



CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



ESPESAMIENTO DE RELAVES: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE MODIFICADORES REOLÓGICOS

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:

Espesamiento de relaves: optimización del proceso mediante modificadores reológicos.

Jahir J., Ramos, Ricardo Jeldres, Fernando Betancourt, Andrés Ramírez y Pedro Robles.

Junio 2025.

Agradecimientos:

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

ANID/FONDAP/1523A0001

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile.

Teléfono +56-41-2661570

www.crhiam.cl

Este documento debe citarse como:

Ramos, J., Jeldres, R., Betancourt, F., Ramírez, A., Robles, P. 2025. Espesamiento de relaves: optimización del proceso mediante modificadores reológicos. Serie Comunicacional CRHIAM, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (ANID/FONDAP/1523A0001). ISSN 0718-6460 (versión impresa), ISSN 0719-3009 (versión online), No. 92, 27pp. Disponible en: <https://www.crhiam.cl/publicaciones/series-comunicacionales/>



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



ESPESAMIENTO DE RELAVES: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE MODIFICADORES REOLÓGICOS

SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM

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



Jahir J. Ramos

Estudiante doctorado en Procesamiento de Minerales.
Departamento de Ingeniería Química y Procesos de
Minerales, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Antofagasta.
Becario CRHIAM.



Ricardo Jeldres

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.



Fernando Betancourt

Doctor en Ciencias Aplicadas, mención Ingeniería
Matemática, Universidad de Concepción.
Profesor Asociado Facultad de Ingeniería,
Universidad de Concepción.
Investigador Centro de Investigación en Ingeniería
Matemática (CI2MA).
Investigador Asociado CRHIAM.



Andrés Ramírez

Ingeniero de Materiales.
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Profesor asistente Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Universidad de Concepción.
Colaborador CRHIAM.



Pedro Robles

Ingeniero Civil Químico.
Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería de
Procesos Minerales, Universidad de Antofagasta.
Doctor en Ingeniería de Procesos de Minerales,
Universidad de Antofagasta.
Escuela de Ingeniería Química,
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.

RESUMEN

La industria minera se enfrenta actualmente a desafíos significativos debido a la escasez de agua, lo que limita la expansión de la minería en Chile, ya que gran parte de los yacimientos se encuentran en zonas áridas con acceso limitado a agua fresca. En este contexto, la recirculación del agua se convierte en un elemento crucial. Según COCHILCO (Comisión Chilena de Cobre) el 74% del agua utilizada en las operaciones mineras se recicla, siendo el espesamiento de relaves la principal estrategia para lograr una recuperación sostenible de este recurso.

En el proceso de espesamiento de relaves, se obtiene agua clarificada que se reintegra a los procesos, mientras que la pulpa espesada se transporta a los depósitos de relaves. Sin embargo, entre más agua se recupera, mayor es el porcentaje de la pulpa espesada lo que genera altos costos energéticos asociados al bombeo de esta pulpa. Por esta razón, se han buscado diversas estrategias para mejorar la fluidez de las pulpas, entre las que se incluye el uso de reactivos modificadores reológicos. El poliacrilato de sodio surge como una atractiva alternativa para la disminución de las propiedades reológicas de las pulpas. Sin embargo, es necesario analizar el efecto que tiene la dureza de las aguas utilizadas en minería (agua de mar y agua industrial o de proceso) ya que son soluciones que cuentan con diferentes iones disueltos lo que genera diversos desafíos en el espesamiento de relaves.

En esta serie comunicacional se revisa la situación actual del país respecto al uso de agua en minería, con atención especial en la etapa de espesamiento, revisando el efecto del poliacrilato de sodio como modificador de las propiedades reológicas de pulpas arcillosas.

INTRODUCCIÓN

Chile es reconocido como un país minero, y esta industria ha sido parte importante del desarrollo nacional. Para que lo siga siendo, es necesario superar las limitaciones para que la minería prospere, y su aporte al país continúe siendo motor del desarrollo (Prune y Cantallopsts, 2016) .

Actualmente la minería de cobre en Chile se encuentra en una etapa crítica por la poca disponibilidad de agua que existe. La programación de expansiones de la minería y los nuevos proyectos están sujetos a grandes limitaciones en relación con el abastecimiento del recurso hídrico, esto debido a que gran parte de la producción de mineral extraído proviene principalmente de zonas áridas (norte de Chile) y esto coincide con grandes distancias de las fuentes hídricas, además de grandes altitudes, lo que conlleva a que los costos por bombeos puedan ser elevados (Ihle y Kracht, 2018).

Debido a la escasez del agua se han buscado distintas alternativas, tales como desalinización por osmosis inversa, uso de agua de mar pretratada y también el empleo de agua de mar de manera directa. A diferencia del empleo directo, ambos procesos conllevan un mayor costo de operación. Sin embargo, el uso directo de agua de mar implica mayores desafíos debido a la alta salinidad que posee (Cruz *et. al.*, 2020). La recirculación del agua es clave en la gestión de los recursos hídricos, ya que los excedentes de agua pueden ser reutilizados dentro de un mismo proceso, en etapas diferentes, o enviadas desde y hacia procesos distintos, de acuerdo con los requerimientos de calidad y cantidad de cada uno de ellos. En ambos casos, se produce un ahorro importante por efecto de la optimización del uso del recurso y la reducción en los volúmenes de aguas que deben ser tratadas previo a su descarga. Se indica que el consumo de agua continental en la minería del Cobre decaerá levemente para el año 2026 mientras que el consumo de agua de mar aumentará 4,3 veces para el mismo periodo, siendo la Región de Antofagasta la que ocupará la mayor proporción de este aumento. Lo que se espera, es que el consumo de agua dulce equipare el consumo de agua de mar (Prune y Cantallopsts, 2016).

El espesamiento de relaves es una operación fundamental en el procesamiento de minerales, por un lado, se obtiene una pulpa espesa y por el otro un sobrenadante de agua clarificada. En este sentido, la industria minera busca optimizar el uso del agua, donde el proceso de espesamiento pasa a ser una etapa crucial ya que es donde se recupera la mayor cantidad de agua y es devuelta al proceso. Sin embargo, una pulpa demasiado concentrada también puede significar altos costos por bombeos hacia los tranques de relave, lo que nos lleva a una nueva problemática. Es por esto, que es de suma importancia conocer las propiedades reológicas de los relaves, factores como el esfuerzo de cedencia y viscosidad. Estos valores están relacionados de manera directa con el transporte de relaves, eficiencia de descarga y posibles estrategias para la construcción de tranques de relaves.

RECURSO HÍDRICO EN MINERÍA

La industria minera enfrenta importantes desafíos en regiones con escasez de agua y ha tenido que implementar nuevas estrategias para preservar su sustentabilidad económica y ambiental. En la minería podemos encontrar diversas fuentes de agua:

2.1 Agua Continental

Son las extracciones provenientes de aguas superficiales y subterráneas que cubren las pérdidas producidas a través de los procesos. La salinidad del agua continental es muy baja (inferior al 0,05 %), donde los iones disueltos en ella provienen de la interacción entre agua y el suelo. Asimismo, las minas generalmente están ubicadas en lugares remotos, lejos de los océanos o aguas superficiales, donde el agua subterránea es la principal fuente de agua para las actividades mineras.

Las plantas de procesamiento buscan recuperar la mayor cantidad de agua para ser reutilizada en los procesos, provocando que la calidad del agua se vuelva ligeramente salada, pero no tanto como el agua de mar

producto de la recirculación de los iones. La química del agua fresca es muy diferente a la del agua de mar. Su salinidad consiste principalmente de sulfatos, nitratos, magnesio, calcio y sodio; con un pH típico de 7.

2.2 Agua de mar

A nivel global el sector minero tiene un papel clave que desempeñar para contribuir a una buena gestión global del agua y apoyar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (Cochilco, 2022). En Chile los conflictos entre usuarios que compiten por el agua se hacen cada vez más frecuentes, conforme se incrementan las demandas en los sectores productivos correspondientes. Si bien la minería viene generando aprendizajes y desarrollando un conjunto de buenas prácticas en el uso del recurso hídrico, disminuyendo su consumo relativo en los últimos años, la escasez del agua genera conflictos de interés entre los distintos sectores y usuarios. Es por esto que la proyección de la demanda esperada de agua en la minería de cobre resulta fundamental a la hora de establecer políticas públicas por el estado (Cochilco, 2022).

Como se ha visto en los últimos años, el agua de origen continental es un recurso escaso, que no solo es considerado una limitante hidrológica, también se trata, cada vez en mayor grado, de un problema económico que podría restringir el desarrollo de la gran mayoría de las actividades industriales. Asimismo, se trata de un recurso que es muy sensible a la hora de generar posibles conflictos en las comunidades locales.

Se estima que para el 2033, el consumo de agua continental presente una reducción de un 45%, alcanzando un consumo de 6,15 m³/s a diferencia de los 15,28 m³/s que está previsto para el agua de mar, representando este último un aumento cercano al 167% en relación con el 2021 como se puede apreciar en la Figura 1:

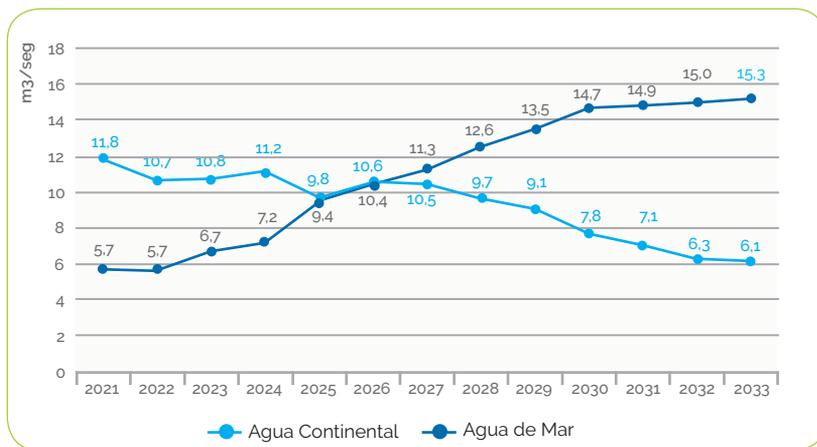


Figura 1.

Proyección de la demanda esperada de agua en la minería del cobre, según origen 2022-2033. Fuente: Cochilco (2022).

Según la distribución porcentual del agua en la minería del cobre, se espera que al 2033 el agua de mar represente el 71% del abastecimiento de agua para suplir la demanda por parte de la minería del cobre como se puede apreciar en la Figura 2.

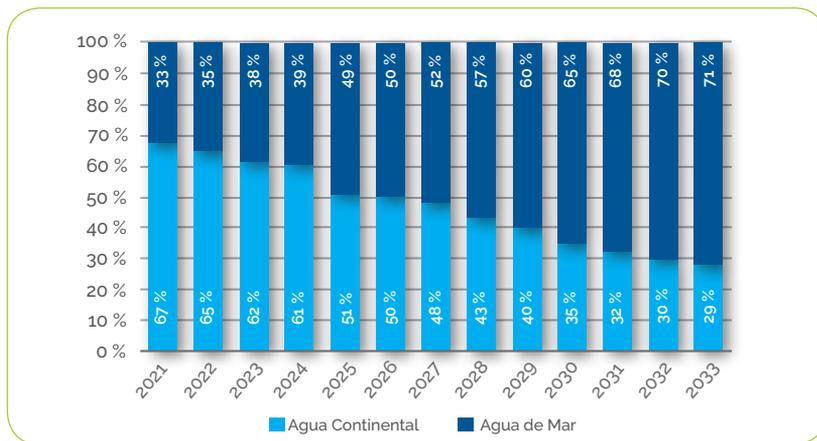


Figura 2.

Distribución porcentual de demanda de agua en la minería del cobre, según origen 2022-2033. Fuente: Cochilco (2022).

Si bien, el agua de mar es una solución salina que contiene una variedad de compuestos, incluyendo sales minerales, gases disueltos, elementos traza y microorganismos; la composición de este recurso varía dependiendo de la ubicación geográfica y de factores como la temperatura, la profundidad y la presión. En general, el agua de mar tiene una composición de aproximadamente el 96,5% de agua y el 3,5% de sales disueltas (Millero *et. al.*, 2008). La Tabla 1 nos muestra la composición típica del agua de mar:

Tabla 1.

Composición típica del agua de mar.

ESPECIE IÓNICA	CONCENTRACIÓN (ppm)
Cloruro	19345
Sodio	10755
Sulfato	2701
Magnesio	1295
Calcio	416
Potasio	390
Bicarbonato	145
Bromuro	66
Borato	27
Estroncio	13
Fluoruro	1

Fuente: Floor (2023).

La adición de iones a una solución acuosa genera un cambio en la estructura de esta solución, moléculas de agua rodean a los iones formando capas de hidratación alrededor de ellos, dependiendo de la densidad de carga y tamaño del ion estas capas difieren. Existen los iones "deconstructores de estructura" los cuales desordenan la estructura del agua y los "formadores de estructura" los cuales ordenan la estructura del agua.

La industria minera se enfrenta actualmente a desafíos significativos debido a la escasez de agua, lo que limita la expansión de la minería en Chile, ya que gran parte de los yacimientos se encuentran en zonas áridas con acceso limitado a agua fresca. En este contexto, la recirculación del agua

se convierte en un elemento crucial. Proyecciones de ingresos del agua en minería (Cochilco, 2022), el 74% del agua utilizada en las operaciones mineras se recicla, siendo el espesamiento de relaves la principal estrategia para lograr una recuperación sostenible de este recurso.

2.3 Ingresos de agua en la minería del cobre

Incluye tanto las extracciones de agua como los ingresos de agua recuperada. Para el año 2022 los ingresos de agua alcanzaron los 69,41 m³/seg, donde el 73,97% corresponde a aguas recuperadas, ya sean agua recirculadas, de reúso o recicladas (Cochilco, 2022).

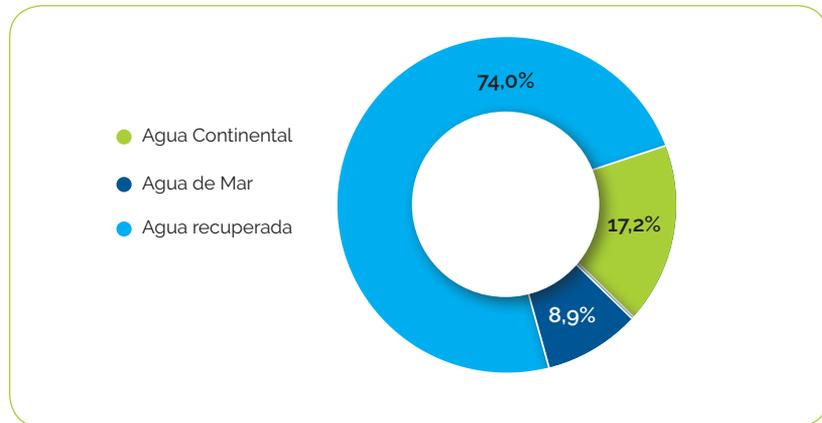


Figura 3.

Ingresos (entradas) de agua en la minería del cobre año 2022.
Fuente: Cochilco, (2022).

2.4 Distribución del uso de agua en Minería

- Control de Polvo: Este incluye la mina, ya sea a cielo abierto o subterránea y el transporte del material hasta el chancado primario. En esta área el agua es utilizada principalmente para la supresión de polvo en caminos.
- Hidrometalurgia: Considera los procesos de lixiviación en pilas, la extracción por solventes y la electro-obtención para la producción de cátodos. Los principales consumos de agua resultan como consecuencia

de la evaporación de las pilas de lixiviación donde se vierte una solución ácida, de agua con ácido sulfúrico en la superficie de las pilas (PLS).

- Planta procesadora/ Concentración: Comprende el procesamiento de minerales, el cual representa el mayor consumo de agua con respecto a los volúmenes totales. Esta área involucra la conminución del mineral (molienda secundaria), luego la flotación, clasificación y espesamiento. Las aguas residuales de los procesos pueden o no ser recirculadas al proceso desde los depósitos de relaves, como de los procesos de espesamiento y filtrado, entre otros.
- Tranque de relaves: Se considera como una tarea separada de la planta concentradora, y corresponde al agua en el almacenamiento de los residuos del procesamiento. Si bien el propósito principal de un tranque de relaves es almacenar residuos, en algunas circunstancias un tranque también puede almacenar agua temporalmente.
- Fundición y refinación: El concentrado seco se somete a un proceso de pirometalurgia para obtener placas gruesas en forma de ánodos. Este es comercializado directamente o enviado al proceso de refinación, la cual, se lleva a cabo en las celdas electrolíticas en una solución de ácido sulfúrico a la que se le aplica una corriente eléctrica, lográndose cátodos de alta pureza.
- Servicios: Se agrupan todas aquellas actividades con volúmenes de consumo de agua poco significativos frente al total consumido en una operación minera. El principal uso del agua es para bebida, lavado, riego y baños en los campamentos, y otros consumos menores.

Para el año 2022, la tarea que representa el mayor consumo de agua en la minería del cobre es el proceso de concentración de minerales sulfurados para la obtención de concentrados, el cual representa el 76,2% de la entrada de aguas. En segundo lugar, se encuentra el consumo asociado al proceso de hidrometalurgia para la obtención de cátodos a partir de minerales oxidados, alcanzando un 11,2% del total. Le sigue el agua de mina generalmente utilizada para el control de polvo con un 5,4%. Para servicios, que representa el 4,8%, se contabilizan las aguas utilizadas en campamentos, para riego, y otros procesos de menor consumo de agua.

Finalmente, la fundición y refinera representa el 2,4% de las extracciones de agua (Cochilco, 2022).

RELAVES MINEROS

El relave es un sólido finamente molido, que se descarta en operaciones mineras. La minería de sulfuros de cobre extrae grandes cantidades de material (roca) del yacimiento que se explota. Donde solo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar (algo menos de 1%). Una vez que ese material (la roca) ha sido finamente molido y concentrado por procesos de flotación, se obtiene un material (el concentrado) con una concentración más alta de cobre (entre 20 y 30%), que se puede vender como concentrado o procesar hasta cobre metálico puro. El resto del material (muy pobre en cobre) se denomina "relave", y se debe depositar de forma segura y ambientalmente responsable (Sernageomin, s/f).

Los relaves que se originan por minerales sulfurados originados en un yacimiento minero no son contaminantes en sí mismos. Pero si el relave contiene minerales contaminantes que, sobre ciertas concentraciones pueden ser consideradas tóxicas para el ser humano, como arsénico, cianuro, cobre, cinc, cromo, plomo; y por cualquier causa este relave reacciona con agua y oxígeno, éstos solubilizan, generando una posibilidad de movilizarlos, lo que genera una potencial afectación a las personas y al medio ambiente. Para impedir que estos complejos problemas puedan producirse en el depósito, las empresas mineras deben investigar desde el inicio de su proyecto minero qué elementos químicos y mineralógicos, además de los económicos, caracterizan el yacimiento y su entorno, para definir los medios a utilizar para neutralizarlos (Sernageomin, s/f).

3.1 Espesamiento de relaves

La etapa de espesamiento de pulpas es una etapa crucial en el procesamiento de minerales, en la cual se separa el líquido del sólido a través de la sedimentación. Durante esta etapa, se utiliza un espesador para aumen-

tar la concentración de sólidos en la suspensión de mineral y agua, mediante la eliminación del exceso de agua. El proceso de espesamiento se lleva a cabo en un tanque con un mecanismo de agitación que mantiene la suspensión en constante movimiento, lo que ayuda a acelerar la sedimentación de los sólidos. El espesador tiene un fondo cónico que permite la acumulación de los sólidos en el fondo y la separación del agua clarificada en la superficie. Los sólidos se depositan en el fondo del espesador, formando una pasta densa que se extrae mediante bombas de pasta y se envía a la siguiente etapa del proceso de procesamiento de minerales. Por otro lado, el agua clarificada se recupera y se reutiliza en el proceso. El objetivo principal del espesamiento es maximizar la eficiencia del proceso de procesamiento de minerales, reducir los costos de producción y minimizar el impacto ambiental de la operación minera al reducir la cantidad de agua utilizada (Fuerstenau y Han, 2003). El manejo de partículas finas en la etapa de espesamiento minero puede ser un gran desafío, ya que estas partículas pueden tener un impacto significativo en la eficiencia de la sedimentación y en el espesamiento, ya que podría aumentar los parámetros reológicos.



Figura 4.

Espesador de relave. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Reología

Un fluido se define como una sustancia que se deforma continuamente bajo la aplicación de esfuerzos cortantes. La reología es la ciencia del flujo que estudia la deformación de un cuerpo sometido a esfuerzos externos, se puede decir que la reología se encarga de estudiar la viscosidad, la plasticidad y la elasticidad de los fluidos. Los relaves mineros tienen un comportamiento no newtoniano. Los fluidos no newtonianos se caracterizan por tener una relación no-proporcional entre el esfuerzo y la velocidad de cizalle y su viscosidad varía con la velocidad de cizalle.

Parámetros como el esfuerzo de cedencia o *yield stress* (esfuerzo mínimo que hay que aplicar a una pulpa para que escurra) nos puede entregar información de suma importancia al querer caracterizar una pulpa, ya que se puede conocer información sobre la eficiencia del proceso.



Figura 5.

Relave espesado, caracterizado por ser un fluido no newtoniano. Fuente: Galaz (2011).

3.3 Arcillas en minería

Desde el punto de vista mineralógico las arcillas engloban un grupo de minerales (minerales de arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano muy fino (inferior a 2 micras). Las técnicas de rayos X, han demostrado que las arcillas están constituidas por un grupo de sustancias cristalinas denominadas minerales de arcilla, que son silicato aluminico hidratado. En algunos de ellos, el aluminio es sustituido por magnesio o hierro, aunque una arcilla puede estar formado por un único mineral de arcilla, por lo general hay varios de ellos mezclados con otros minerales tales como feldespatos, cuarzos y micas.

Debido a la alta superficie específica de las arcillas y la presencia de gran superficie activa, con enlaces no saturados, las arcillas pueden interaccionar con diversas sustancias, en especial con compuestos polares como el agua. Las consecuencias inmediatas son el comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/ líquido y el hinchamiento o "swelling" con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas. A su vez las arcillas, producto de su pequeño tamaño de partículas, inciden notoriamente en la disminución de la tasa de sedimentación afectando notoriamente las recuperaciones de agua.

Las arcillas son omnipresentes en el procesamiento de minerales. Estas especies son el foco de atención permanente porque impactan negativamente en casi todas las etapas de procesamiento de minerales (Grafe *et. al.*, 2017). La presencia de un exceso de material fino dificulta normalmente la operación de los espesadores debido a que estas partículas poseen una velocidad de sedimentación muy baja y tienden a permanecer suspendidas por un tiempo prolongado. Es muy importante reconocer la cantidad y tipo de arcillas presentes, ya que ellas determinarán la velocidad de sedimentación, porcentaje de sólidos espesados alcanzable y esfuerzo de fluencia (*yield stress*). Entre los minerales más comunes, hay algunos que no se expanden con el agua, como la caolinita, y otros que sí lo hacen, como las montmorillonitas. Esta diferencia puede cambiar la forma en que se comporta la mezcla de agua y sólidos (llamada pulpa) que se recoge en la parte inferior del espesador.

3.4 Tipos de espesadores de relave

Existen distintos tipos de espesadores según su clasificación operacional:

- Espesadores convencionales: no utilizan floculante, en su alimentación no cuentan con un sistema de dilución de relave y tienen una baja inclinación del talud del cono como se observa en la Figura 6 (2-5%), y llega a porcentajes de sólido de entre 40 a 60% p/p, pero con una baja capacidad de tratamiento (FLSmith, 2016).
- Espesadores de alta capacidad o high rate: optimizan la operación en base al uso de floculantes, alimentación con dilución y un aumento en la inclinación del talud del cono, como se observa en la Figura 6 (2-10%), teniendo en casos de mayores diámetros dos cambios de pendientes (FLSmith, 2016).
- Espesadores de alta densidad o high density: surgen ante la necesidad de recuperar una mayor cantidad de agua en las grandes faenas que entraron en operación con bajas leyes de mineral (FLSmith, 2016), estos espesadores mejoran los sistemas de alimentación y facilitan la deposición de los sólidos al aumentar la inclinación del cono (8-15%) además de una mayor profundidad del estanque como se observa en la Figura 6.
- Espesadores de pasta o de cono profundo: poseen una altura lateral mucho mayor que los demás tipos de espesadores, una mayor inclinación de cono (30-45%) y su producto es un relave con concentración máxima de sólidos conocido como pasta. Hoy en día es reconocido como una de las mejores tecnologías disponibles, a pesar de su alto costo de construcción (FLSmith, 2016).

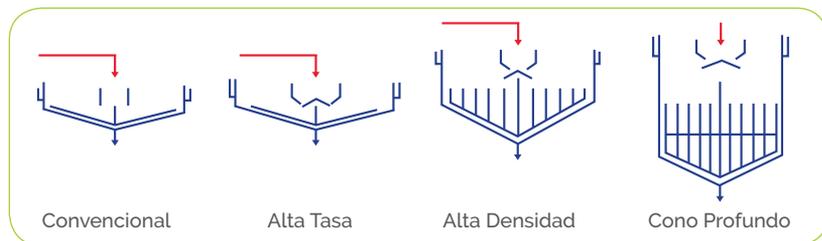


Figura 6.

Clasificación operacional espesadores. Fuente: Wills y Finch, (2016).

Actualmente, uno de los principales desafíos para la industria minera es reducir las propiedades reológicas del material espesado, con el fin de disminuir el consumo de energía durante el transporte de la pulpa hacia los tranques de relaves. Para lograrlo, es fundamental entender la fisicoquímica de la superficie de las partículas, ya que esto permite comprender y controlar su comportamiento reológico.

3.5 Modificadores reológicos

El desafío permanente en el manejo de relaves es la reducción de las propiedades reológicas, como el esfuerzo de cedencia y la viscosidad. Estudios mostraron (Moreno *et al.*, 2011) que al utilizar copolímeros de policarboxilato en suspensiones de caolín que muestran una alta capacidad de los polímeros para reducir la viscosidad debido a la dispersión de partículas por efectos estéricos y electrostáticos causados por el aumento de la carga aniónica en las partículas. Curiosamente, este polímero destinado al agua (Labanda y Llorens, 2005), ofrece resultados prometedores en entornos altamente salinos (Huang, Pan y Wang, 2018).

3.6 Poliacrilato como modificador reológico

La manipulación de las propiedades reológicas de pulpas concentradas requiere cambios en la fisicoquímica de las superficies de las partículas (Krester, Scales y Boger, 1998). Esto se puede hacer mediante modificadores reológicos como el poliacrilato de sodio (NaPA).

El poliacrilato de sodio con fórmula $C_3H_3NaO_2$, es un polímero formado por monómeros. Una de sus características principales es su capacidad de absorber, lo que significa que puede contener grandes cantidades de agua en relación con su propio peso. La capacidad de absorción del polímero se debe a la presencia de grupos carboxilo (-COOH) en las cadenas del polímero. Estos grupos carboxilo son polares y tienen una carga negativa parcial, lo que les permite interactuar con las moléculas de agua, que son polares y tienen una carga positiva parcial, a través de enlaces de hidrógeno (Figura 7).

Además, el NaPA tiene una estructura de cadena larga y flexible que puede envolver y rodear las partículas sólidas, lo que evita que se aglomeren y sedimenten. El NaPA interactúa con las partículas mediante puentes de hidrógeno y puentes catiónicos a través del grupo carboxilo del polímero.

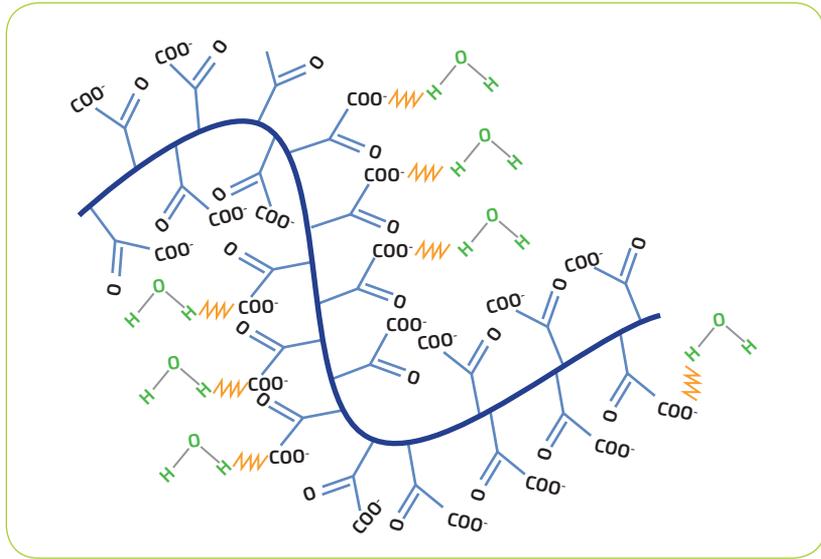


Figura 7.

Fijación de agua en la superficie del polímero. Fuente: Pandey y col. (2017)

El NaPA utiliza dos mecanismos para dispersar las partículas y generar una reducción en las propiedades reológicas, esto debido a:

- Fuerzas estéricas: son fuerzas repulsivas de corto rango, generalmente son identificadas cuando tales superficies recubiertas con un polímero soluble se aproximan. Las repulsiones son de determinado rango e intensidad debido al tamaño y conformación de los polímeros adsorbidos (Figura 8).

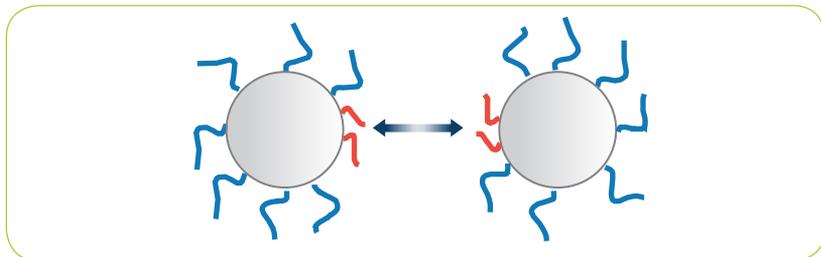


Figura 8.

Esquema repulsión estérica. Fuente: Elaboración propia.

- Fuerzas electro-estéricas: adicionalmente se identifican fuerzas repulsivas debido a las cargas propias de los iones que se posicionan en la superficie del polielectrolito (Figura 9).

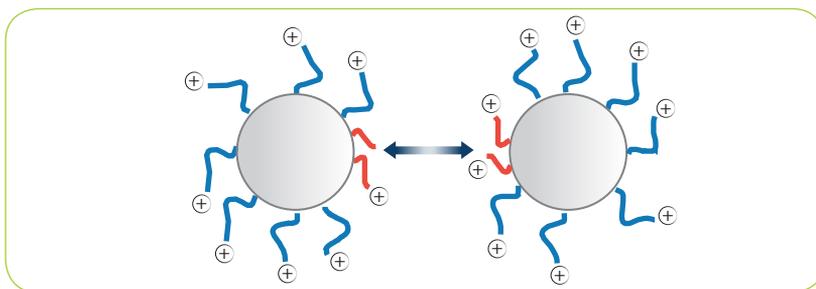


Figura 9.

Repulsión electro-estérica. Fuente: Elaboración propia.

Estudios de modificadores de viscosidad de pulpa mostraron que el poliacrilato de sodio de bajo peso molecular agregado a las pulpas de caolín en agua de mar reduce la fuerza de los enlaces entre las partículas a través de la estabilización estérica y, por lo tanto, reduce considerablemente los parámetros reológicos (Robles y col., 2019). Por otra parte, hay estudios realizados por Jeldres y col. (2021), donde mediante la adición de NaPA a pulpas de caolín-cuarzo y montmorillonita-cuarzo en agua de mar se puede reducir el esfuerzo de cedencia, en ambos relaves exponencialmente, aumentando su carácter líquido y la estabilidad de la suspensión. La acción estabilizadora de NaPA está respaldada por un ligero aumento del potencial zeta negativo y a las fuerzas estéricas.

El agua utilizada en minería se caracteriza por tener diferentes iones disueltos (en menor o mayor cantidad). Es por esto que se evaluó el efecto del NaPA con soluciones de distinta dureza (Ramos, 2023). Para esto se realizaron pruebas reológicas (esfuerzo de cedencia) y de potencial zeta, los resultados muestran una disminución con forma exponencial del esfuerzo de cedencia de las pulpas sintéticas a medida que se aumenta la dosis de NaPA. En soluciones de baja dureza se logra una disminución de un 99,9% del esfuerzo de cedencia, sin embargo, al aumentar la dureza del agua (agua de mar sintética) se logra una disminución de hasta un 75,2%.

En el caso del potencial zeta no mostró un efecto significativo al agregar NaPA, sin embargo, gracias a las fuerzas estéricas se formó una estabilización de las partículas aumentando la dispersión en el sistema.

En este sentido, el reto permanente de la investigación con visión de aplicación industrial es reducir las propiedades reológicas como una alternativa que podrá ayudar al transporte de relaves y a su vez disminuir el consumo de energía. Por otro lado, ayuda a tener relaves más estables al momento de ser depositados en los tranques y mejora la recuperación de agua en los procesos mineros, lo que hace que se pueda tener procesos técnicamente mejores y que tengan una mayor responsabilidad ambiental en cuanto a la recuperación de un recurso tan valioso y estratégico como lo es el agua para la industria minera.

CONCLUSIONES

Chile se enfrenta a una crisis de escasez hídrica de proporciones significativas. La mega sequía que afecta al país ha persistido durante casi 13 años y se caracteriza por la falta sostenida de precipitaciones y el aumento de las temperaturas, intensificando la menor disponibilidad de agua.

En este contexto el espesamiento de relaves pasa a ser una etapa fundamental en la recuperación de agua. El mayor porcentaje de agua utilizado en minería corresponde a agua recirculada obtenida del proceso de espesamiento de relaves. Una vez que se descarga el flujo inferior, todavía contiene grandes volúmenes de agua atrapado dentro de los agregados de partículas. Por esta razón, existe un interés creciente en utilizar métodos de disposición para relaves en pasta, donde las pulpas pueden alcanzar porcentajes de sólidos superiores al 70% en peso. Esto puede beneficiar significativamente las actividades de los depósitos de pulpa en las presas de relaves. Es importante un buen conocimiento de las propiedades reológicas para establecer las condiciones óptimas para el manejo y transporte de los relaves. Este tema está asociado a aspectos ambientales, es decir, la búsqueda de implementar principios básicos de reología para reducir

riesgos, recuperar más agua y reducir la huella de los residuos producidos en el procesamiento del mineral. Cuando el flujo de descarga del espesador posee una concentración demasiado alta (relaves en pasta), el costo de energía por bombeo puede alcanzar valores prohibitivos, y es posible que los operadores deban diluir los relaves espesados, lo que significa sacrificar agua que podría haberse recirculado en las operaciones aguas arriba.

La adición del polielectrolito aniónico (NaPA), podría ser una buena alternativa para el manejo de relaves ricos en arcilla en plantas concentradoras a pH 8 utilizando aguas de distinta dureza (agua de proceso y en agua de mar), ya que el poliacrilato de sodio de bajo peso molecular puede reducir la fuerza de los enlaces entre partículas resultantes de la estabilización estérica, disminuyendo las propiedades reológicas de la pulpa, reduciendo así el costo de energía por bombeo.

REFERENCIAS

- Cochilco. 2022. Proyección de demanda de agua en la minería del cobre. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/web/sustentabilidad/>
- Cruz, C., Ramos, J., Robles, P., Leiva, W. H., Jeldres, R. I., & Cisternas, L. A. 2020. Partial seawater desalination treatment for improving chalcopyrite floatability and tailing flocculation with clay content. *Minerals Engineering*, 151, 106307. doi: 10.1016/J.MINENG.2020.106307
- De Kretser, R. G., Scales, P. J., & Boger, D. V. 1998. Surface chemistry-rheology inter-relationships in clay suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 137(1-3), 307-318. doi: 10.1016/S0927-7757(97)00372-5
- FLSmidth. 2016. Mantenimiento de Espesadores.
- Floor. 2023. Composition of seawater. Disponible en: <http://www.sea-friends.org.nz/oceano/seawater.htm>
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (Eds.). 2003. Principles of mineral processing. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Englewood, CO, 185-188.
- Galaz, J. 2011. Estado del Arte en la Disposición de Relaves Espesados. Seminario RELPAS. Disponible en: <https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2016/05/10.-Estado-del-Arte-en-Disposici%C3%B3n-de-Relaves-Espesados.pdf>
- Gräfe, M., Klauber, C., McFarlane, A. J., & Robinson, D. J. (Eds.). 2017. Clays in the Mineral Processing Value Chain. Cambridge University Press; 2017:1-80.

- Huang, G., Pan, Z., & Wang, Y. 2018. Synthesis of sodium polyacrylate copolymers as water-based dispersants for ultrafine grinding of praseodymium zirconium silicate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 558, 591-599. doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.08.027
- Ihle, C. F., & Kracht, W. 2018. The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply. *Journal of Cleaner Production*, 177, 34-51. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.219.
- Jeldres, M., Robles, P., Toledo, P. G., Saldaña, M., Quezada, L., & Jeldres, R. I. 2021. Improved dispersion of clay-rich tailings in seawater using sodium polyacrylate. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 612, 126015. doi: 10.1016/j.colsurfa.2020.126015.
- Labanda, J., & Llorens, J. 2005. Influence of sodium polyacrylate on the rheology of aqueous Laponite dispersions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 289(1), 86-93. doi: 10.1016/j.jcis.2005.03.055.
- Millero, F. J., Feistel, R., Wright, D. G., & McDougall, T. J. 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 55(1), 50-72. doi: 10.1016/j.dsr.2007.10.001.
- Moreno, P. A., Aral, H., Cuevas, J., Monardes, A., Adaro, M., Norgate, T., & Bruckard, W. 2011. The use of seawater as process water at Las Luces copper-molybdenum beneficiation plant in Taltal (Chile). *Minerals Engineering*, 24(8), 852-858. doi: 10.1016/j.mineng.2011.03.009
- Pandey, M., Badiger, S., Sivakumar Babu, G. L., & Pandey, M. R. 2017. 27th & 28th. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/314153281>
- Prunes, C., & Cantallopts, J. 2016. Consumo de agua en la minería del cobre al 2016, p. 44. Disponible en: <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estudios/Listado Temático/Agua.aspx>

- Ramos, J. J. 2023. Impacto de dureza y calidad de agua industrial en rendimiento de modificador reológico para relaves arcillosos. Universidad de Antofagasta.
- Robles, P., Piceros, E., Leiva, W. H., Valenzuela, J., Toro, N., & Jeldres, R. I. 2019. Analysis of sodium polyacrylate as a rheological modifier for kaolin suspensions in seawater. *Applied Clay Science*, 183, 105328. doi: 10.1016/j.clay.2019.105328.
- Wills Barry, A. 2016. Wills' Mineral Processing Technology. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-65478-2>



CRHIAM

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/1523A0001



Universidad de Concepción



SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM



ESPESAMIENTO DE RELAVES: OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO MEDIANTE MODIFICADORES REOLÓGICOS



Universidad de Concepción



UNIVERSIDAD
DE LA FRONTERA



Universidad del Desarrollo
Universidad de Excelencia

