



Universidad de Concepción

# CALIDAD DEL AGUA RECIRCULADA EN OPERACIONES MINERAS. MEJORAMIENTO MEDIANTE MICROESFERAS DE VIDRIO QUÍMICAMENTE FUNCIONALIZADAS

Kevin Pérez Salinas / Ricardo Jeldres Valenzuela / Pedro G. Toledo / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM

Escasez Hídrica  
Huella del Agua Sequía  
Servicios Ecosistémicos  
Calidad del agua  
Agricultura  
Cambio Climático  
Ecosistemas  
Comunidades  
Agua Minería  
Recursos Hídricos  
Tecnología  
Innovación  
Investigación  
Reutilización de aguas  
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 recirculada en operaciones mineras.

Mejoramiento mediante microesferas de vidrio  
químicamente funcionalizadas.

Kevin Pérez Salinas, Ricardo Jeldres Valenzuela,

Pedro G. Toledo y Leopoldo Gutiérrez.

Junio 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](http://www.crhiam.cl)



Universidad de Concepción

# **CALIDAD DEL AGUA RECIRCULADA EN OPERACIONES MINERAS. MEJORAMIENTO MEDIANTE MICROESFERAS DE VIDRIO QUÍMICAMENTE FUNCIONALIZADAS**

Kevin Pérez Salinas / Ricardo Jeldres Valenzuela / Pedro G. Toledo / Leopoldo Gutiérrez

# **CALIDAD DEL AGUA RECIRCULADA EN OPERACIONES MINERAS. MEJORAMIENTO MEDIANTE MICROESFERAS DE VIDRIO QUÍMICAMENTE FUNCIONALIZADAS.**

## **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



### **Kevin Pérez Salinas**

Ingeniero Civil Metalúrgico.  
Magister en Ciencias de la Ingeniería  
mención Metalurgia,  
Universidad Católica del Norte.  
Estudiante de Doctorado en  
Procesamiento de Minerales,  
Universidad de Antofagasta.



### **Ricardo Jeldres Valenzuela**

Ingeniero Civil Químico.  
Doctor en Ciencias de la Ingeniería  
mención en Ingeniería Química,  
Universidad de Concepción.  
Académico Facultad de Ingeniería,  
Universidad de Antofagasta.  
Investigador Adjunto CRHIAM.



### **Pedro G. Toledo**

Ingeniero Civil Químico.  
PhD in Chemical Engineering,  
University of Minnesota, Estados Unidos.  
Profesor titular, Departamento de Ingeniería  
Química, Universidad de Concepción .  
Subdirector e investigador principal 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.

## GLOSARIO

- **Aluminol:** Grupo funcional del aluminio con un enlace -OH.
- **APTES:** 3-aminopropil trietoxisilano, aminosilano utilizado para la silanización de superficies sólidas.
- **Colector:** Aditivo químico que se une selectivamente a la superficie de los minerales de interés a fin de impartirles hidrofobicidad.
- **Desalinización:** Proceso mediante el cual se elimina la sal del agua de mar.
- **Espesador:** Tanque provisto de un mecanismo de agitación que permite separar una suspensión de sólidos o pulpa mediante la acción de la gravedad, los sólidos se concentran en el fondo y el agua sobrenadante una vez clarificada es recogida en el rebose del tanque para ser recirculada.
- **Ligandos:** Ion o molécula que se une a un átomo metálico central para formar un complejo. El enlace entre el metal y el ligando generalmente involucra la donación de uno o más pares de electrones del ligando.
- **Sobrenadante:** Líquido que queda en la parte superior de un tanque cuando se ha producido la decantación de una mezcla heterogénea.
- **Silanización:** Proceso químico mediante el cual se injertan moléculas de silano en la superficie de sólidos para que hacerlas hidrófobas.
- **Silano:** Compuesto químico consistente en una cadena de átomos de silicio unidos covalentemente a átomos de hidrógeno.
- **Silanol:** Grupo funcional del silicio con un enlace -OH.
- **Solución coloidal:** Mezclas no homogéneas compuestas por una fase dispersa, que casi siempre es un sólido con partículas muy pequeñas, y una fase dispersante o continua, que por lo general es líquida o gaseosa.

## RESUMEN

La presente Serie Comunicacional presenta una alternativa para mejorar la calidad del agua recirculada en los procesos mineros de cobre. La novedad es el uso de microesferas de vidrio modificadas químicamente que se agregan en espesadores, que son grandes tanques diseñados para separar agua de partículas sólidas. El agua una vez clarificada se recircula al proceso y los sólidos se trasladan a su destino final en tranques de relave. La serie comienza colocando en perspectiva la importancia de la minería para Chile, las problemáticas que generan el uso de agua en las comunidades aledañas a las plantas, las alternativas de recursos que se aplican actualmente, los efectos colaterales de las fuentes alternativas de agua, las metodologías para recuperar el agua en la industria del cobre y finalmente el impacto de usar agua de mala calidad.

---

## INTRODUCCIÓN

La minería del cobre es la principal actividad minera de Chile, que aporta un 10% del producto interno bruto (PIB) y, además, es responsable de cerca de un tercio de la producción mundial de este metal. La mayor parte de las actividades mineras del país se ubican en la zona del Norte Grande, donde existen grandes depósitos y, desafortunadamente, muy poca agua, por eso el uso eficiente de este recurso es uno de los principales desafíos de este sector productivo. Según las proyecciones de Cochilco al año 2028, la producción de concentrados de cobre aumentará su contribución al cobre total producido desde 70,1% a 91,4%, sin embargo esta área de procesos representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales. El uso sustentable del agua involucra principalmente maximizar la recirculación, actualmente entre 72 y 74%, que en el caso de las plantas de concentración de minerales se realiza mediante operaciones de espesamiento, filtrado y disposición final de sólidos descartados en tranques de relave.

Como el agua es el elemento clave para efectuar las operaciones mineras, en zonas áridas se generan mayores conflictos ambientales, sociales y económicos (Toro *et al.*, 2019; Tundisi, 2008). Si bien la minería solo utiliza un 4% del suministro de agua fresca en Chile, las empresas mineras están ubicadas en el norte del país, donde existen muchos depósitos de cobre,

hierro, molibdeno, oro, plata, una zona particularmente árida debido a su altitud, por lo que esta escasez se vuelve un factor importante a considerar para la correcta operación de estas empresas y, por lo tanto, es necesario buscar nuevas alternativas para suplir este recurso o mejorar la eficiencia de recuperación de agua para recircular a las plantas mineras (Cisternas y Gálvez, 2018).

En el año 2017, la comisión chilena de cobre (Cochilco) realizó un catastro donde los datos observados arrojaron que la minería utiliza 13.26 m<sup>3</sup>/seg de agua continental, 3.16 m<sup>3</sup>/seg de agua de mar y 38.07 m<sup>3</sup>/seg de agua recirculada desde operaciones como espesamiento (Cochilco, 2018). Luego, en el año 2019, realizó proyecciones sobre el uso de agua considerando todos los proyectos de plantas desalinizadoras que tienen las empresas mineras, lo que generaría un aumento de consumo de hasta 11 m<sup>3</sup>/seg para el año 2030 (Cochilco, 2019). Si bien el agua de mar alimentará a gran parte de la minería en Chile, no todas las empresas cuentan con un capital para invertir en plantas desalinizadoras, por lo que tendrán que adaptar sus procesos (reactivos, infraestructura y equipos) para operar con agua de mar sin desalinizar, la cual contiene un alto contenido de iones como cloruro, carbonatos cálcicos, flúor, litio, sodio, potasio, magnesio, entre otros (Millero, 2010; Wright *et al.*, 2011). Entre los desafíos restantes quedan los problemas operacionales en la etapa de espesamiento (de concentrados y relaves), según Cochilco se recircula 38.07 m<sup>3</sup>/seg de agua, por lo que esta etapa es importante ante la problemática de escasez hídrica.

---

## ESCASEZ HÍDRICA EN REGIONES MINERAS

La escasez de agua es considerada la amenaza más crítica que enfrenta la humanidad (Alvez *et al.*, 2020). La minería es una actividad económica que consume grandes cantidades de agua, sin embargo, desde una perspectiva global, la minería usa pequeñas cantidades de agua comparada con otras actividades económicas. Esta tendencia se replica incluso en ecosistemas áridos famosos por su minería, como por ejemplo, Australia, Chile y Sudáfrica donde el consumo de agua en minería es solo 2-4,5% de la demanda nacional. Sin embargo, cuando existe una instalación minera en lugares con escasez hídrica, de todas

maneras impacta negativamente a las comunidades regionales (Gunson *et al.*, 2012). En Chile, país gravemente afectado por la escasez de agua, cada vez más se impulsan políticas que fomenten el uso de agua de mar. La falta de agua en las regiones del centro y norte de Chile ha generado conflicto entre sectores, degradación ambiental e impactos en el desarrollo social y económico (Alvez *et al.*, 2020). Por ejemplo, en la región de Antofagasta, lugar clave para la producción mundial de cobre, la minería representa el 64,1% del uso total de agua (Gilsbach *et al.*, 2019).

En los últimos años las comunidades y el gobierno han animado a las compañías mineras del mundo a avanzar en su desarrollo sustentable para reducir el consumo de agua, energía y contaminación en sus operaciones, llegando a discutir cambios en las legislaciones locales para promover operaciones más sustentables que chocan con barreras económicas y técnicas que complican su implementación (Soni y Wolkersdorfer, 2016; van Berkel, 2007). Las compañías mineras, para mejorar la eficiencia en el uso del agua, tienen múltiples alternativas como la reutilización del agua, reducción de la pérdida de agua por evaporación y disminución del contenido de agua en los concentrados y relaves (Gunson *et al.*, 2012).

Entre las estrategias para reducir el consumo de agua destacan (Gunson *et al.*, 2012):

- Reducir el área húmeda en los depósitos de relaves.
- Reducir la generación arcillas finas durante la molienda para disminuir la retención de agua en los relaves.
- Mejorar el rendimiento de los espesadores de relaves.
- Reducir pérdidas de agua en los depósitos de relaves espesados y en pasta (drenaje).
- Realizar filtración a los relaves.
- Reducir la evaporación cubriendo los estanques, espesador, depósitos de relaves, etc.

Numerosas mineras utilizan espesadores para reutilizar el agua, lo que aumenta la densidad y la concentración de sólidos en la pulpa que se descarga del espesador, por ende, reduce la cantidad de agua contenida en los relaves y la pérdida de agua por evaporación, retención y drenaje.

La escasez hídrica no es un problema que impacta solo a la minería del cobre, ya que la minería del litio también enfrenta desafíos similares. El litio se extrae desde el llamado Triángulo Sudamericano del Litio, una región que limita con Chile, Bolivia y Argentina, posee el 57% de los

recursos de litio del mundo. Esta área se caracteriza por interacciones socio ecológicas complejas y sustenta puntos críticos de biodiversidad, medios de vida comunitarios y un rico patrimonio cultural indígena. Las preocupaciones de sostenibilidad de la minería de litio se relacionan principalmente con las amenazas a la hidrodinámica local, la riqueza de flora y fauna, la biodiversidad y el bienestar social (Liu y Agusdinata, 2020). El incremento en el precio del litio, el crecimiento de la producción y, por ende, el aumento de los permisos mineros otorgados por la autoridad de gobierno redundan en mayor consumo de agua que ya es muy limitada, agravando las tensiones sociales entre las empresas mineras y las comunidades locales. Este cambio simultáneo en el suministro de agua de Chile y el aumento de la demanda, ha contribuido a una tendencia de conflicto comunitario por este recurso en las regiones mineras, como protestas, huelgas de hambre y bloqueo de carreteras (Odell, 2021).

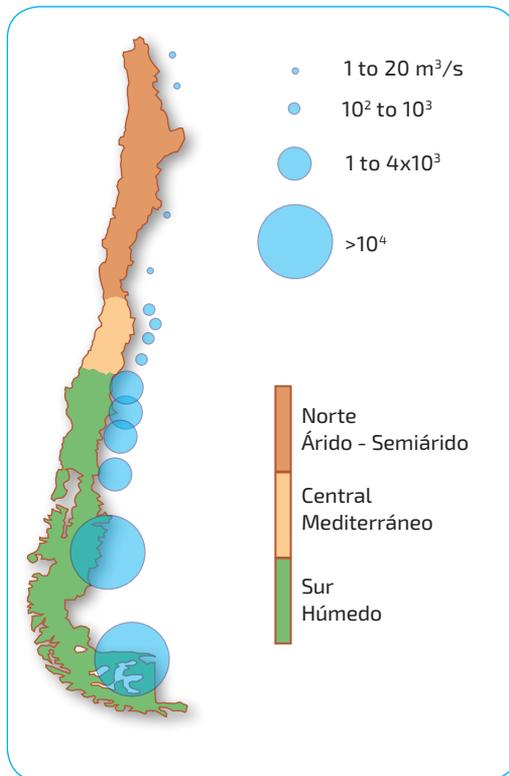


Figura 1.

Disponibilidad de agua por región en Chile.

Fuente: Santoro *et al.*, (2021).

## RECURSOS HÍDRICOS ALTERNATIVOS

El agua de la mina tiene una amplia gama de usos, que incluyen producción de energía y agua potable, según la calidad de esta agua. Si está contaminada o demasiado mineralizada, todavía es posible su uso siempre que la cantidad disponible sea adecuada. En algunas minas, el agua se utiliza para actividades agrícolas y de riego, y como suministro para las comunidades vecinas (Idowu *et al.*, 2008; Soni & Wolkersdorfer, 2016).

Reconociendo la necesidad urgente de encontrar soluciones a la escasez hídrica, las Naciones Unidas han subrayado la importancia del desarrollo de capacidades en torno a fuentes de agua no convencionales, como el agua de mar, para aliviar el estrés hídrico y alcanzar los objetivos de desarrollo sostenible (Alvez *et al.*, 2020). Otra alternativa complementaria es el aprovechamiento de agua de minas subterráneas, agua superficial en minas a cielo abierto y exceso de agua en instalaciones de almacenamiento de relaves o pilas de desmonte, que requiere tecnologías como sistemas de membrana avanzados, sistemas de nanofiltración y sistemas de oxidación avanzados, también denominados "sistemas inteligentes de gestión del agua de mina", que garantizan, incluso en condiciones variables, que se puedan cumplir los requisitos de descarga medioambiental.

El agua de mar desalinizada es cada vez más importante en Chile debido a la proximidad de las áreas industriales a la costa y al suministro ilimitado de este recurso. Sin embargo, los altos costos de capital y operación han limitado la adopción de la tecnología. En Chile, las plantas desaladoras existentes están todas ubicadas en el norte. En el año 2016 había dieciocho plantas operando a lo largo de la costa, muchas de las cuales están cerca de pueblos y ciudades, aunque la mayoría tiende a estar relativamente lejos de las minas. Trece de estas plantas suministran agua a minas, las otras cinco producen agua potable. La capacidad total actual de desalinización es de unos 7,8 m<sup>3</sup>/s, con 83% para operaciones mineras y 17% para agua potable (Alvez *et al.*, 2020).

La salmuera, o agua salada concentrada producida como desecho durante el proceso de desalinización, también es motivo de preocupación. Se estima que, en promedio, se producen aproximadamente 1,5 unidades de salmuera por cada unidad de agua desalinizada o 141,5 millones de m<sup>3</sup>/día, y lo más probable es que se eliminen en el océano. La salinidad

de la salmuera hace que se concentre a lo largo del fondo del océano reduciendo los niveles de oxígeno disuelto en el agua, lo que provoca daños a los organismos bénticos que se propagan a lo largo de la cadena alimentaria oceánica (Odell, 2021).

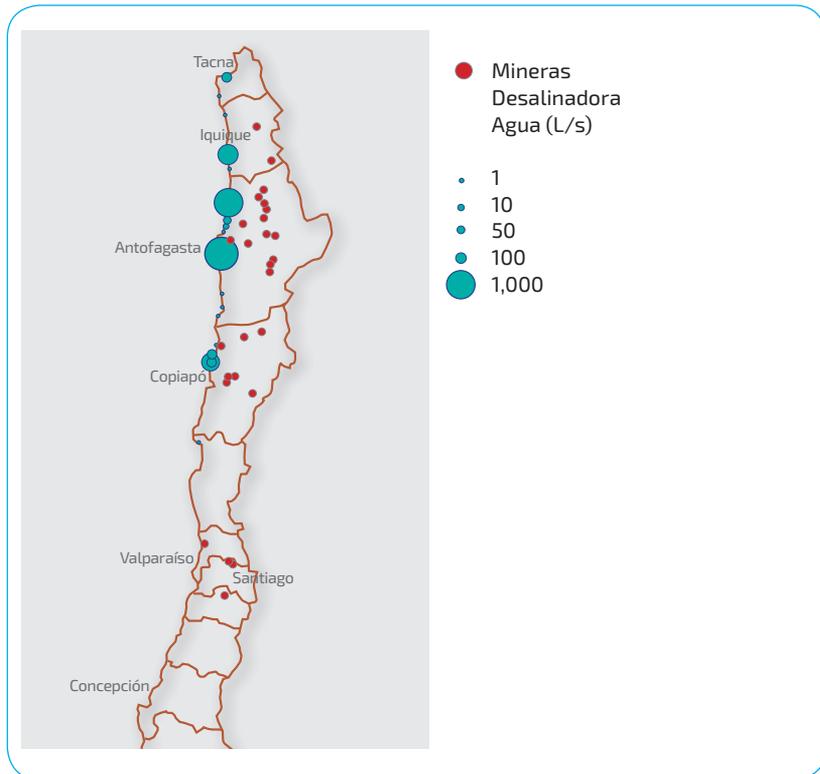


Figura 2.

Plantas desalinizadoras y compañías mineras en el norte de Chile.  
Fuente: Alvez *et al.*, (2020).

## SEDIMENTACIÓN

La sedimentación consiste en la separación de partículas sólidas desde el líquido que las contiene debido a la acción de la gravedad. Generalmente, el objetivo es la recuperación de agua clarificada. Lo típico es la obtención de un efluente clarificado y un fango cuya concentración de sólidos debe ser tal que permita su tratamiento y manejo (Garmsiri y Nosrati, 2019). La sedimentación es la clave tras la gran mayoría de métodos y unidades de tratamiento de agua y aguas residuales a escala doméstica e industrial. Existen varios tipos de floculación dependiendo de la concentración de sólidos y del grado de interacción de las partículas. Los tipos incluyen sedimentación discreta, floculenta, retardada, por compresión y químicamente asistida. A continuación se entrega una breve descripción de cada tipo:

- a) **Sedimentación discreta:** Se refiere a la sedimentación de las partículas de una suspensión con baja concentración de sólidos. Las partículas sedimentan como entidades individuales sin interacción sustantiva con partículas vecinas (Tchobanoglous, 1998).
- b) **Sedimentación floculenta:** En algunas suspensiones diluidas, las partículas se agregan o floculan espontáneamente y luego sedimentan. En el proceso se forman agregados o flóculos pesados que sedimentan a mayor velocidad.
- c) **Sedimentación retardada:** También es conocida como sedimentación obstaculizada o sedimentación zonal. Ocurre en suspensiones de concentración intermedia. Las fuerzas entre partículas son suficientes para entorpecer la sedimentación de las partículas vecinas. Las partículas tienden a permanecer en posiciones relativas fijas, y la masa de partículas sedimenta como unidad. Se desarrolla una interfase sólido-líquido en la parte superior de la masa que sedimenta.
- d) **Sedimentación por compresión:** Ocurre en suspensiones tan concentradas que las partículas desarrollan estructuras. En tales casos, la sedimentación ocurre por compresión debido al peso de las partículas que sedimentan desde el líquido sobrenadante. Generalmente se produce al fondo de una masa de lodos de gran espesor, tal como ocurre en el fondo de los sedimentadores secundarios profundos y en las instalaciones de espesamientos de lodos.

Este tipo de sedimentación es de tipo floculenta.

e) **Sedimentación asistida químicamente:** Este tipo de sedimentación es de tipo floculenta. En este caso, las partículas sólidas en el fluido no se comportan como partículas discretas, sino que tienden a agregarse unas a otras debido a la acción de uno o más aditivos químicos conocidos como coagulantes-floculantes. Conforme se produce la coalescencia o floculación, la masa de partículas aumenta, y como consecuencia se deposita a mayor velocidad. La floculación depende de la posibilidad de contacto entre las diferentes partículas, que a su vez se vincula con la carga de superficie, la profundidad del tanque, el gradiente de velocidad del sistema, y la concentración y tamaño de las partículas.

Lo común es que estos mecanismos prevalezcan a distintas alturas del espesador lo que no impide que algunos se superpongan. La Figura 3 muestra una representación esquemática de los distintos tipos de sedimentación, los mecanismos y las zonas más probables donde pueden ocurrir.

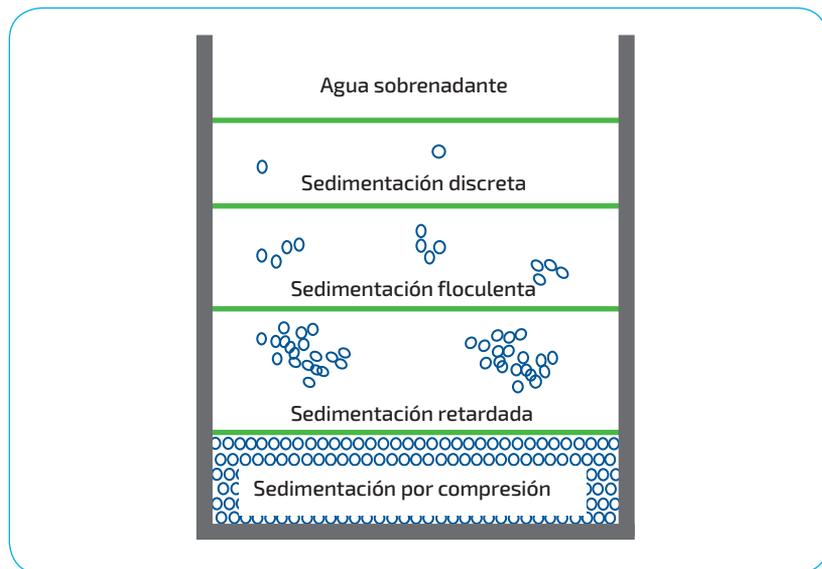


Figura 3.

Tipos de sedimentación y zonas de ocurrencia más probables en un espesador. Fuente: Elaboración propia.

En los últimos años se ha acumulado información valiosa sobre las condiciones que aumentan la cantidad de agua recuperada. Se ha examinado exhaustivamente el tipo y la dosis de reactivos, pH, tamaño de partículas, tipo de agua y tipo de minerales arcillosos, evaluando velocidades de sedimentación y propiedades reológicas de las pulpas en la descarga. Sin embargo, muy poca investigación ha sido enfocada a la calidad del agua recuperada, situación que debe cambiar rápidamente, porque el agua que retorna al proceso es turbia y arrastra reactivos como floculantes residuales, que luego alteran la superficie de los minerales en las etapas de recuperación, afectando los rendimientos y la sostenibilidad de los procesos. De manera urgente se requieren alternativas operacionales que mejoren la calidad de agua, en especial que reduzcan rápidamente el contenido de partículas finas que no sedimentan en los espesadores.

---

## IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DE AGUA RECIRCULADA

Los cambios en la calidad del agua recirculada en las plantas de procesamiento de minerales pueden comprometer gravemente el rendimiento de la planta, así como los requerimientos de mantención. Por eso, el monitoreo de la calidad del agua se ha convertido en uno de los mayores desafíos de la industria minera (Khanh Le *et al.*, 2020). Se ha demostrado que el tipo de mineral y la calidad del agua son parámetros que afectan directamente el rendimiento de las concentradoras, en particular la flotación por espuma (Farrokhpay & Zanin, 2012). El agua fresca se caracteriza por una baja cantidad de sólidos totales disueltos (TDS) y una alta estabilidad debido a la baja concentración de compuestos químicos, sin embargo, las aguas que recirculan se caracterizan por un alto contenido de TDS, altos niveles de sólidos en suspensión y reactividades particularmente altas (Dharmappa *et al.*, 1998). Hasta ahora, los sistemas de monitoreo se enfocan principalmente en cumplir con las normas ambientales establecidas en los permisos ambientales y de operación de las minas.

## MICROESFERAS DE VIDRIO PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AGUA RECUPERADA

Las microesferas de vidrio se componen principalmente de óxido de silicio y óxido de aluminio y, en algunos casos, contienen otros elementos que mejoran algunas de sus propiedades como la conductividad térmica y eléctrica (Bu *et al.*, 2020; Jiao *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2011). Las microesferas de vidrio huecas con superficies químicamente modificadas, son utilizadas como agente de flotación para la remoción de hasta un 95% de cationes metálicos como cadmio, cobalto, plomo y cobre (Deng *et al.*, 2020) y también como agente de limpieza de tintes aniónicos (An *et al.*, 2020). La modificación de las superficies de vidrio u otras se logra mediante adsorción de moléculas relativamente grandes, ricas en grupos funcionales, desde una solución acuosa. Estas moléculas literalmente son injertadas en las superficies sólidas mediante enlaces iónicos, covalentes, o simplemente puentes hidrógeno.

Cuando la adsorción es completa y la superficie queda totalmente cubierta, se dice que las moléculas injertadas forman una monocapa o una multicapa autoensamblada, termodinámicamente estable (se mantiene en el tiempo). Actualmente, APTES es el agente silanizante preferido sobre vidrio, silicio y derivados del silicio como nitruro de ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) para inmovilizar biomoléculas.

En esta Serie, interesan especialmente las microesferas de vidrio huecas con superficie externa químicamente modificada para interactuar con los sitios activos de las arcillas presentes en aguas de proceso, y que son mayoritariamente responsables de los altos TDS (*Total Dissolved Solids*) del agua que retardan su recirculación al proceso. Las microesferas de este tipo, que son referidas comúnmente como microesferas funcionalizadas, actúan como un colector de partículas de arcillas, en palabras sencillas operan como "imanes" para las arcillas, permitiendo su concentración y extracción mediante una etapa o proceso de flotación. Para la modificación de la superficie de las microesferas existen varias moléculas o reactivos, entre otros, glutaraldehído (GA) (Huang *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2002; Ozmen *et al.*, 2009) y quitosano (Liu *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2002).

Primero es necesario conocer la estructura y composición química de la superficie de las arcillas. La más abundante en yacimientos minerales y depósitos de rocas es la caolinita. Es un silicato hidratado que se estructura

en capas, su composición es  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y su estructura es cristalina triclinica, con una lámina tetraédrica de sílice unida a través de átomos de oxígeno a una lámina octaédrica de alúmina. La morfología es laminar, con caras y aristas, y pseudohexagonal. Existe fuerte evidencia de que la caolinita adsorbe favorablemente agua, iones alcalinos y alcalinotérreos, iones de metales pesados, monómeros simples, azúcares, hidrocarburos saturados y macromoléculas orgánicas polares y que sus aristas o bordes son más reactivas que sus cara basales. El plano (cara) de siloxano basal es la superficie menos reactiva de la caolinita; es fuertemente hidrofóbico y como tal repele las moléculas de agua generando una especie de vacío. La Figura 4 muestra la disposición de los grupos superficiales para cada cara y plano de caolinita. En la cara basal octahédrica y en los bordes de gibsita abundan los grupos aluminol ( $-\text{AlOH}$ ) y silanol ( $-\text{SiOH}$ ). Estos grupos son especialmente interesantes porque son los que pueden reaccionar con el grupo  $-\text{NH}_2$  del APTES.

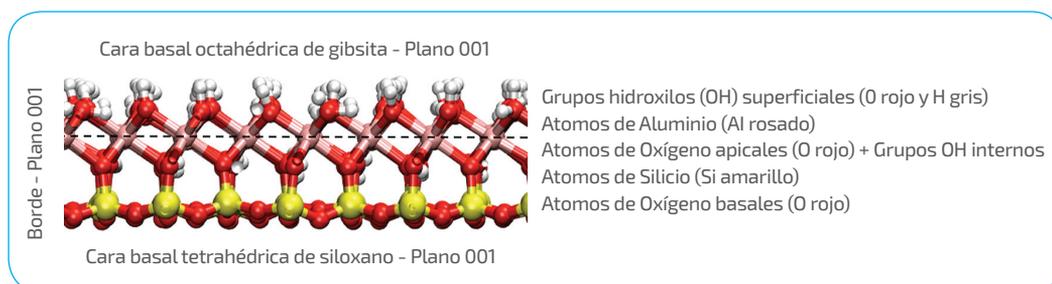


Figura 4.

Estructura y composición de caolinita. Planos y bordes.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5, que se muestra a continuación, grafica la molécula de APES y un dibujo esquemático de la adsorción sobre una microesfera de vidrio. En el proceso, las moléculas de APTES sufren hidrólisis y condensación hasta polimerizar en una gran molécula que mantiene los grupos  $-\text{NH}_2$  originales de cada monómero y transforma los radicales alifáticos ( $-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ ) en silanoles ( $-\text{SiOH}$ ). Estos últimos tienen gran afinidad por los grupos  $-\text{SiOH}$  y  $-\text{AlOH}$  en la superficie de las partículas de arcilla uniéndolos para siempre, como se muestra en el esquemático de la Figura 6. Se podría especular que esta unión de puente pasa a una más irreversible de los tipos N-Si y N-Al con liberación de agua.

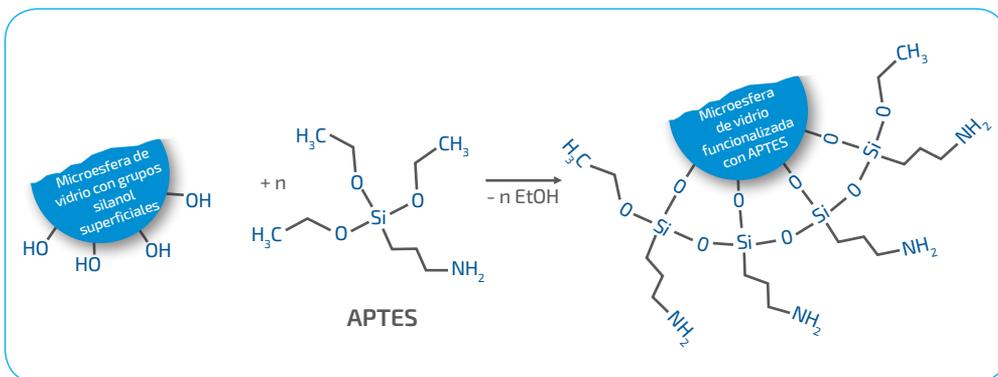


Figura 5.

Silanización de una microesfera de vidrio mediante APTES.  
Fuente: Elaboración propia.

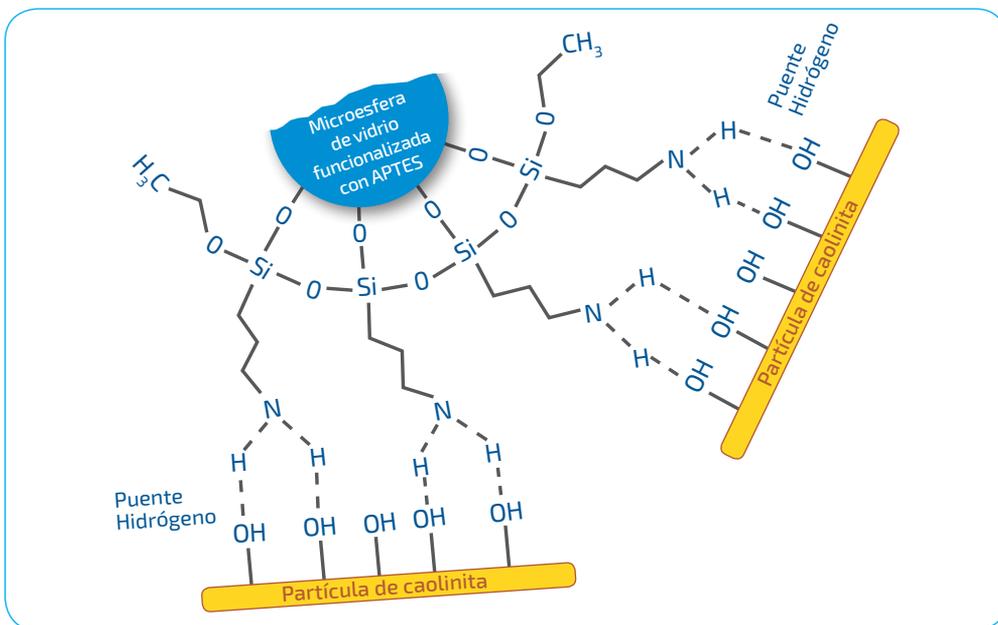


Figura 6.

Dibujó esquemático del mecanismo de "secuestro" de partículas de caolinita mediante microesferas de vidrio funcionalizadas con APTES.  
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados debieran ser de interés para la industria, especialmente porque el tratamiento con las microesferas de vidrio funcionalizadas reduce la turbiedad del agua entre 30 y 40 veces. La Tabla 1 resume resultados para el tratamiento de aguas de dos empresas mineras, Centinela y Escondida.

El desarrollo está listo para ser probado con agua de distintas empresas y para pruebas en plantas piloto. Creemos que es una buena noticia que llega justo a tiempo cuando las empresas necesitan aumentar la recirculación, disminuir el *make up* de agua, y clarificar mejor y más rápido. Los resultados de esta innovación contribuyen a la sustentabilidad hídrica de la industria minera y otras que recirculan aguas con contenido de arcillas.

**Tabla 1.**

Reducción de turbiedad de aguas industriales mediante flotación de arcillas con microesferas de vidrio funcionalizadas con APTES.

Fuente: Torrejón, (2019).

Origen Agua	pH	Al inicial mg/l	Al final mg/l	Turbiedad inicial NTU	Turbiedad final NTU
Centinela	6.9	1.0	0.05	90	3.4
Escondida	7.9	1.5	0.10	30	0.7

Al: Aluminio; NTU: Unidad nefelométrica de turbidez, expresada habitualmente con el acrónimo NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*).

## CONCLUSIONES

La escasez hídrica es una problemática a nivel global que impacta negativamente en la calidad de vida de las personas, este efecto se magnifica en las zonas más áridas de Chile donde se ubican los yacimientos mineros. La minería es la principal actividad económica del país, y justamente las empresas que explotan cobre, hierro y litio se ubican en las zonas donde hay menos disponibilidad de agua.

La producción minera de estos elementos tiene un consumo elevado del recurso hídrico, por lo que en general produce conflictos en el territorio. Para dar una solución a la problemática, las mineras deben buscar recursos alternativos de agua, los que se enfocan en uso de agua de mar (desalinizada y no desalinizada) y también en maximizar la recuperación de agua en sus procesos productivos para recircularla. Esto reduce pérdidas de este recursos en los relaves y concentrados (filtraciones, drenajes, evaporación, etc.). El aumento de la recirculación de agua es el principal factor de interés, sin embargo, no se debe descuidar el efecto que tiene la calidad de agua que recircula, que repercute en la concentración de los elementos valiosos, volviendo el proceso más ineficiente.

Una opción para mejorar la calidad del agua es el uso de microesferas de vidrio modificadas químicamente para capturar partículas finas que están presentes en el agua. El desarrollo está listo para ser implementado en procesos mineros e industriales aportando críticamente a la sostenibilidad de estas actividades.

## REFERENCIAS

- Alvez, A., Aitken, D., Rivera, D., Vergara, M., McIntyre, N., Concha, F. 2020. At the crossroads: can desalination be a suitable public policy solution to address water scarcity in Chile's mining zones? *Journal of Environmental Management*, 258, 110039.
- An, Y., Zheng, H., Yu, Z., Sun, Y., Wang, Y., Zhao, C., Ding, W. 2020. Functioned hollow glass microsphere as a self-floating adsorbent: Rapid and high-efficient removal of anionic dye. *Journal of Hazardous Materials*, 381, 120971.
- Araujo, Y. C., Toledo, P. G., Leon, V., Gonzalez, H. Y. 1995. Wettability of silane-treated glass slides as determined from X-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Colloid and Interface Science*, 176, 485-490.
- Arslan, G., Özmen, M., Gündüz, B., Zhang, X., Ersöz, M. 2006. Surface modification of glass beads with an aminosilane monolayer. *Turkish Journal of Chemistry*, 30(2), 203-210.
- Bigelow, W. C., Pickett, D. L., and Zisman, W. A. 1946. Oleophobic monolayers: I. Films adsorbed from solution in non-polar liquids. *Journal of Colloid Science*, 1, 513.
- Bu, F., Zhang, J., Yu, S., Li, Q., Li, G., Wang, J., Wu, X., Goto, T. 2020. Effective surface pretreatment of hollow glass microspheres via a combined KF roughening and alkali washing strategy for the following metallization. *Advanced Powder Technology*, 31(6), 2305-2314.
- Cisternas, L. A., Gálvez, E. D. 2018. The use of seawater in mining. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39(1), 18-33.
- Cochilco. 2018. Consumo De Agua En La Minería Del Cobre. Disponible en: <http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/agua/CONSUMO-DE-AGUA-EN-LA-MINERIA-DEL-COBRE-2011.pdf>
- Cochilco. 2019. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2019-2030.
- Deng, A., Yuan, J., Qi, C., Gao, Y. 2020. Hollow SiO<sub>2</sub> microspheres with thiol-rich surfaces: The scalable templated fabrication and their application for toxic metal ions adsorption. *Materials Chemistry and Physics*, 243, 122625.

- Dharmappa, H. B., Sivakumar, M., Singh, R. N. 1998. Wastewater characteristics, management and reuse in mining and mineral processing industries. *Wastewater Recycle, Reuse and Reclamation*, 1, 10. Disponible en: <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C07/E2-14-02-06.pdf>
- Farrokhpay, S., Zanin, M. 2012. An investigation into the effect of water quality on froth stability. *Advanced Powder Technology*, 23(4), 493–497.
- Garmsiri, M. R., Nosrati, A. 2019. Dewatering of copper flotation tailings: Effect of feed dilution on the thickener performance. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 40(2), 141–147.
- Gilsbach, L., Schütte, P., Franken, G. 2019. Applying water risk assessment methods in mining: Current challenges and opportunities. *Water Resources and Industry*, 22, 100118.
- Gunda, N. S. K., Singh, M., Norman, L., Kaur, K., Mitra, S. K. 2014. Optimization and characterization of biomolecule immobilization on silicon substrates using (3-aminopropyl)triethoxysilane (APTES) and glutaraldehyde linker. *Applied Surface Science*, 305, 522–530.
- Gunson, A. J., Klein, B., Veiga, M., Dunbar, S. 2012. Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21(1), 71–82.
- Huang, C., Huang, Z., Lv, X., Zhang, G., Wang, Q., Wang, B. 2017. Surface modification of hollow glass microsphere with different coupling agents for potential applications in phenolic syntactic foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(4).
- Idowu, O. A., Lorentz, S. A., Annandale, J. G., McCartney, M. P., Jovanovic, N. Z. 2008. Assessment of the impact of irrigation with low-quality mine water on virgin and rehabilitated soils in the upper olifants basin. *Mine Water and the Environment*, 27(1), 2–11.
- Jiao, C., Wang, H., Li, S., Chen, X. 2017. Fire hazard reduction of hollow glass microspheres in thermoplastic polyurethane composites. *Journal of Hazardous Materials*, 332, 176–184.
- Khanh Le, T. M., Miettinen, H., Bomberg, M., Schreithofer, N., Dahl, O. 2020. Challenges in the assessment of mining process water quality. *Minerals*, 10(11), 1–25.

- Li, B., Yuan, J., An, Z., Zhang, J. 2011. Effect of microstructure and physical parameters of hollow glass microsphere on insulation performance. *Materials Letters*, 65(12), 1992–1994.
- Liu, Tokura, S., Nishi, N., Sakairi, N. 2003. A novel method for immobilization of chitosan onto nonporous glass beads through a 1,3-thiazolidine linker. *Polymer*, 44(4), 1021–1026.
- Liu, W., Agusdinata, D. B. 2020. Interdependencies of lithium mining and communities sustainability in Salar de Atacama, Chile. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120838.
- Liu, X. D., Tokura, S., Haruki, M., Nishi, N., Sakairi, N. 2002. Surface modification of nonporous glass beads with chitosan and their adsorption property for transition metal ions. *Carbohydrate Polymers*, 49(2), 103–108.
- Maoz, R., Sagiv, J. 1984. On the formation and structure of self-assembling monolayers. I. A comparative ATR-wettability study of Langmuir-Blodgett and adsorbed films on flat substrates and glass microbeads. *Journal of Colloid and Interface Science*, 100(2), 465–496.
- Millero, F. 2010. History of the Equation of State of Seawater. *Oceanography*, 23(3), 18–33.
- Odell, S. D. 2021. Desalination in Chile's mining regions: Global drivers and local impacts of a technological fix to hydrosocial conflict. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129104.
- Ozmen, M., Can, K., Akin, I., Arslan, G., Tor, A., Cengeloglu, Y., Ersoz, M. 2009. Surface modification of glass beads with glutaraldehyde: Characterization and their adsorption property for metal ions. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1–3), 594–600.
- Santoro, S., Estay, H., Avci, A. H., Pugliese, L., Ruby-Figueroa, R., Garcia, A., Aquino, M., Nasirov, S., Straface, S., Curcio, E. 2021. Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm. *Cleaner Engineering and Technology*, 2.

- Soni, A. K., Wolkersdorfer, C. 2016. Mine water: policy perspective for improving water management in the mining environment with respect to developing economies. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 30(2), 115–127.
- Tian, S., Zhang, P., Fan, H., Chen, Y., Yan, J. 2018. Fabrication of retro-reflective polyurethane via covalently embedding with amino-functionalized glass microspheres. *Progress in Organic Coatings*, 115, 115–121.
- Toro, N., Briceño, W., Pérez, K., Cánovas, M., Trigueros, E., Sepúlveda, R., Hernández, P. 2019. Leaching of pure chalcocite in a chloride media using sea water and waste water. *Metals*, 9(7), 780.
- Tundisi, J. G. 2008. Water resources in the future: problems and solutions. *Estudos Avançados*, 22(63), 7–16.
- Van Berkel, R. 2007. Eco-efficiency in primary metals production: Context, perspectives and methods. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(3), 511–540.
- Wright, D. G., Pawlowicz, R., McDougall, T. J., Feistel, R., Marion, G. M. 2011. Absolute salinity, "density salinity" and the reference-composition salinity scale: Present and future use in the seawater standard TEOS-10. *Ocean Science*, 7(1), 1–26.



Universidad de Concepción

# CALIDAD DEL AGUA RECIRCULADA EN OPERACIONES MINERAS. MEJORAMIENTO MEDIANTE MICROESFERAS DE VIDRIO QUÍMICAMENTE FUNCIONALIZADAS

Kevin Pérez Salinas / Ricardo Jeldres Valenzuela / Pedro G. Toledo / Leopoldo Gutiérrez

Serie Comunicacional CRHIAM

