicos hasta obtener cobre electrolítico de calidad comercial con una pureza del 99.9% de cobre, mientras que los minerales sulfurados se procesan por vías pirometalúrgicas, teniendo en Chile mayoritariamente las etapas de procesamiento de minerales, lo que comúnmente se conoce como concentradoras. La Figura 3 presenta una forma gráfica de los procesos utilizados para cada tipo de mineral cuprífero, observándose en la Figura 3a la obtención de cobre a partir de minerales oxidados y en la Figura 3b la obtención a partir de minerales sulfurados.



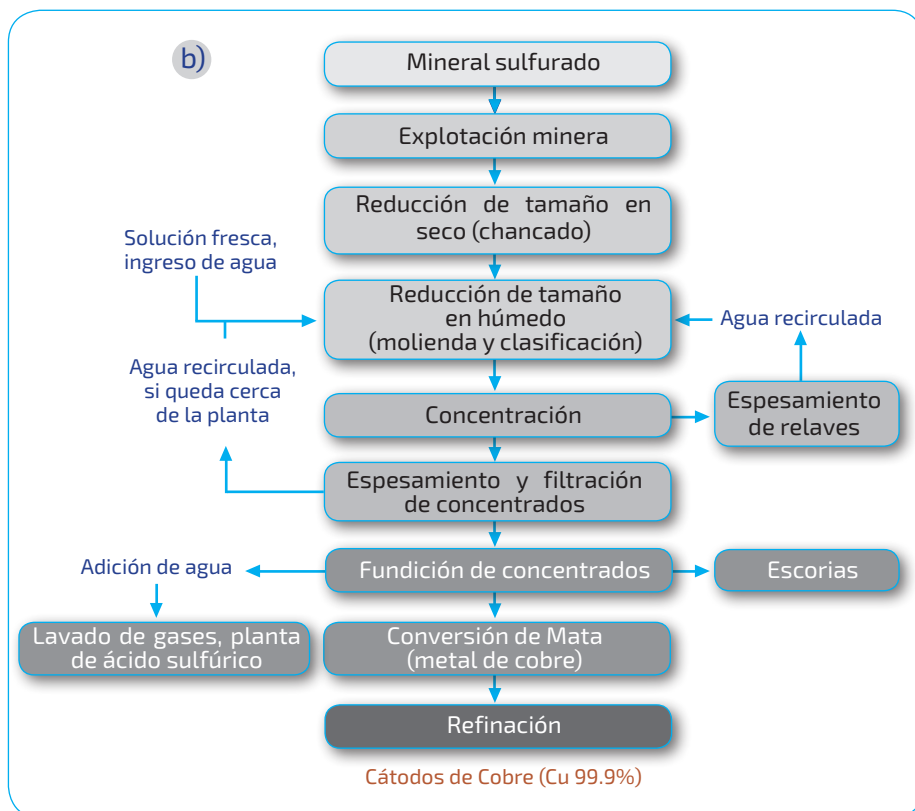


Figura 3.

Esquemas de procesamiento de minerales de cobre. a) obtención de cobre a partir de minerales oxidados; b) obtención de cobre a partir de minerales sulfurados. Fuente: Elaboración propia.

En la industria minera en Chile, como fuente de agua de reposición al sistema, (la que entra por primera vez y se mezcla con la recirculada), se utilizan actualmente dos fuentes diferentes de agua: agua continental (agua dulce) y agua de mar (Figura 4), entre estas dos fuentes de agua se estima que el consumo del 2020 fue del orden de los 18.5 m³/s, de los cuales aproximadamente el 31% corresponde a agua de mar (COCHILCO, 2020).

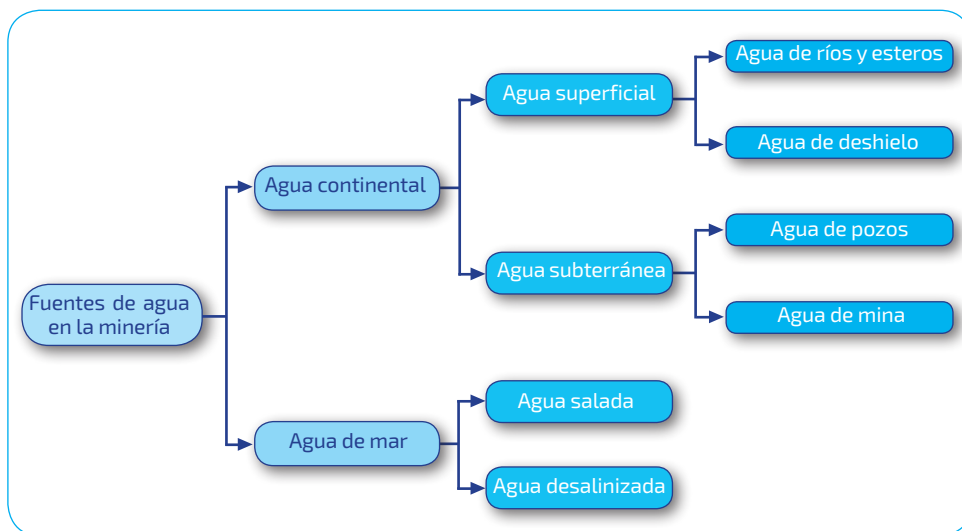


Figura 4.

Fuentes de agua en la minería en Chile. Fuente: Adaptado de COCHILCO, (2018).

Cuando se observa el detalle de las necesidades que tiene la industria minera para el uso de agua de mar, es necesario evaluar diferentes condiciones relacionadas con los costos de operación y con la capacidad de realizar los diferentes procesos de forma eficiente, teniendo recuperaciones tan altas como sean posibles de los productos obtenidos y consiguiendo elementos de calidad para los procesos siguientes en las líneas de producción y, especialmente, teniendo cuidados ambientales que permitan garantizar el menor impacto sobre el entorno y la sociedad. En este sentido, es necesario tener claro que no todas las condiciones geográficas en las que se encuentran las mineras ni todos los procesos realizados en la minería son viables para el uso de agua de mar sin desalinizar.

La gran mayoría de pasos que se deben realizar para obtener recursos desde la actividad minera requieren agua para su funcionamiento, teniendo que, en los procesos extractivos (la mina), cualquiera que sea su naturaleza y el tipo de mineral del que se va a extraer el metal se requiere tener control de la emisión de material particulado, necesitando aplicar agua, en la mayoría de los casos, acompañada de reactivos químicos que ayudan a controlar la dispersión del polvo en el frente de avance y en el transporte. De igual forma, se precisa tener un adecuado control de la

temperatura de los equipos, usando para muchos de ellos agua y en el caso de las perforadoras se utilizan lubricantes, de los cuales hay algunos que tienen como solvente agua, en especial los que van refrigerando las herramientas de corte y perforación.

En el caso de la minería del cobre, sin importar si se procesan minerales oxidados o sulfurados, se deben realizar procesos de chancado y clasificación de tamaño. En estos casos, es común usar agua para el control de polvos, promoviendo la humectación superficial de las partículas y el desprendimiento de finos de las partículas gruesas. En el proceso de minerales oxidados el uso de agua es abundante debido a que se requieren preparar soluciones químicas encargadas de realizar los procesos de lixiviación (volver líquido el elemento de interés en forma de iones). Todo el proceso se realiza en medio líquido, al punto en que el proceso se conoce como hidrometalurgia (Figura 3a). Los procesos hidrometalúrgicos en su conjunto son los segundos en consumo de agua en la minería de cobre en Chile, con un 14% del total usado en la minería (COCHILCO, 2020), para estos procesos se ha encontrado que el uso de agua de mar no es un problema, ya que no compite con las reacciones químicas de la lixiviación (Figura 5).



Figura 5.

Pilas de lixiviación. Fuente: Planta José Antonio Moreno (ENAMI).

En los procesos de minerales sulfurados de cobre es donde se presenta la mayor cantidad de consumo de agua, en especial aquellos realizados en las plantas concentradoras. En forma general estos procesos son: chancado y clasificación, molienda y clasificación, flotación, espesamiento de colas, transporte de concentrados (concentraductos), espesamiento y filtrado de concentrados. Esta secuencia de procesos son los que comúnmente se agrupan y se conocen como plantas concentradoras (Figura 3b). Según las estadísticas, en este proceso se utiliza cerca del 64% del agua que se consume en la industria minera (Figura 6), que para la industria del cobre (producción de concentrados) es del orden de los $9.5\text{m}^3/\text{s}$. Estos valores son bastante altos, en especial si se tiene en cuenta que Chile produjo el 28.4% del cobre a nivel mundial en el año 2019 (U.S. Geological Survey, 2021) y la mayor parte de este metal es extraído de la zona desértica al norte del país, teniendo el mayor aporte de cobre en los procesos de concentración.

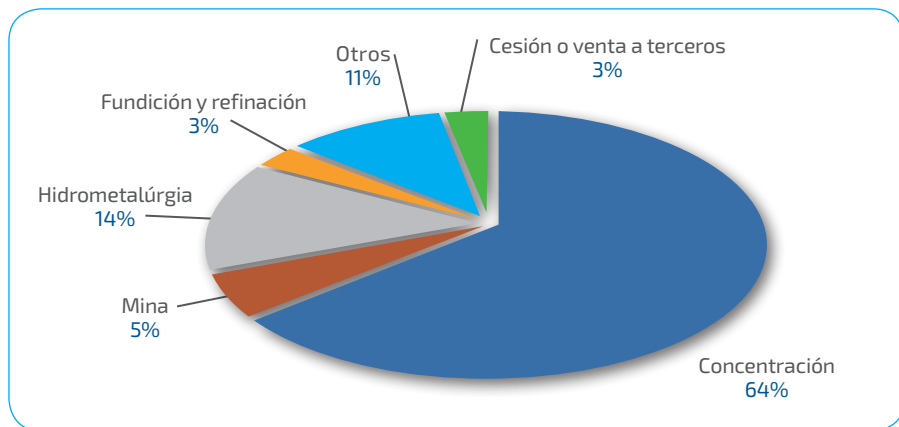


Figura 6.

Distribución de consumo de agua en la minería chilena.
Fuente: Adaptado de COCHILCO, (2020).

En los procesos pirometalúrgicos y otras actividades relacionadas con la minería el consumo de agua equivale a un 14%, lo que se asocia principalmente a que casi el 70% del del concentrado de cobre producido en Chile es exportado a otros países (COCHILCO, 2018). Esto significa que no se consume esa agua en Chile, pero se requiere usar cantidades altas de agua en otros lugares del mundo para obtener el cobre metálico de

alta pureza (99.9%). Este cobre, prácticamente puro, es utilizado para una gran cantidad de aplicaciones cotidianas, por ejemplo, la conducción de energía eléctrica. Estos consumos de agua están asociados al control de temperatura, enfriamiento de sistemas, lavado de gases y otras actividades que requieren de este recurso en los procesos de fundición.

Desde la industria minera se ha trabajado intensamente en la reducción del consumo de agua por tonelada de mineral procesado, presentando una disminución hasta del 41% del consumo de agua en los procesos de concentración entre el 2012 y el 2019 (COCHILCO, 2020). Esta mejora significativa en la gestión del recurso hídrico significa que se disminuyó desde 0.52 hasta 0.36 m³/t. La mejora en la gestión está asociada al desarrollo de nuevos reactivos y optimización de procesos de separación sólido líquido, que permite llegar a recircular entre un 75% y un 80% del agua empleada en los procesos de concentración. Esta situación es relevante para el consumo de agua especialmente porque en general las empresas invierten en la gestión eficiente del recurso hídrico (Figura 7), produciendo relaves con menor contenido de agua y realizando un manejo cada vez más eficiente en los tranques, tanto para beneficio del ambiente, como para el proceso.



Figura 7.

Recuperación de agua para recirculación a partir de espesadores en planta concentradora.

Aún con los grandes esfuerzos que se realizan en dar un manejo eficiente al recurso hídrico, el consumo de agua en la minería nacional ha aumentado en el tiempo, de forma menos acelerada que si no se estuviera trabajando en mejorar los procesos. Este crecimiento obedece a la puesta en marcha de algunos proyectos mineros nuevos de diferentes escalas y al aumento de la capacidad de procesamiento de proyectos existentes, en cierta medida, por la necesidad de incrementar la cantidad de toneladas procesadas por tonelada de concentrado o de metal obtenido, y por la alta demanda de cobre que se tiene a nivel mundial (Figura 8).



Figura 8.

Puesta en marcha de nuevos proyectos mineros. Planta concentradora Spence.

CALIDAD DE AGUA PARA LOS PROCESOS MINEROS

El aumento de los volúmenes de procesamiento se explica porque a medida que se van explotando los yacimientos la ley de los minerales de interés disminuye. En los últimos 20 años la ley promedio de los yacimientos ha disminuido cerca de la mitad (Concha A. *et al.*, 2020), lo que de forma directa significa que se debe procesar el doble de la cantidad de mineral para obtener la misma cantidad de concentrado.

Este agotamiento de los recursos explotados es previsible debido a que la industria minera explota recursos no renovables, lo que significa que son finitos.

La disminución de las leyes de los elementos de interés, trae consigo problemas como una mayor diseminación y aumento de especies mineralógicas complejas, desde el punto de vista de su efecto en las etapas de procesamiento, afectando las etapas de molienda, clasificación, flotación y espesamiento, promoviendo el recubrimiento de las partículas de interés, generando estructuras que dificultan la movilidad de las pulpas y reduciendo la velocidad de sedimentación (Farrokhpay & Ndlovu, 2013; Forbes *et al.*, 2014; Melipichun & Gutierrez, 2014; Ndlovu *et al.*, 2013; Ramirez *et al.*, 2018; Uribe *et al.*, 2016), incidiendo directamente la calidad y cantidad de agua que se puede recuperar en el proceso.

La calidad del agua en los procesos metalúrgicos es un factor importante en el procesamiento de minerales, siendo especialmente crítico en los procesos donde se requieren condiciones fisicoquímicas específicas. En la etapa de flotación de las plantas concentradoras (concentración) es donde se requiere mayor cantidad de agua y, adicionalmente, se necesitan condiciones adecuadas para que se pueda realizar efectivamente los procesos de separación selectiva de los minerales y obtener concentrados con una calidad suficiente para que puedan ser utilizados en los procesos pirometalúrgicos.

En este sentido un alto contenido de iones tiene diferentes efectos en los procesos de flotación. En principio, tener una alta concentración de iones puede beneficiar el control del tamaño de burbujas. Se ha demostrado que soluciones como el agua de mar promueve la formación de burbujas de menor diámetro (Laskowski & Castro, 2015; Laskowski *et al.*, 2019; Moyo *et al.*, 2007), lo que mejora la posibilidad de colectar partículas de menor tamaño. Sin embargo, el aumento de la dureza del agua genera espumas más secas, lo que dificulta el transporte de las partículas hasta las canaletas, donde son retiradas como concentrado. Por otro lado, la generación del efecto tampón (*buffer*), que tiene el balance de carbonatos del agua de mar, hace que no sea viable industrialmente la modificación del pH, lo que afecta la selectividad en la flotación colectiva (*rougher*) y con esto se promueve la flotación conjunta de otros minerales como es el caso de la pirita, que en concentraciones altas afecta el valor de los concentrados.

Una alta concentración de iones genera la contracción de la doble capa eléctrica (conjunto de contraiones que acompañan las partículas) lo que beneficia la clarificación del agua en los procesos de espesamiento (Figura 9) porque ayuda a generar flóculos de las partículas finas (Concha A., 2014; Concha *et al.*, 2012; Park *et al.*, 2016), promoviendo la recirculación de agua más clara que beneficia el proceso. Sin embargo, en los procesos de flotación, la contracción de la doble capa eléctrica afecta negativamente el proceso, porque el mismo efecto de formación de coágulos se presenta entre las partículas finas de cuarzo y arcillas con los minerales sulfurados de cobre, generando un recubrimiento de la superficie que afecta la interacción con los reactivos adicionados para promover la hidrofobicidad de los sulfuros de cobre y de esta forma poder flotarlos.



Figura 9.

Espesadores para recuperación de agua clarificada para recirculación.

El conjunto de minerales cada vez más complejos con agua que contienen alta concentración de iones dificulta los procesos de concentración, razón por la cual se hace necesario utilizar reactivos dispersantes que, como su nombre lo dice, promueven la dispersión o separación de las partículas.

Esto es beneficioso en los procesos de flotación, pero puede generar efectos negativos en el espesamiento y, por tanto, en la calidad del agua que es recirculada. En este sentido, el balance de reactivos y efectos buscados para promover una adecuada recuperación es una relación química que requiere estudio, ensayos y optimización permanente, proyectando el mineral alimentado y las condiciones del medio acuoso. Para el caso de la calidad del agua en la minería no existe una normativa que especifique la calidad del recurso hídrico que se deba utilizar para el proceso industrial, teniendo sólo como limitante para la aplicación las condiciones de procesamiento que implique la presencia iones y reactivos que pueden afectar el rendimiento del proceso.

Por otro lado, en el agua de mar la presencia de iones de calcio y magnesio, los cuales son parte de los componentes mayoritarios de los iones en esta solución, afectan la recuperación de los sulfuros de cobre. Esto se asocia a la generación precipitados coloidales que afectan la hidrodinámica de las pulpas e interactúan con las burbujas, ocupando espacios necesarios para la recuperación del cobre (Hirajima *et al.*, 2017; Ramírez *et al.*, 2020a; 2020b; Ramírez *et al.*, 2018). Además, promueven la interacción con la superficie de los minerales de interés, generando procesos de recubrimiento, similar a lo que pasa con las partículas finas. Este conjunto de condiciones son parte de las reportadas y a las que se enfrenta el procesamiento de minerales cuando se tiene soluciones con alta concentración de iones, ya sea por utilizar agua de mar, o porque en la recirculación del agua se promueve la carga de iones del agua, producto de la disolución de algunos derivados del mineral, así como por la adición excesiva de reactivos y agentes químicos para control del proceso.

COMPONENTES BIÓTICOS Y ORGÁNICOS EN EL PROCESAMIENTO DE MINERALES

Actualmente se estudian algunos efectos de componentes orgánicos en el procesamiento de minerales. Algunos de estos, adicionados como posibles reactivos que promueven la economía circular, como es el caso de las hemicelulosas, subproductos de la producción de celulosa, los que pueden ayudar a la flotación de subproductos como es el caso de la molibdenita (Castillo *et al.*, 2020). Se ha estudiado el efecto del uso excesivo de reactivos floculantes en el espesamiento y la degradación de

estos en los procesos de recirculación del agua (Estrada *et al.*, 2020). En general, se ha encontrado que los efectos de los compuestos orgánicos adicionados son bajos en la recuperación. Sin embargo, la presencia de materia orgánica externa en el agua afecta la recuperación de los minerales.

Tener procesos donde la fisicoquímica es de gran relevancia hace necesario evaluar diferentes variables, a la hora de buscar nuevas fuentes de agua o de limpieza o bioremovición de iones, debido a que poblaciones bacterianas o subproductos que se generen pueden afectar la recuperación de los minerales. Si bien, en la minería se utiliza agua en las diferentes etapas, es de gran importancia el consumo que se tiene en los procesos de concentración, por lo que es clave evaluar la posibilidad del uso de aguas servidas tratadas, en especial para las etapas donde se tiene dependencia de reacciones químicas y procesos fisicoquímicos, en que los componentes del agua son relevantes para que éstos funcionen adecuadamente.

En este sentido, se han desarrollado diferentes investigaciones enfocadas en el efecto de algunas bacterias comunes en este tipo de agua, como son *Escherichia coli*, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* en el proceso de flotación. Estos estudios han mostrado efectos sobre la hidrofobicidad de la superficie de minerales y en la calidad de la espuma (Liu *et al.*, 2013; San Martín, 2018), y en general afectan estos dos parámetros cuando la población microbiana es alta. De igual modo, se ha estudiado la posibilidad de generar reactivos con base microbiológica, usando el género *Stenotrophomonas* por su capacidad de formar complejos entre grupos CH_2 , CH_3 y fosfatos (Yang *et al.*, 2013). Igualmente, se ha evaluado la posibilidad de usar bacterias para generar precipitación selectiva de iones como alternativa para tener agua recirculada de mayor calidad en las plantas metalúrgicas, encontrando que productos generados por las bacterias como el amonio pueden promover mejores recuperaciones para minerales de cobre (Sepúlveda *et al.*, 2021).

En general en la minería se ha avanzado en estudios en busca de generar reactivos específicos, como es el caso de depresantes (disminuyen la flotabilidad de gangas) a partir de *Rhodophyceae* (Zhou *et al.*, 2020), y de forma bastante generalizada se han desarrollado proyectos en búsqueda de microorganismos presentes en yacimientos para mejorar procesos de lixiviación de minerales de carácter refractario tal como lo presentan

Brierley & Brierley, (2013); Olson *et al.*, (2003), Pradhan *et al.*, (2008); Rohwerder *et al.*, (2003); Watling, (2006); y Zhao *et al.*, (2015).

Por estas razones, pensar en usar cualquier tipo de agua sin evaluar detalles relacionados con iones presentes o poblaciones bacterianas, así como los subproductos que se pueden generar en los ciclos digestivos, tiene un riesgo alto porque puede afectar la recuperación del mineral, lo que va directamente asociado a la necesidad de procesar mayor cantidad de toneladas para obtener la misma cantidad de concentrado y, por ende, a un mayor consumo de agua.

ESTRATEGIAS PARA EL AUMENTO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN LAS REGIONES ÁRIDAS DE CHILE

En la actualidad, existen variadas estrategias que permiten a la industria minera acceder a recursos hídricos con diferentes calidades, dependiendo de las regiones del país en las que se encuentre y de la disponibilidad de agua para su uso. En este sentido, hay diferentes puntos de vista respecto a que tan pertinente o no es que la industria minera utilice los recursos cercanos, a cambio de generar asociaciones con empresas distribuidoras de agua para que den acceso a agua potable a partir de procesos de desalinización a las comunidades y a otras industrias.

En este contexto, existen alternativas que se han implementado en zonas como la región de Antofagasta, que tradicionalmente ha presentado problemas con la calidad del agua para consumo, debido a que las fuentes de agua naturales contienen altos contenidos de iones potencialmente malos para la salud, como es el caso del arsénico en concentraciones superiores a las permitidas por las normas. Es por esto por lo que se han desarrollado alternativas de sustitución, entregando agua continental a la industria minera y se ha abastecido parte de la demanda de agua con agua de mar desalinizada, proceso mediante el cual se puede tener agua con calidad adecuada para el consumo humano, riego y consumo para los animales.

En la misma región, se desarrolló en el 2010 un estudio que buscó desarrollar tecnologías para la producción de agua con calidad industrial en minería metálica a partir de agua con calidad secundaria. Se evaluaron

diferentes fuentes de agua, como es el caso de efluentes de plantas de tratamiento, y se plantearon alternativas que permitirán tener mayor disponibilidad de agua subterránea y superficial disminuyendo la descarga de contaminantes a los cuerpos de agua naturales, teniendo como resultado agua con calidad suficiente como para ser utilizada en procesos industriales.

Sin embargo, la creciente demanda de agua para el consumo humano, la agricultura y la minería hace necesario tener enfoques en los cuales se tengan múltiples fuentes de abastecimiento y se promueva la disminución de riesgos a la salud por consumo, riego o contaminación por transferencia a los alimentos. En este sentido, el uso de agua de mar desalinizada para potabilizar y para riego puede promover el aumento de disponibilidad de agua en las zonas bajas y libera agua de la zona de la cordillera que puede usarse en la minería donde las concentraciones de iones presentes como boro, arsénico y otros metales no generan efectos negativos aun reportados en los procesos metalúrgicos.

Existen otras alternativas que han buscado aumentar la disponibilidad de agua para las diferentes aplicaciones, entre ellas se ha planteado la posibilidad de reutilizar las aguas residuales después de ser tratadas, en lugar de verterlas a los cauces de agua. Existen experiencias como la de Aguas de Chañar y minera Candelaria quienes implementaron desde el 2008 la venta de efluentes de la planta de tratamiento de agua de Copiapó a la minera, permitiendo de esta forma que supliera parte de su demanda de agua y disminuyera su consumo desde la cordillera para tener una mayor disponibilidad de agua para otras aplicaciones.

Recientemente se han planteado nuevas alternativas de intercambio de agua, ofreciendo agua desalinizada para el consumo humano y permitiendo que las empresas ubicadas en la zona alta de la cordillera puedan usar los recursos cercanos. Alternativas que han tenido posiciones a favor y en contra desde los diferentes actores implicados.

CONCLUSIONES

La necesidad de agua para el consumo humano, la agricultura, la minería y demás actividades en las que se requiere este recurso hace que se requiera buscar alternativas para aumentar la disponibilidad a partir de la reutilización del recurso existente, dando un uso responsable y adecuado.

Se debe tener en cuenta que en general el recurso de mayor calidad y con menor concentración de contaminantes debe ser utilizado para el consumo humano, animales y riego, dejando el agua que presenta mayor cantidad de iones para aplicaciones específicas agrícolas respetando la normativa existente y, por último, las actividades industriales. Esto no significa que no se prioricen recursos hídricos para estas actividades, sino que se busca utilizar agua de menor calidad para el uso industrial, donde se pueden desarrollar reactivos y optimizan los procesos para que la presencia de diferentes iones no afecte la productividad.

Finalmente, las condiciones climáticas, la necesidad de causar menor impacto ambiental, la generación de riqueza a partir de la explotación minera, la agricultura y otras actividades industriales nos debe llegar a evaluar la posibilidad de buscar alternativas que permitan tener la máxima disponibilidad de recurso a la que podamos acceder y darle un uso adecuado y responsable, teniendo siempre en la mira la posibilidad de un reuso responsable y la disponibilidad en cada zona geográfica.

REFERENCIAS

- Brierley, C. L., & Brierley, J. A. 2013. Progress in bioleaching: Part B: Applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(17), 7543–7552.
- Castillo, I., Gutierrez, L., Hernandez, V., Diaz, E., & Ramirez, A. 2020. Hemicelluloses monosaccharides and their effect on molybdenite flotation. *Powder Technology*, 373, 758–764.
- COCHILCO. 2018. Proyección de la producción de cobre en Chile 2018 – 2029. In Dirección de Estudios y Políticas Públicas. Disponible en: [https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases de Datos/Bases-de-Datos.aspx](https://www.cochilco.cl/Paginas/Estadisticas/Bases%20de%20Datos/Bases-de-Datos.aspx)
- COCHILCO. 2020. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031. *Dirección de Estudios y Políticas Públicas*, DEPP 27/20, 1–36. Disponible en: <https://www.mch.cl/reportes/informe-proyeccion-de-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-2014-2025/>
- Concha A., F. 2014. Solid-Liquid Separation in the Mining Industry (Vol. 105, Issue (1976)). Springer International Publishing.
- Concha A., F., Amaya, A., & Marcelo, V. 2020. Minería, energía y agua - situación actual. Serie Comunicacional, CRHIAM, N°4.
- Concha, F., Rulyov, N. N., & Laskowski, J. S. 2012. Settling velocities of particulate systems 18: Solid flux density determination by ultra-flocculation. *International Journal of Mineral Processing*, 104–105, 53–57.
- Consejo minero. 2021. Cifras actualizadas de la minería. Disponible en: <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>
- DGA. 2017. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile: Resumen Ejecutivo. S.I.T. No 419.
- Estrada, D., Echeverry, L., Ramirez, A., & Gutierrez, L. 2020. Molybdenite flotation in the presence of a polyacrylamide of low anionicity subjected to different conditions of mechanical shearing. *Minerals*, 10(10), 1–12.

- Farrokhpay, S., & Ndlovu, B. 2013. Effect of Phyllosilicate Minerals on the Rheology, Colloidal and Flotation Behaviour of Chalcopyrite Mineral. Chemeca 2013: Australasian Conference on Chemical Engineering, 1–7.
- Forbes, E., Davey, K. J., & Smith, L. 2014. Decoupling rheology and slime coatings effect on the natural flotability of chalcopyrite in a clay-rich flotation pulp. *Minerals Engineering*, 56, 136–144.
- Hirajima, T., Miki, H., Suyantara, G. P. W., Matsuoka, H., Elmahdy, A. M., Sasaki, K., Imaizumi, Y., & Kuroiwa, S. 2017. Selective flotation of chalcopyrite and molybdenite with H₂O₂ oxidation. *Minerals Engineering*, 100, 83–92.
- INN. 2020. Norma chilena (NCh) 1333. Requisitos de calidad de agua para diferentes usos. Norma Chilena Oficial, 15. Disponible: <https://five.epicollect.net/>
- Laskowski, J., & Castro, S. 2015. Flotation in concentrated electrolyte solutions. *International Journal of Mineral Processing*, 144, 50–55.
- Laskowski, J. S., Castro, S., & Gutierrez, L. 2019. Flotation in Seawater. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 36(1), 89–98.
- Liu, W., Moran, C. J., & Vink, S. 2013. Mechanism study of the impact of water-borne bacteria on flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 39–45.
- Melipichun, C., & Gutierrez, L. 2014. Influence of clays on induction time, floatability and foam stability in the process of flotation of copper sulphide minerals. IMPC 2014 - 27th International Mineral Processing Congress, 1–9.
- Ministerio de Salud. 2021. Decreto 735. 1969, 1–15.
- MOP-Hidrica consultores spa y aquelarre ingenieros ltda. 2017a. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile: Volumen II.
- MOP-HMOP-Hidrica consultores spa y aquelarre ingenieros ltda. 2017 b. Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile: Volumen I.

- Moyo, P., Gomez, C. O., & Finch, J. A. 2007. Characterizing frothers using water carrying rate. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 46(3), 215–220.
- Ndlovu, B., Farrokhpay, S., & Bradshaw, D. 2013. The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 149–156.
- ODEPA. 2019. Panorama de la agricultura Chilena (Chilean agriculture overview).
- Olson, G. J., Brierley, J. A., & Brierley, C. L. 2003. Bioleaching review part B: Progress in bioleaching: Applications of microbial processes by the minerals industries. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(3), 249–257.
- Park, J. H., Oh, C., Han, Y. S., & Ji, S. W. 2016. Optimizing the addition of flocculants for recycling mineral-processing wastewater. *Geosystem Engineering*, 19(2), 83–88.
- Pradhan, N., Nathsarma, K. C., Srinivasa Rao, K., Sukla, L. B., & Mishra, B. K. 2008. Heap bioleaching of chalcopyrite: A review. *Minerals Engineering*, 21(5), 355–365.
- Ramirez, A. D., Rojas, A., Gutierrez, L., & Laskowski, J. S. 2018. Sodium hexametaphosphate and sodium silicate as dispersants to reduce the negative effect of kaolinite on the flotation of chalcopyrite in seawater. *Minerals Engineering*, 125 10–14.
- Ramirez, A., Gutierrez, L., & Laskowski, J. S. 2020. Use of "oily bubbles" and dispersants in flotation of molybdenite in fresh and seawater. *Minerals Engineering*, 148.
- Ramirez, A., Gutierrez, L., Vega-Garcia, D., & Reyes-Bozo, L. 2020. The depressing effect of kaolinite on molybdenite flotation in seawater. *Minerals*, 10(6), 1–14.
- Rohwerder, T., Gehrke, T., Kinzler, K., & Sand, W. 2003. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 63(3), 239–248.

- San Martín Robbiano, F. 2018. Bio-depression of pyrite with acidithiobacillus ferrooxidans in seawater flotation [Universidad de Chile]. In Facultad de ingeniería (Ed.), Tesis para optar al grado de doctor en ingeniería de minas (Vol. 1). Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152822>
- Sepúlveda, S., Duarte-Nass, C., Rivas, M., Azócar, L., Ramírez, A., Toledo-Alarcón, J., Gutiérrez, L., Jeison, D., & Torres-Aravena, Á. 2021. Testing the capacity of staphylococcus equorum for calcium and copper removal through MICP process. *Minerals*, 11(8).
- U.S. Geological Survey. 2021. Mineral Commodity Summaries 2021 : Sand and Gravel (Industrial).
- Uribe, L., Gutierrez, L., & Jerez, O. 2016. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. Review An International Journal The Depressing Effect of Clay Minerals on the Floatability of Chalcopyrite.
- Watling, H. R. 2006. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review. *Hydrometallurgy*, 84(1-2), 81-108.
- World Wide Fund For Nature (WWF). 2021. Día de la sobrecapacidad de la tierra Disponible en: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/informe_planeta_vivo_ipv/huella_ecologica/dia_de_la_sobrecapacidad_de_la_tierra/
- Yang, H., Li, T., Tang, Q., Wang, C., & Ma, W. 2013. Development of a bio-based collector by isolating a bacterial strain using flotation and culturing techniques. *International Journal of Mineral Processing*, 123, 145-151.
- Zhao, H., Wang, J., Gan, X., Zheng, X., Tao, L., Hu, M., Li, Y., Qin, W., & Qiu, G. 2015. Effects of pyrite and bornite on bioleaching of two different types of chalcopyrite in the presence of *Leptospirillum ferriphilum*. *Bioresource Technology*, 194, 28-35.
- Zhou, H., Zhang, Z., Ou, L., & Mai, Q. 2020. Flotation separation of chalcopyrite from talc using a new depressant carrageenan. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 603.



Universidad de Concepción

CALIDAD DEL AGUA Y SU USO EN LA MINERÍA

Andrés Ramírez / Leopoldo Gutiérrez / José Luis Arumí

Serie Comunicacional CRHIAM

