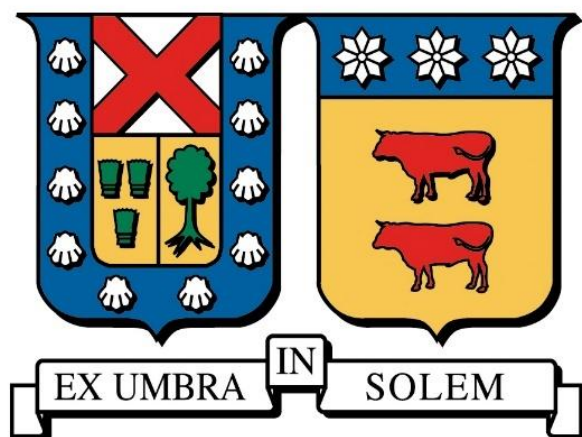


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS, METALURGIA
Y MATERIALES



**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL METABISULFITO
DE SODIO COMO AGENTE DEPRESANTE DE PIRITA
MEDIANTE MICROFLOTACIÓN CON AGUA DE MAR
EMPLEANDO CELDAS HALLIMOND”**

PRESENTADO POR

MATÍAS AMAURI GUERRERO ORELLANA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL DE MINAS

PROFESORA GUÍA:

PHD. ING. FRANCISCA SAN MARTÍN ROBBIANO

SANTIAGO DE CHILE, 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Evaluación de la eficiencia del metabisulfito de sodio como agente depresante de pirita mediante microflotación con agua de mar empleando celdas Hallimond

Nombre del candidato(a): Matias Amauri Guerrero Orellana

Carrera / Grado: Ingeniería Civil de Minas

Campus: San Joaquín **Departamento:** Departamento de Ingeniería de Minas, Metalurgia y Materiales

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Francisca San Martín Robbiano, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 01/10/2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 01/10/2026 **Firma:** 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

La industria minera actual enfrenta una crisis de escasez hídrica que ha impulsado el uso de agua de mar directa en los procesos de flotación de sulfuros de cobre. Sin embargo, la alta concentración de iones divalentes en el agua de mar hace inviable el método tradicional de deprimir la pirita mediante la alcalinización con cal, forzando a la industria a buscar reactivos alternativos que operen a pH natural, como el metabisulfito de sodio (MBS).

Para abordar esta problemática, se llevó a cabo una metodología experimental basada en pruebas de microflotación en celdas Hallimond utilizando pirita pura y agua de mar artificial. Se evaluó la flotabilidad natural del mineral y se realizaron ensayos secuenciales para determinar las dosificaciones óptimas del colector Xantato AERO343 y del depresante MBS, analizando tanto el mineral puro como la pirita activada con iones de cobre, junto con el monitoreo constante del pH y el potencial electroquímico (Eh) de la pulpa.

En ausencia de reactivos, la flotabilidad natural de la pirita pura y la activada es mínima, 8,97% y 8,80% respectivamente. Al dosificar el colector Xantato AERO343, 150 g/ton maximizan la recuperación al 92,45% en la pirita pura (manteniéndose siempre sobre el 75%) y al 94,27% en la activada, aunque esta última cae abruptamente al 29,13% si se sobredosifican 300 g/ton de colector. Fijando el colector en 150 g/ton, el depresante MBS en pirita pura logra su máxima depresión con solo 50 g/ton (reduciendo la recuperación a 38,75%, ya que dosis mayores la reactivan sobre el 91%), mientras que la pirita activada con cobre exige una dosis óptima de 300 g/ton de MBS para desplomar su recuperación al 20,90%, presentando una ventana operativa tan estrecha que 400 g/ton la disparan nuevamente al 91,73%. Todo este proceso transcurre en un entorno altamente oxidante, confirmando que la depresión obedece a modificaciones químicas superficiales mediadas por el cobre y no a limitaciones termodinámicas para oxidar el colector.

Este estudio valida al MBS como un reactivo estratégico capaz de reemplazar el uso de cal en circuitos con agua de mar. Su implementación permitiría procesar sulfuros de manera eficiente, reduciendo drásticamente el consumo de agua dulce continental y protegiendo la reología e hidrodinámica de las celdas de flotación al prevenir la precipitación indeseada de lamas de magnesio.

Abstract

The current mining industry faces a water scarcity crisis that has driven the use of direct seawater in copper sulfide flotation processes. However, the high concentration of divalent ions in seawater makes the traditional method of depressing pyrite through lime alkalization unfeasible, forcing the industry to seek alternative reagents that operate at a natural pH, such as sodium metabisulfite (MBS).

To address this problem, an experimental methodology was conducted based on microflotation tests in Hallimond cells using pure pyrite and artificial seawater. The natural floatability of the mineral was evaluated, and sequential assays were performed to determine the optimal dosages of the Xanthate AERO343 collector and the MBS depressant. This included analyzing both the pure mineral and copper-activated pyrite, alongside continuous monitoring of the pulp's pH and electrochemical potential (Eh).

In the absence of reagents, the natural floatability of pure and activated pyrite is minimal, at 8,97% and 8,80%, respectively. Upon dosing the Xanthate AERO343 collector, 150 g/ton maximizes the recovery to 92,45% for pure pyrite (consistently remaining above 75%) and to 94,27% for the activated pyrite, although the latter drops abruptly to 29,13% if overdosed with 300 g/ton of collector. With the collector fixed at 150 g/ton, the MBS depressant achieves its maximum depression on pure pyrite with only 50 g/ton (reducing recovery to 38,75%, as higher doses reactivate it above 91%). In contrast, copper-activated pyrite requires an optimal dose of 300 g/ton of MBS to plummet its recovery to 20,90%, presenting such a narrow operational window that 400 g/ton causes it to shoot back up to 91,73%. This entire process takes place in a highly oxidizing environment, confirming that the depression is driven by surface chemical modifications mediated by copper, rather than thermodynamic limitations to oxidize the collector.

This study validates MBS as a strategic reagent capable of replacing the use of lime in seawater circuits. Its implementation would allow for the efficient processing of sulfides, drastically reducing the consumption of continental freshwater and protecting the rheology and hydrodynamics of the flotation cells by preventing the unwanted precipitation of magnesium slimes.

Índice

Resumen.....	i
Abstract	ii
Índice.....	iii
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vii
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Flotación	4
2.1.1. Reactivos de Flotación.....	7
2.1.1.1. Colectores	7
2.1.1.2. Espumantes	10
2.1.1.3. Activadores	11
2.1.1.4. Depresantes	11
2.2. Recursos Hídricos	12
2.2.1. Distribución de Usos de Agua por Sector Económico.....	13
2.2.2. Uso de Agua en la Minería del Cobre en Chile	14

2.3. Agua de Mar.....	16
2.3.1. Problemáticas del agua de mar	19
3. Metodología	22
3.1. Preparación muestra mineral.....	22
3.2. Preparación agua de mar artificial	22
3.3. Pruebas de flotación.....	23
4. Resultados y Discusión.....	28
4.1 Flotabilidad Natural	28
4.2 Optimización del Colector	28
4.3 Optimización Metabisulfito de Sodio	33
5. Conclusiones	39
6. Bibliografía	42

Índice de Figuras

Figura 1: Representación de una celda de flotación (Wills & Finch, 2016).	5
Figura 2: (a) Partícula adherida a una burbuja y (b) Representación del ángulo de contacto y las fuerzas de tensión superficial (Wills & Finch, 2016).	6
Figura 3: Adsorción del colector en la superficie de un mineral (Wills & Finch, 2016).	8
Figura 4: Clasificación de colectores (Wills et al., 2006).	9
Figura 5: Adsorción del espumante en interfase aire-agua (Wills et al., 2006).	10
Figura 6: Balance hídrico de la minería del cobre en Chile para 2024 (Comisión Chilena del Cobre, 2025).	14
Figura 7: Consumo de agua operacional por proceso en la minería del cobre. Fuente: Cochilco, 2025.	15
Figura 8: Proyección nacional de la demanda de agua en la minería del cobre para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.	17
Figura 9: Proyección de la demanda de agua en minería del cobre según el proceso operativo para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.	18
Figura 10: Proyección de la demanda de agua en minería del cobre según la fuente de abastecimiento para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.	19
Figura 11: Montaje experimental celda Hallimond.	24
Figura 12: Metodología de las pruebas de flotación.	27
Figura 13: Efecto de diferentes dosis de colector Xantato AERO343 en la recuperación de pirita en agua de mar.	29
Figura 14: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita pura con adición de colector Xantato AERO343.	30
Figura 15: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita pura con adición de colector Xantato AERO343.	31

Figura 16: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita activada con adición de colector Xantato AERO343.	32
Figura 17: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita activada con adición de colector Xantato AERO343.	32
Figura 18: Efecto de diferentes dosis de colector Metabisulfito de Sodio en la recuperación de pirita en agua de mar.	33
Figura 19: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita pura con adición de MBS.	34
Figura 20: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita activada con adición de MBS.	35
Figura 21: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita pura con adición de MBS.	36
Figura 22: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita activada con adición de MBS.	36

Índice de Tablas

Tabla 1: Composición para 1 kg de agua de mar artificial. Adaptado de Kester et al, 1967. . 23

Tabla 2: Dosis de reactivos en pruebas de flotación. 24

1. Introducción

1.1. Contexto

La industria minera global atraviesa un desafío crítico caracterizado por la confluencia de tres factores determinantes: la disminución progresiva de las leyes de los yacimientos minerales, la complejidad mineralógica creciente de las menas y la escasez hídrica en las regiones mineras estratégicas (Serey, 2023). En distritos mineros de clase mundial, como lo es la zona norte de Chile, la disponibilidad de recursos hídricos continentales ha dejado de ser una variable económica para convertirse en una licencia social y ambiental operativa (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015; Ministerio de Obras Públicas, 2020; Comisión Chilena del Cobre, 2025).

Ante este escenario, la implementación de agua de mar —ya sea sin desalar o parcialmente desalada— en los procesos de concentración de minerales, específicamente en la flotación, se ha consolidado como la estrategia de suministro hídrico más viable y sostenible (Comisión Chilena del Cobre, 2026). Sin embargo, esta transición desde sistemas de agua dulce hacia matrices acuosas de alta fuerza iónica, como el agua de mar, introduce perturbaciones termodinámicas y cinéticas severas en el proceso de flotación, el método de concentración primario para sulfuros de cobre.

La problemática central en este nuevo paradigma hídrico reside en la gestión eficiente de la pirita (FeS_2), el sulfuro de hierro más abundante en la corteza terrestre y la principal impureza en los concentrados de cobre y molibdeno. La separación selectiva de los sulfuros de valor (Cu-Mo) de la pirita es fundamental para la viabilidad económica de las operaciones mineras. La presencia de pirita en el concentrado final no solo diluye la ley del producto vendible, incrementando costos de transporte y fundición, sino que también genera serios pasivos ambientales. Durante la pirometalurgia, el azufre de la pirita se oxida a dióxido de azufre (SO_2), un precursor de la lluvia ácida, y en los depósitos de relaves, la pirita residual es la principal responsable de la generación de drenaje ácido de roca, un problema ambiental de largo plazo.

Históricamente, la depresión de la pirita se ha fundamentado en la pasivación de su superficie mediante la elevación del pH a valores superiores a 11,0, utilizando cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) como reactivo modificador. No obstante, la química del agua de mar, dominada por una alta concentración de iones magnesio (Mg^{2+}) y calcio (Ca^{2+}), así como por un potente efecto tampón (buffer), hace que la estrategia tradicional de alcalinización sea técnica y económicamente inviable (Castro, 2012).

Por lo tanto, la flotación en agua de mar debe restringirse a rangos de pH natural o moderadamente alcalino (pH 7,5 – 8,5), donde la precipitación de magnesio es mínima.

Ante la restricción del pH, la industria ha volcado su atención hacia el uso de agentes depresantes alternativos que sean efectivos en rangos de pH neutros a levemente alcalinos. Los reactivos derivados del azufre en estado de oxidación +4 (S(IV)), tales como el sulfito de sodio (Na_2SO_3), bisulfito de sodio (NaHSO_3), dióxido de azufre (SO_2) y metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), han emergido como los candidatos más prometedores (Mu & Peng, 2019).

El metabisulfito de sodio (MBS) es particularmente atractivo por su alta densidad de contenido de azufre activo y su manejo relativamente seguro en planta. Su mecanismo de acción es dual y complejo: actúa como un agente reductor que modifica el potencial de la pulpa (Eh), consumiendo oxígeno, y como una fuente de iones sulfito (SO_3^{2-}) y bisulfito (HSO_3^-) que pueden interactuar químicamente con la superficie mineral (Castro, 2018).

No obstante, la aplicación de MBS en agua de mar presenta incógnitas científicas no resueltas. La literatura sugiere comportamientos contradictorios donde dosis bajas deprimen la pirita, pero dosis altas pueden reactivarla. Además, la interacción de los iones sulfito con los cationes divalentes del agua de mar (Ca^{2+} , Mg^{2+}) introduce una nueva dimensión de complejidad, posiblemente formando precipitados de sulfito de calcio (CaSO_3) o complejos de magnesio que podrían alterar la eficacia del depresante (Castellón et al., 2024; Castro, 2018; Mu & Peng, 2019).

Por tanto, es pertinente desarrollar estudios experimentales que profundicen el comportamiento de depresión de pirita con MBS en agua de mar artificial, evaluando el impacto de diversas concentraciones de reactivos para validar ventanas operativas robustas a escala industrial.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del metabisulfito de sodio en la depresión de pirita, pura y activada, mediante sulfato de cobre pentahidratado, dentro de un sistema de agua de mar artificial, determinando la dosis operacional que maximiza la inhibición de su flotabilidad.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la recuperación metalúrgica natural de la pirita, pura y activada, en agua de mar artificial.
- Identificar la dosis de colector Xantato AERO343 que maximice la recuperación de pirita, pura y activada, en agua de mar artificial.
- Estudiar la recuperación metalúrgica de la pirita, pura y activada, variando la dosificación de metabisulfito de sodio en agua de mar artificial para identificar la concentración óptima de depresante.
- Determinar el comportamiento del pH y en el potencial (Eh) del sistema y su influencia en la depresión de pirita pura y activada.

2. Marco Teórico

2.1. Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico de concentración mineral que se utiliza para separar de forma selectiva las especies valiosas de la ganga (minerales no deseados sin valor económico) aprovechando las diferencias en sus propiedades de mojabilidad superficial. El principio básico establece si una partícula mineral es fácilmente mojada por el agua, se comporta como hidrofílica (afín al agua) y permanecerá en la pulpa; en cambio, si repele el agua, se comporta como hidrofóbica y tendrá la capacidad de adherirse a una burbuja de aire y flotar. Estas propiedades superficiales de hidrofobicidad o hidrofiliidad pueden ser intrínsecas del propio mineral o, como ocurre en la mayoría de los casos, ser inducidas o modificadas artificialmente mediante la adición de reactivos químicos especiales (Wills & Finch, 2016).

Mecánicamente, el proceso se lleva a cabo en reactores denominados celdas de flotación hasta dónde llega la pulpa proveniente de la molienda. El sistema es agitado mecánicamente e inyectado con aire comprimido, lo que genera un gran flujo de burbujas de aire que ascienden por la pulpa. El agitador genera la turbulencia requerida para promover colisiones continuas entre las partículas sólidas y las burbujas. Al colisionar, las partículas de mineral hidrofóbico se adhieren firmemente a las burbujas de aire y son transportadas verticalmente hacia la superficie de la celda. Una vez arriba, forman una capa de espuma estable (denominada concentrado) que rebasa y se recolecta, mientras que las partículas hidrofílicas (la ganga) permanecen en el fondo de la celda y se evacúan como relave. A esto se le conoce como flotación directa, en caso contrario (cuando el mineral valioso permanece en la pulpa), se le conoce como flotación reversa (Wills & Finch, 2016).

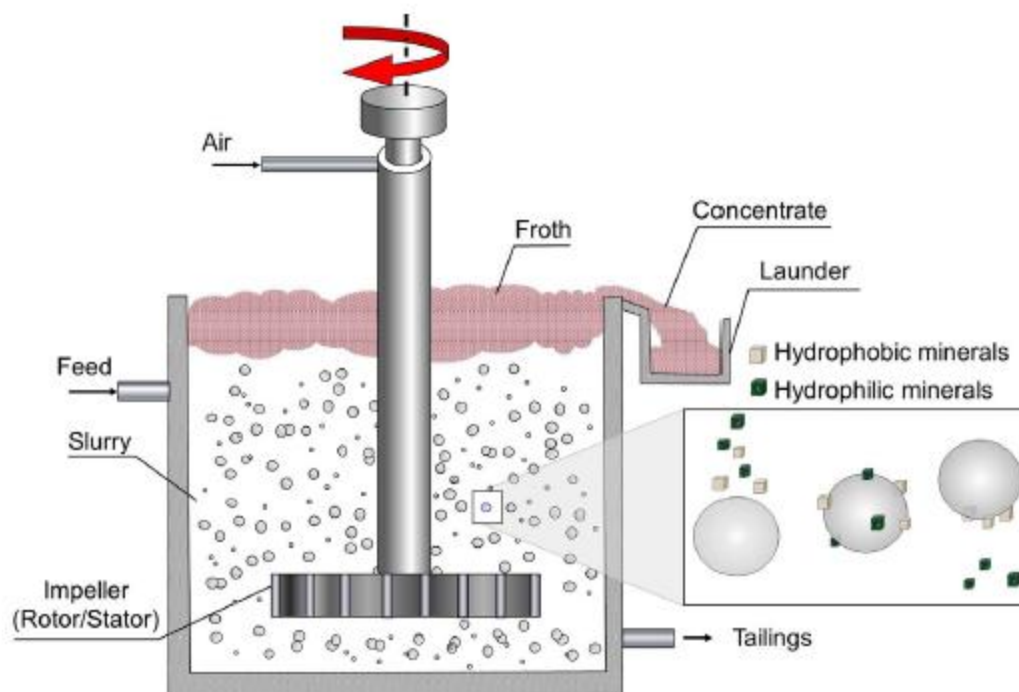


Figura 1: Representación de una celda de flotación (Wills & Finch, 2016).

La hidrofobicidad está estrechamente ligada a la energía superficial del sólido. Las superficies polares con enlaces iónicos o covalentes fuertes interactúan intensamente con los dipolos del agua mediante puentes de hidrógeno, formando una capa hidratada estable que las hace hidrofílicas. En cambio, las superficies no polares de baja energía repelen las moléculas de agua y son hidrofóbicas de manera natural o inducida por reactivos .

Para describir este comportamiento termodinámico en la interfase de triple contacto (sólido, líquido y gas), se utilizan dos variables clave: el ángulo de contacto y el trabajo de adhesión (Figura 2) (Wills & Finch, 2016).

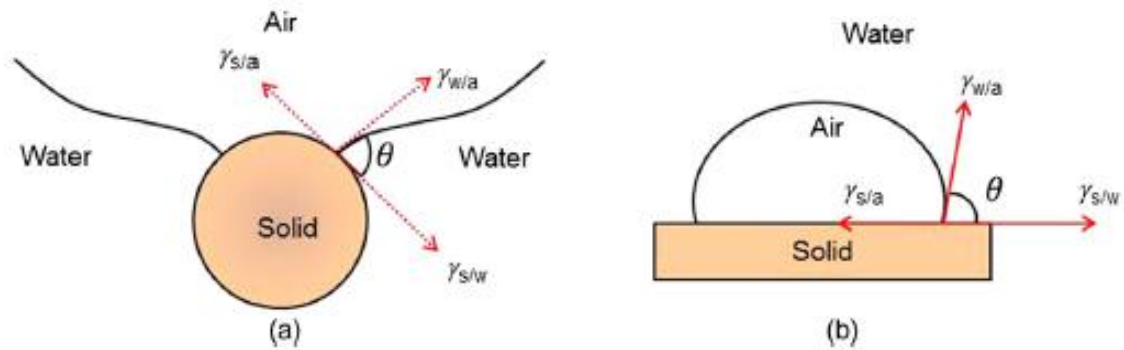


Figura 2: (a) Partícula adherida a una burbuja y (b) Representación del ángulo de contacto y las fuerzas de tensión superficial (Wills & Finch, 2016).

El Ángulo de Contacto (θ)

La hidrofobicidad de un mineral se mide a través del ángulo de contacto, el cual se desarrolla debido a las fuerzas de tensión superficial y se mide convencionalmente a través de la fase líquida. Un ángulo de contacto mayor que cero denota un carácter hidrofóbico.

En equilibrio, estas fuerzas de tensión superficial se relacionan cuantitativamente mediante la Ecuación de Young (Wills & Finch, 2016):

$$\gamma_{s/g} = \gamma_{s/l} + \gamma_{l/g} * \cos\theta$$

Donde:

$\gamma_{s/g}$: representa la energía libre interfacial (o tensión superficial) entre el sólido y el gas (aire).

$\gamma_{s/l}$: es la tensión interfacial entre el sólido y el líquido (agua).

$\gamma_{l/g}$: es la tensión superficial entre el líquido y el gas.

θ : es el ángulo de contacto resultante en la superficie del mineral.

El Trabajo de Adhesión ($W_{s/a}$)

El trabajo de adhesión es la medida de la energía necesaria para romper la interfase entre la partícula y la burbuja y separar el agregado sólido-aire en interfaces sólido-agua y agua-aire independientes. Su balance termodinámico se expresa de la siguiente manera:

$$W_{s/a} = \gamma_{l/g} + \gamma_{s/l} - \gamma_{s/g}$$

Al combinar esta relación con la Ecuación de Young, se obtiene la expresión para el trabajo de adhesión en función del ángulo de contacto:

$$W_{s/a} = \gamma_{l/g} * (1 - \cos\theta)$$

De esta ecuación se deduce que a mayor ángulo de contacto (θ), mayor es el trabajo de adhesión entre la partícula y la burbuja. Esto significa que el agregado partícula-burbuja será significativamente más resistente y resiliente ante las fuerzas de cizalle y turbulencia dentro de la celda de flotación (Wills & Finch, 2016).

Dado que muy pocos minerales presentan una hidrofobicidad natural suficiente para flotar por sí mismos, la industria minera depende de una dosificación precisa de compuestos químicos (reactivos) para lograr una separación selectiva y económicamente viable. Estos reactivos se clasifican principalmente en colectores, espumantes y reguladores (los cuales engloban a los activadores y depresantes) (Wills & Finch, 2016).

2.1.1. Reactivos de Flotación

Son reactivos que corresponden a moléculas heteropolares formadas por una parte polar (hidrofílica) que reacciona con los dipolos del agua y una parte apolar (hidrofóbica) que no interactúa con el agua.

2.1.1.1. Colectores

Los colectores son compuestos químicos orgánicos que tienen como función primordial impartir o aumentar la hidrofobicidad de los minerales de interés. Al adsorberse en la superficie de la partícula, disminuyen la estabilidad de la fina película de agua que la rodea, facilitando el acoplamiento burbuja-partícula (Wills & Finch, 2016).

Sus moléculas son surfactantes que constan de dos partes fundamentales: un grupo polar (hidrofilico) y un grupo apolar (hidrofóbico). El grupo polar interactúa químicamente o se adsorbe sobre los cationes metálicos de la superficie polar del mineral. En cambio, el grupo apolar (típicamente una cadena corta de hidrocarburos) queda orientado hacia el exterior en fase acuosa, formando una película hidrofóbica que repele el agua y promueve la flotación de la partícula (Wills & Finch, 2016).

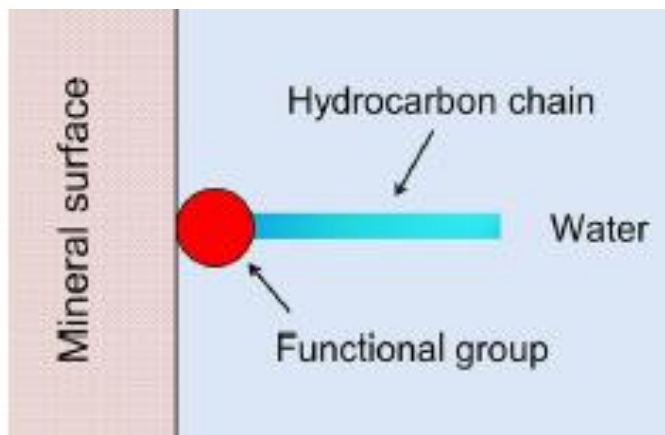


Figura 3: Adsorción del colector en la superficie de un mineral (Wills & Finch, 2016).

Los colectores deben usarse en cantidades mínimas, apenas suficientes para cubrir la superficie de las partículas con una capa monomolecular. Un exceso de colector no solo aumenta los costos operacionales y reduce la selectividad (haciendo flotar la ganga), sino que puede provocar la formación de agregados invertidos (hemimicelas) en la superficie, donde la cabeza polar del reactivo queda expuesta hacia el agua de nuevo, deprimiendo el mineral (Wills & Finch, 2016).

La recuperación puede ser incrementada sin pérdida de selectividad utilizando un colector con una cadena de hidrocarburos más larga, produciendo así una mayor repulsión al agua, en lugar de aumentar la concentración de un colector de cadena más corta. Sin embargo, la longitud de la cadena se limita generalmente de dos a cinco átomos de carbono, ya que la solubilidad del colector en agua disminuye con el aumento en la longitud de la cadena.

Clasificación de Colectores

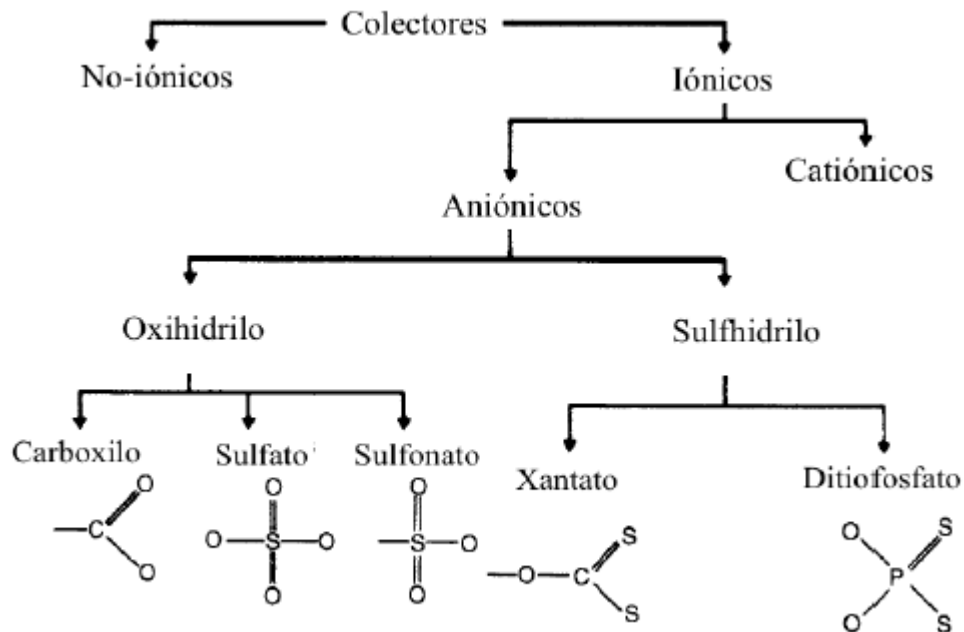


Figura 4: Clasificación de colectores (Wills et al., 2006).

Colectores No Iónicos: Son compuestos insolubles y altamente hidrofóbicos (como el kerosene o aceites combustibles ligeros) que actúan cubriendo la superficie del mineral con una delgada película. Se añaden en minerales que ya cuentan con cierta hidrofobicidad natural (como la molibdenita) para potenciarla.

Colectores Iónicos: Se disocian en iones en solución acuosa. Dependiendo de si la parte activa de la molécula que se une al mineral es un anión o un catión, se clasifican en aniónicos (como los xantatos y ditiófosfatos, esenciales para la flotación de sulfuros de cobre) o catiónicos (como las aminas, aplicadas principalmente en minerales no sulfurados).

- **Aniónicos:** estos colectores se disocian de modo que sus radicales junto con el grupo polar constituyen un anión (-), dejando en la solución un catión (que puede ser sodio, potasio o calcio).
- **Catiónicos:** aminas y sales cuaternarias de amonio derivados del amoniaco, con hidrógenos reemplazados por radicales. Según el número de reemplazos se tiene aminas I,

II III y IV. Los radicales con el nitrógeno forman el catión (+) mientras el anión corresponde a un hidroxilo (Wills & Finch, 2016).

2.1.1.2. *Espumantes*

Los espumantes son agentes tensoactivos o surfactantes solubles en agua que actúan en la interfase aire-agua reduciendo la tensión superficial de las burbujas, lo cual es indispensable para el control físico de la fase gaseosa en la celda.

Tienen un grupo hidrofílico (comúnmente un grupo hidroxilo) que interactúa con los dipolos del agua en la superficie externa de la burbuja, y un grupo hidrofóbico (cadena hidrocarbonada) que se orienta hacia el aire en el interior de la burbuja (Wills & Finch, 2016).

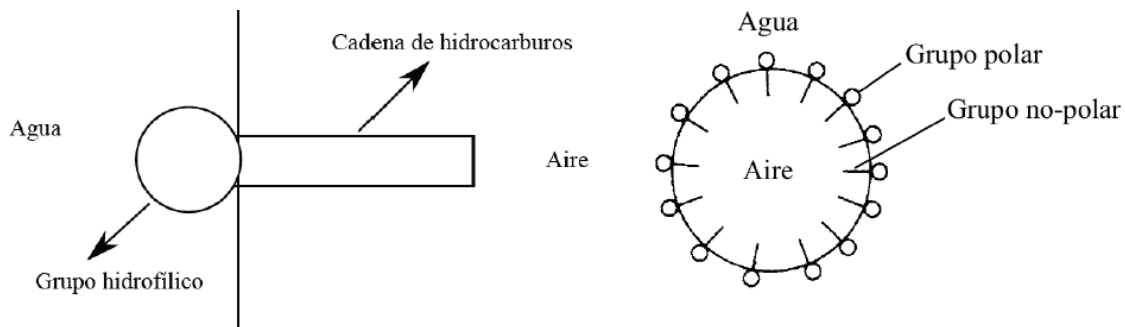


Figura 5: Adsorción del espumante en interfase aire-agua (Wills et al., 2006).

Tienen tres objetivos metalúrgicos clave (Klimpel & Isherwood, 1991):

- **Preservación de burbujas pequeñas:** Al disminuir la tensión superficial y retardar la coalescencia (la fusión de burbujas pequeñas en burbujas más grandes), los espumantes conservan un tamaño de burbuja fino y controlado. Esto multiplica el área superficial total del aire disponible y la probabilidad de colisión con las partículas, acelerando la cinética de flotación.
- **Reducción de la velocidad de ascenso:** Las burbujas pequeñas ascienden a menor velocidad, prolongando su tiempo de residencia y la ventana de colisión en la pulpa.
- **Estabilización de la espuma:** Ayudan a que las burbujas cargadas no exploten inmediatamente al alcanzar la superficie, sosteniendo las partículas de mineral hasta que

rebasen hacia la canaleta de concentrado. Cabe destacar que la estabilidad final de la espuma depende fuertemente de la cantidad e hidrofobicidad de las partículas sólidas adheridas, las cuales impiden físicamente el drenaje del agua de la película de espuma.

Los más comunes hoy en día son los alcoholes (como el metilisobutilcarbinol - MIBC, ideal para partículas finas) y los poliglicoles (como DF250 y F150, más efectivos para partículas gruesas debido a su mayor tensoactividad) (Bulatovic et al., 1998; Wills et al., 2006).

2.1.1.3. Activadores

Los activadores son reactivos reguladores que alteran de manera específica la naturaleza química de la superficie de ciertos minerales para facilitar la adsorción del colector, permitiendo la flotación de especies que de otro modo serían difíciles o imposibles de recuperar (Echeveste Vargas, 2023).

Suelen ser sales inorgánicas altamente solubles que se ionizan en solución. Los iones liberados reaccionan con la superficie del mineral mediante adsorción o intercambio iónico, modificando su estructura y creando sitios superficiales activos con los que el colector puede reaccionar químicamente (Wills & Finch, 2016).

Ejemplos de Activadores:

- **Activación de Pirita (FeS_2) por Cobre:** En los circuitos de sulfuros de cobre, la pirita puede ser activada accidentalmente por los iones de cobre (Cu^{2+}) liberados en la pulpa por disolución de los minerales de cobre, lo que reduce la selectividad del proceso y obliga a su posterior depresión (San Martín et al., 2021).

2.1.1.4. Depresantes

Los depresantes son reguladores que realizan la función opuesta a los colectores: incrementan la selectividad del proceso de flotación al actuar sobre determinados minerales que no se desean recuperar (generalmente la ganga), volviéndolos hidrofílicos y previniendo su flotación.

Los depresantes actúan solos o en combinación a través de tres vías principales (Wills & Finch, 2016):

- **Prevención de la acción del colector:** Se adsorben sobre el mineral de manera física o química, bloqueando los sitios activos donde el colector reaccionaría.
- **Desactivación:** Remueven o acomplejan las especies activadoras (como los iones de cobre en solución) que propician la flotación de la ganga.
- **Remoción de colectores adsorbidos:** Desorben o destruyen químicamente las películas de colector que se han adherido prematuramente a la superficie de los minerales no deseados.

Ejemplos de Depresantes:

- **Cal (Óxido de Calcio, (CaO)):** Se utiliza ampliamente para deprimir la pirita en la flotación selectiva de cobre-pirita. Su acción depresora se fundamenta en la formación de películas hidrofílicas sobre la pirita, tales como hidróxido de hierro (Fe(OH)), oxihidróxido de hierro (FeO(OH)), sulfato de calcio (CaSO₄) y carbonato de calcio (CaCO₃), las cuales bloquean la adsorción del colector xantato. Adicionalmente, eleva el pH de la pulpa dificultando la adsorción del colector por competencia con iones (OH⁻).
- **Metabisulfito de Sodio (MBS,(Na₂S₂O₅)):** Reactivo clave para deprimir pirita de forma selectiva en medios complejos (como agua de mar) a un pH natural cercano a la neutralidad. Actúa destruyendo químicamente la activación superficial por cobre y desorbiendo el xantato acumulado mediante mecanismos de oxidación y reducción simultáneos en la interfase (Hassanzadeh, 2016; Mu & Peng, 2019).

2.2. Recursos Hídricos

El agua se constituye como uno de los recursos estratégicos de mayor sensibilidad y criticidad para el desarrollo socioeconómico y ambiental de Chile (Serey Rodríguez, 2023). El análisis de su dinámica de consumo, su relación con la actividad minera y la profunda transformación hacia la incorporación de fuentes no convencionales configura un objeto de estudio multidimensional en el que convergen la climatología, la geología económica, la ingeniería de procesos y la economía hidroenergética (Gobierno de Chile, 2022).

El escenario hídrico contemporáneo de Chile está determinado de manera crítica por la denominada Megasequía, un fenómeno de déficit continuo de precipitaciones y aumento sostenido de temperaturas iniciado a partir de la década de 2010. Este fenómeno ha provocado mermas extraordinarias en los caudales de los ríos, la cota de nieve andina, el nivel de los lagos y el almacenamiento de acuíferos subterráneos en la zona central y centro-norte del país (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2, 2015).

La vulnerabilidad climática de Chile se ve amplificada por una profunda asimetría hídrica territorial. La zona centro-norte del país concentra aproximadamente el 80% de la demanda total de agua de la nación. Sin embargo, esta misma zona geográfica dispone de tan solo el 8% de la disponibilidad hídrica nacional (Gobierno de Chile, 2022).

2.2.1. Distribución de Usos de Agua por Sector Económico

El consumo nacional de fuentes continentales (superficiales y subterráneas) se distribuye desproporcionadamente entre las distintas actividades del país (Ministerio de Obras Públicas, 2020):

- **Sector Agropecuario (Agricultura y Riego):** Representa el consumidor dominante histórico, concentrando el 72,3% de la demanda consuntiva nacional de agua continental.
- **Sector Sanitario (Consumo Humano y Potable):** Equivale a aproximadamente el 11,8% del consumo total.
- **Sector Industrial:** Se adjudica cerca del 6,7% del recurso.
- **Sector Minero:** Consume de manera directa el 3,9% de las aguas continentales del país.

Pese a que las cifras oficiales demuestran que la minería utiliza una fracción minoritaria del uso de agua total, esta actividad se emplaza casi en su totalidad en las regiones del norte y centro-norte de Chile, caracterizadas por su extrema aridez y preocupante estrés hídrico, donde la competencia socioambiental por fuentes de agua dulce limitadas es crítica (Serey Rodríguez, 2023).

2.2.2. Uso de Agua en la Minería del Cobre en Chile

El balance hídrico de la minería del cobre en Chile para el 2024 se basa en seis componentes principales (Comisión Chilena del Cobre, 2025):

- **Extracción de agua operacional:** volumen de agua que entra en el sistema operacional y es utilizado para satisfacer la demanda de agua operativa.
- **Consumo de agua:** volumen de agua extraída que no se recupera (evaporación, incorporación en productos o relaves).
- **Descargas de agua:** volumen de agua liberada al ambiente o entregada a terceros.
- **Agua recirculada/reciclada:** flujos internos de agua que se vuelven a usar en los procesos.
- **Otras aguas manejadas:** aguas no usadas directamente en la operación pero que requiere gestión (desvíos o entregas a terceros).
- **Almacenamiento de agua:** volumen de agua contenida en tranques, estanques u otras instalaciones.

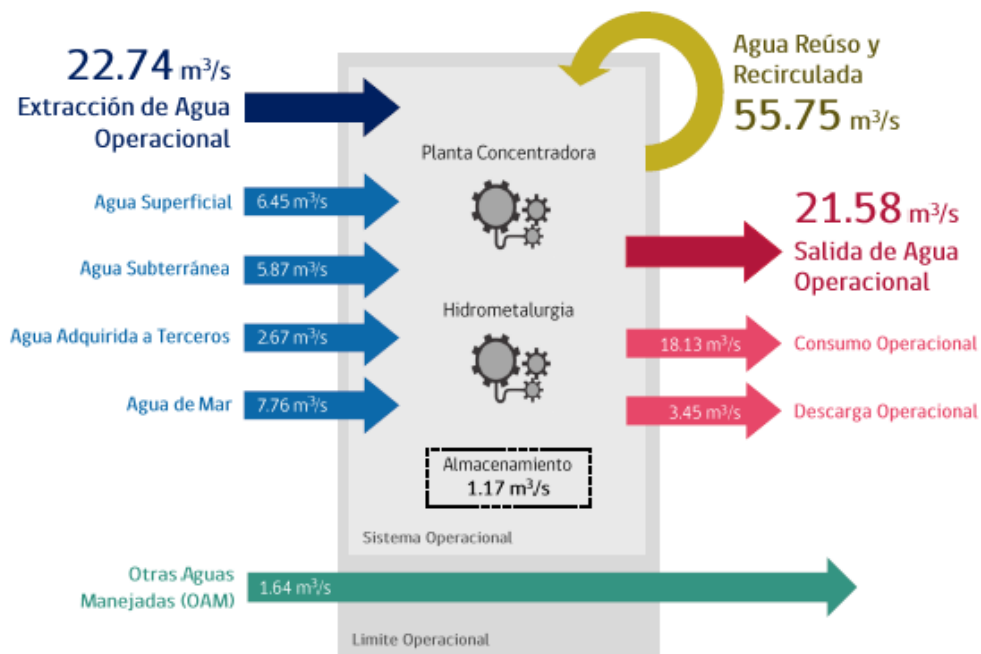


Figura 6: Balance hídrico de la minería del cobre en Chile para 2024 (Comisión Chilena del Cobre, 2025).

El uso de agua corresponde a toda el agua que participa en los procesos mineros, tanto la extraída de fuentes continentales y de mar, como la recuperada y recirculada dentro de la operación. Para el 2024, el uso total de agua en minería del cobre alcanzó un valor cercano a 78,49 m³/s, divididos en 22,74 m³/s a agua extraída y 55,75 m³/s a agua recupera y recirculada (Comisión Chilena del Cobre, 2025).

Distribución de Agua por Proceso Operativo

Para el 2024, el consumo operacional de agua en minera de cobre alcanzó 18,13 m³/s. Este consumo de agua se desglosa principalmente en (Comisión Chilena del Cobre, 2025):

- **Concentración/ Depósito de Relaves:** Es el proceso más demandante por su naturaleza física, absorbiendo el 80,30% de los recursos hídricos ingresados al sistema. El procesamiento mineral en el circuito húmedo de flotación requiere que el mineral molido se mueva suspendido en forma de pulpa.
- **Hidrometalurgia (Lixiviación - SX - EW):** Representa el 8,44% de la demanda de agua.
- **Otros Procesos (Servicios, Control de Polvo, Fundición y Refinería):** Consumen el porcentaje marginal remanente.

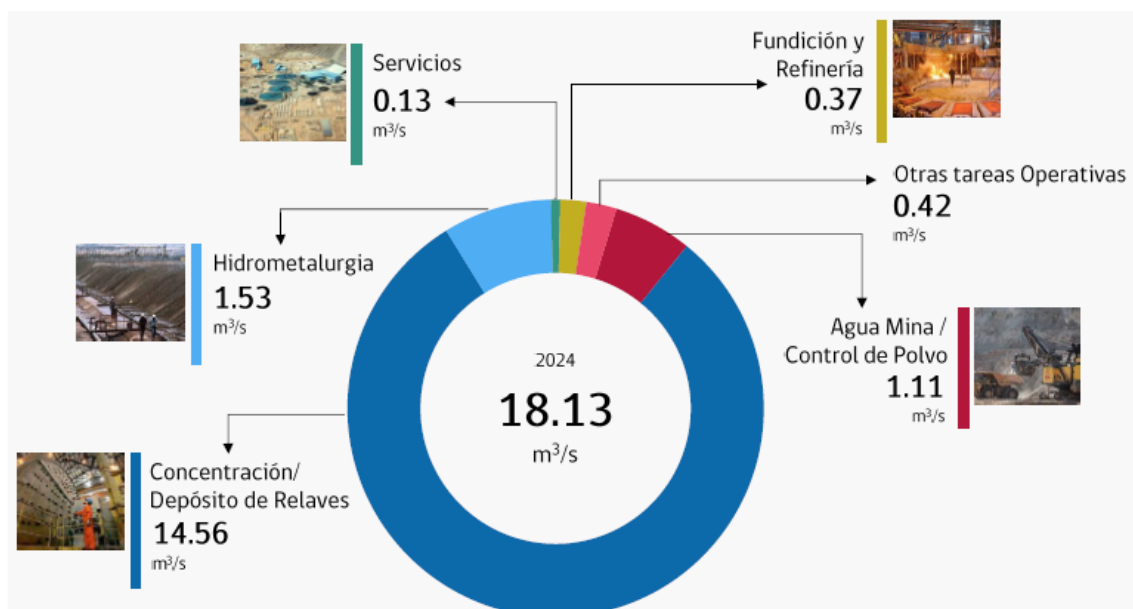


Figura 7: Consumo de agua operacional por proceso en la minería del cobre. Fuente: Cochilco, 2025.

Variables Mineralógicas: Transición a Sulfuros y Caída en las Leyes de Mineral

El crecimiento proyectado del consumo absoluto de agua en la minería no responde a un descuido tecnológico, sino a dos factores de naturaleza estrictamente geológica (Comisión Chilena del Cobre, 2026):

- **Cambio de Matriz Productiva (Óxidos a Sulfuros):** El agotamiento progresivo de las reservas superficiales de minerales oxidados (procesados hidrometalúrgicamente con menor requerimiento de agua) obliga a la explotación intensiva de yacimientos primarios de sulfuros de cobre. Estos minerales requieren molienda fina y flotación en celda húmeda, elevando automáticamente el consumo del recurso.
- **Caída Sistemática en las Leyes de Mineral:** Al disminuir la ley del cobre (menor porcentaje de metal fino por tonelada de roca), las plantas concentradoras se ven obligadas a procesar un volumen masivo y muy superior de mineral estéril para mantener estables las toneladas de cobre final. El procesamiento de un tonelaje de roca más elevado multiplica de manera directa los requerimientos de agua de reposición por cada tonelada de metal fino producido.

2.3. Agua de Mar

Para mitigar la presión física e institucional sobre las cuencas continentales agotadas, la minería chilena ha emprendido una reestructuración de su matriz de suministro orientándose decisivamente hacia el uso de fuentes no convencionales provenientes del océano (agua de mar).

En 2024, la demanda de agua en minería del cobre alcanzó los 18,46 m³/s, de los cuales el 40,7%, es decir 7,52 m³/s corresponden a agua de mar (Comisión Chilena del Cobre, 2026).

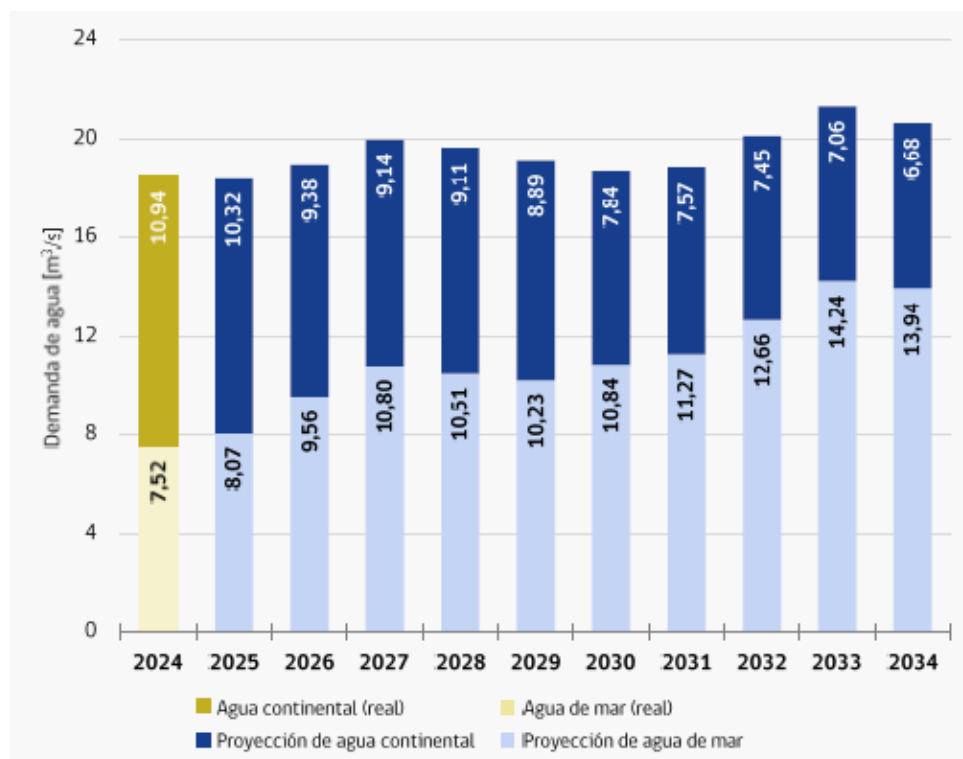


Figura 8: Proyección nacional de la demanda de agua en la minería del cobre para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.

Según la Figura 8, se estima que para 2034 se requerirán un total de 20,6 m³/s de agua en operaciones relacionadas a la minería del cobre, lo que se traduce en un aumento de 2,1 m³/s para el inicio del periodo analizado. Por otra parte, se puede observar que se proyecta una disminución en el consumo de agua de mar continental, pasando de 10,94 m³/s en 2024 a 6,68 m³/s en 2034, lo que representa una reducción de un 38,9%. A su vez, el consumo de agua de mar se proyecta en ascenso, pasando de 7,52 m³/s en 2024 a 13,94 m³/s en 2034, lo que representa un incremento del 85,3%. Hacia 2034, el agua de mar tendrá una participación cercana al 67,6% del abastecimiento hídrico de la minería del cobre, aumentando notablemente su uso respecto del 2024, cuando representaba cerca del 40,7% del total. Estos incrementos en el consumo de agua de mar reflejan la creciente incorporación de fuentes no convencionales en respuesta a la necesidad de asegurar la continuidad operacional y la sostenibilidad de la actividad minera en un contexto de escasez hídrica estructural (Comisión Chilena del Cobre, 2026).

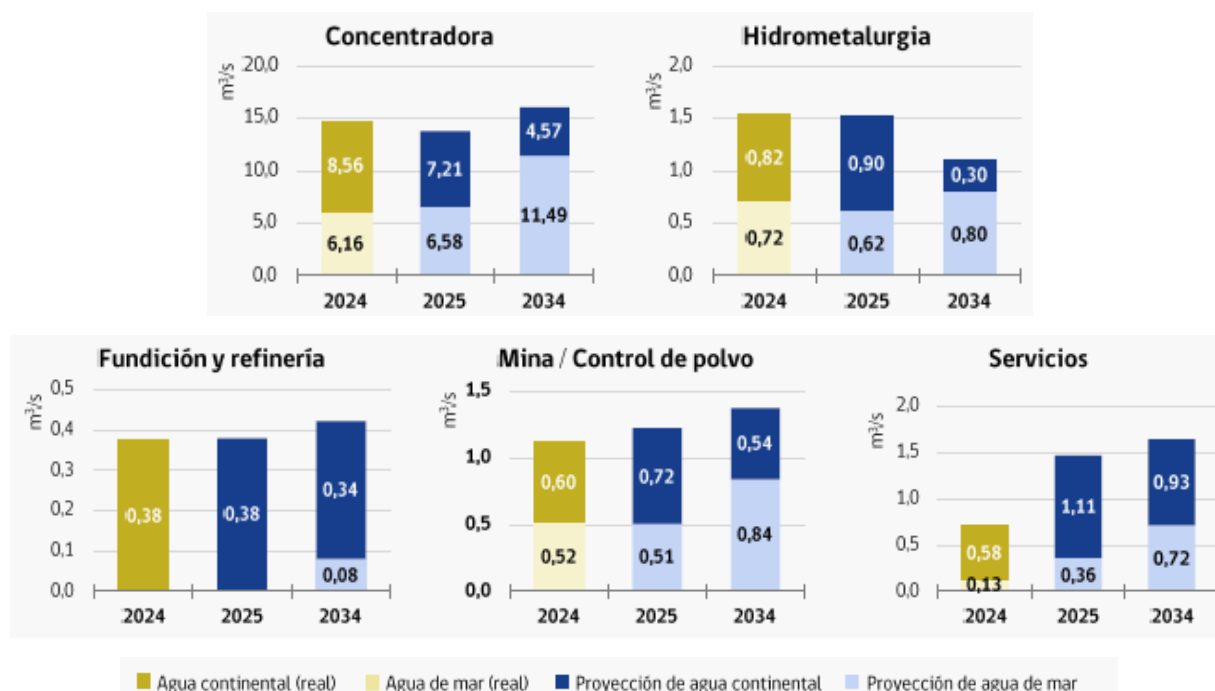


Figura 9: Proyección de la demanda de agua en minería del cobre según el proceso operativo para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.

El proceso de concentración absorberá cerca del 77,9% (alrededor de 16,06 m³/s) de toda el agua captada e impulsada desde el océano hacia el año 2034, impulsado por el tratamiento exclusivo de sulfuros. El agua de mar llegará a suplir aproximadamente el 71,5% del requerimiento hídrico de las plantas concentradoras para dicha fecha (Comisión Chilena del Cobre, 2026).

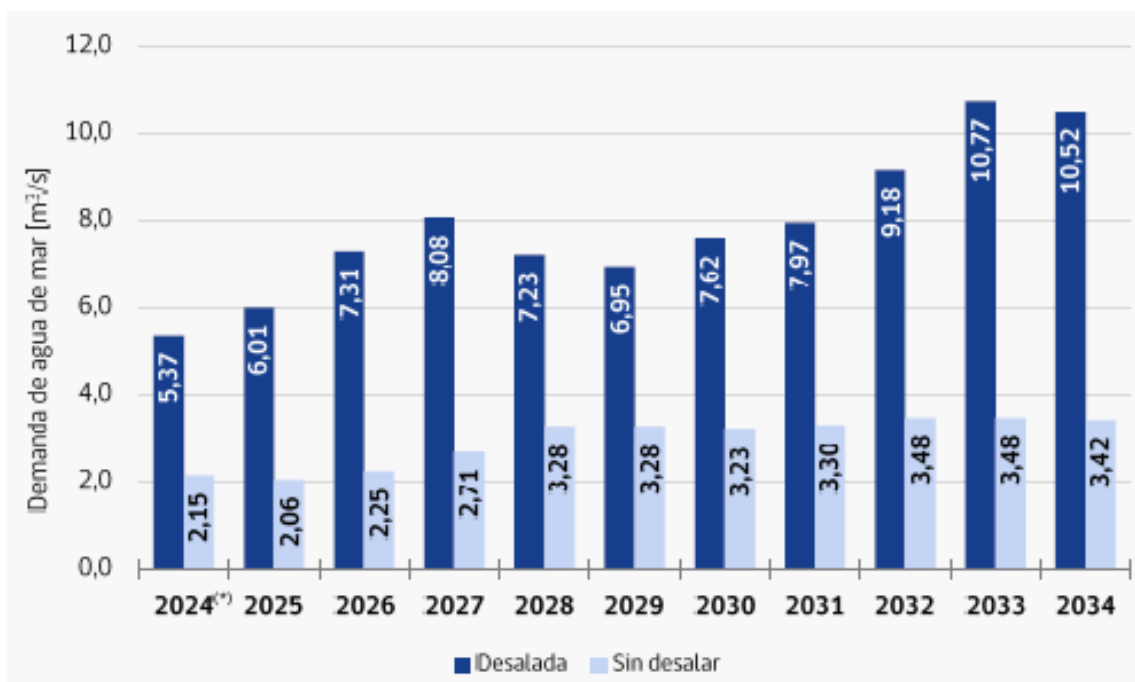


Figura 10: Proyección de la demanda de agua en minería del cobre según la fuente de abastecimiento para el periodo 2025-2034. Fuente: Cochilco, 2026.

El agua de mar ingresa al circuito productivo bajo dos modalidades metodológicas:

- **Agua de Mar Desalada (Osmosis Inversa):** Corresponde a la remoción previa de sales en la costa para obtener agua dulce de alta pureza. Es la alternativa con mayor proyección de crecimiento. Para el 2034 se estima que representará 10,52 m³/s del suministro marino, registrando un alza del 95,8% en su uso (Comisión Chilena del Cobre, 2026).
- **Agua de Mar Directa (Salobre / Sin Desalar):** Consiste en la captación y bombeo de agua salada directa a los procesos de molienda y flotación sin tratamiento de desalinización. Se proyecta que represente un consumo de 3,42 m³/s en 2034 (Comisión Chilena del Cobre, 2026).

2.3.1. Problemáticas del agua de mar

La incorporación de agua de mar directa (sin desalar) en los circuitos de flotación de sulfuros de cobre representa un hito fundamental para la sustentabilidad hídrica de la minería, pero introduce complejidades fisicoquímicas sumamente drásticas en comparación con el uso de agua fresca o natural (Castro, 2018; Mu & Peng, 2019).

A diferencia del agua dulce o de soluciones puras de cloruro de sodio (NaCl), el agua de mar es una disolución salina compleja con una salinidad típica de 35 g/L (aproximadamente 0,6 M de NaCl). El factor crítico no radica únicamente en su alta fuerza iónica, sino en la presencia de iones divalentes e hidrolizables (como magnesio Mg^{2+} , calcio Ca^{2+} , sulfatos SO_4^{2-} , bicarbonatos HCO_3^- y boratos) que alteran de manera sinérgica la termodinámica, la electroquímica de las superficies minerales y la dinámica de las burbujas (Castro, 2018; San Martín et al., 2021).

A continuación, se exponen y estructuran teóricamente las principales problemáticas de este proceso:

El Efecto Tampón y el Consumo Excesivo de Cal (CaO)

En la flotación convencional con agua dulce, la selectividad entre el sulfuro de cobre (calcopirita, $CuFeS_2$) y la ganga de hierro (pirita, FeS_2) se logra operando a un pH altamente alcalino (entre 10,5 y 12,0), regulado mediante la adición de cal (CaO). Bajo estas condiciones alcalinas, la superficie de la pirita se oxida y se recubre de especies hidrofílicas que impiden la adsorción del colector xantato, hundiéndola de manera selectiva (Castro, 2018; Mu & Peng, 2019; Wills & Finch, 2016).

Sin embargo, al utilizar agua de mar directa, este esquema tradicional se vuelve económicamente inviable debido a dos fenómenos físico-químicos:

- **Capacidad de amortiguación (Efecto Buffer):** El agua de mar posee un pH natural estable entre 7,8 y 8,2. Este valor está fuertemente defendido por el sistema amortiguador del par bicarbonato/carbonato y borato/ácido bórico (Pytkowicz & Atlas, 1975).
- **Reacciones de precipitación lateral:** Cuando el pH comienza a superar valores de 9,0 a 10,0, los iones divalentes de magnesio y calcio reaccionan masivamente con los grupos hidroxilo (OH^-) aportados por la cal, formando precipitados coloidales insolubles de hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) y carbonato de calcio ($CaCO_3$) (Castro, 2018).

Como consecuencia de estos dos efectos, el consumo de cal para alcanzar un pH óptimo de depresión de pirita (pH 11) en agua de mar se incrementa drásticamente, llegando a ser entre 8 y 10 veces mayor que en agua dulce (elevándose desde ~1 kg/t de mineral procesado hasta cerca de 10 kg/t) (Castro, 2012).

Activación Fisicoquímica de la Pirita (FeS₂) en Medio Salino

La pirita presenta de forma natural una flotabilidad mucho más agresiva en agua de mar que en agua dulce. Sin reactivos adicionales, la recuperación de la pirita se eleva desde un 40% en agua dulce hasta un 60%-80% en agua marina (Castellón et al., 2024).

Alteración de las Propiedades de la Espuma y las Burbujas

La presencia masiva de electrolitos disueltos cambia la física de la fase gaseosa dentro de las celdas de flotación (Castro, 2018):

- **Inhibición de la coalescencia:** Los iones salinos impiden que las burbujas de aire colisionen entre sí y se fusionen para formar burbujas grandes. Esto favorece la existencia de burbujas extremadamente pequeñas y de tamaño muy homogéneo, lo cual incrementa notablemente el área superficial de contacto y acelera la cinética de flotación de partículas finas de calcopirita.
- **Reducción del espesor de la espuma:** En contraste, la estabilidad de la fase de espuma en la superficie se ve severamente afectada. Los iones disueltos, especialmente el calcio (Ca²⁺), ejercen una fuerte inhibición sobre el crecimiento del espesor de la capa de espuma. En agua dulce, la espuma alcanza su máximo espesor a pH 10,5, mientras que en agua de mar la espuma es más delgada, frágil y poco dependiente de las variaciones del pH, lo que dificulta el arrastre físico adecuado del concentrado hacia las canaletas de recolección.

3. Metodología

Para dar cumplimiento a los objetivos definidos, y establecer parámetros óptimos para la depresión de pirita mediante metabisulfito de sodio en flotación con agua de mar artificial, la presente investigación se desarrollará iniciando con la preparación y adecuación de los materiales fundamentales.

3.1. Preparación muestra mineral

En primer lugar, se obtendrán muestras de mineral de pirita de alta pureza, las cuales serán sometidas a procesos de chancado y molienda, seguido de un tamizado para aislar la fracción granulométrica óptima para la flotación (malla #70 y #400, entre 37 μm y 212 μm).

3.2. Preparación agua de mar artificial

Posterior a esto, se preparará agua de mar artificial, en lugar de usar agua de mar natural, con el objetivo de minimizar los efectos biológicos y proporcionar una solución reproducible de composición conocida.

Para preparar esta solución se deben considerar dos factores: los reactivos deben ser pesables y de composición conocida, y las sales deben agregarse de manera que se evite la precipitación de compuestos insolubles. Para evitar la precipitación de CaCO_3 , CaSO_4 , SrCO_3 o SrSO_4 , se debe preparar el agua de mar en dos recipientes separados: en uno se mezclan las sales gravimétricas con dos tercios del volumen total de agua destilada, mientras que en el segundo recipiente se mezclan las sales volumétricas con el tercio restante de agua destiladas. Finalmente, se mezclan ambas soluciones mediante agitación mecánica hasta que el pH no cambie más de 0,02 unidades durante un periodo de dos horas (Kester et al., 1967) En la *Tabla 1*, se presentan las sales que se emplean para elaborar agua de mar artificial.

Gravimétricas				
Sal	Peso Molecular [g/mol]	Dosis Kester [g/kg de solución]		
Cloruro de Sodio NaCl	58,44	23,926		
Sulfato de Sodio Na ₂ SO ₄	142,04	4,008		
Cloruro de Potasio KCl	74,56	0,677		
Bicarbonato de Sodio NaHCO ₃	84,01	0,196		
Bromuro de Potasio KBr	119	0,098		
Ácido Bórico H ₃ BO ₃	61,83	0,026		
Fluoruro de Sodio NaF	41,98	0,003		
Volumétricas				
Sal	Peso Molecular [g/mol]	Moles/kg de solución	Conc. Molar	Dosis Kester [g/kg de solución]
Cloruro de Magnesio MgCl ₂ • 6H ₂ O	203,3	0,05327	1,0	10,830
Cloruro de Calcio CaCl ₂ • 2H ₂ O	147,01	0,01033	1,0	1,519
Cloruro de Estroncio SrCl ₂ • 6H ₂ O	266,62	0,00009	0,1	0,024

Tabla 1: Composición para 1 kg de agua de mar artificial. Adaptado de Kester et al, 1967.

3.3. Pruebas de flotación

El desarrollo experimental se llevará a cabo mediante pruebas de microflotación en celda Hallimond (Figura 11), empleando 1 g de pirita pura, 80 ml de agua de mar artificial, y dosis variables de soluciones de: Sulfato de Cobre, colector Xantato Isopropílico de Sodio (Xantato AERO343) y depresante Metabisulfito de Sodio (Tabla 2).

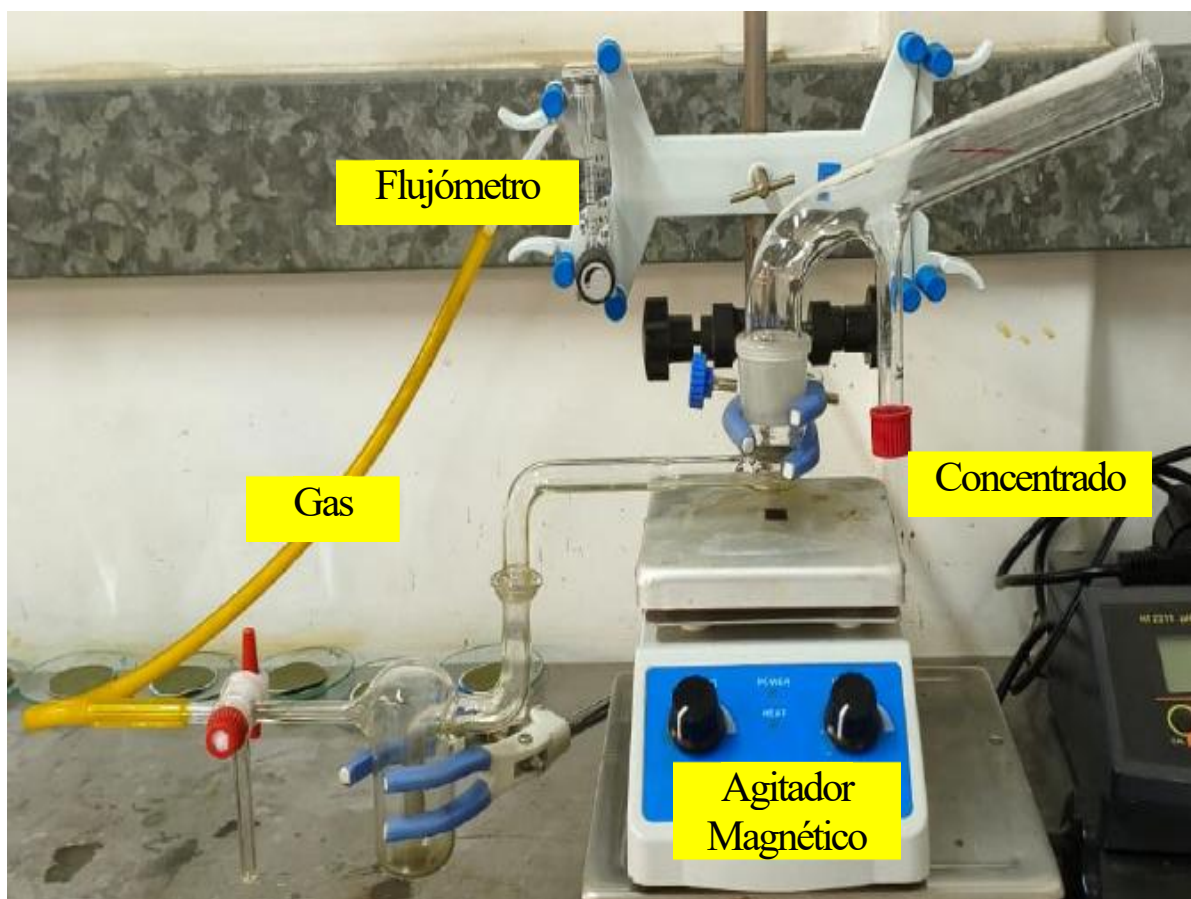


Figura 11: Montaje experimental celda Hallimond.

Reactivo	Sulfato de Cobre	Metabisulfito de Sodio	Xantato AERO343
	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	$\text{C}_4\text{H}_7\text{OS}_2\text{Na}$
Conc. Solución Inicial (M)	$1,0 \times 10^{-2}$	$5,3 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$
Volumen Agregado (μL)	0 ; 100	50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400	50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 300
Dosis (g/ton)	0 ; 250	50 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400	50 ; 100 ; 150 ; 200 ; 300

Tabla 2: Dosis de reactivos en pruebas de flotación.

Cada ensayo se realizará en triplicado para reducir errores experimentales y seguirán un protocolo (Figura 12) que incluye el acondicionamiento de la pulpa, la adición secuencial de reactivos, la medición de pH y potencial de la pulpa en diferentes puntos del proceso, la recolección de espumas y el posterior filtrado y secado de los productos.

Inicialmente, se llevarán a cabo las pruebas de flotabilidad natural (“LINEA BASE” en Figura 12) de la pirita en agua de mar, sin adición de reactivos. Para esto, se agrega el mineral y 20 ml de agua de mar en la celda e inicia la agitación magnética para acondicionar la pulpa durante 5 minutos; al culminar este tiempo de acondicionamiento se mide el pH y Eh de la pulpa (pH inicial y Eh inicial, respectivamente). Posteriormente, se agregan 60 ml de agua de mar y se da paso al flujo de aire (0,05 L/min) para dar inicio a una flotación durante 5 minutos, transcurrido este tiempo se corta el flujo de aire, se mide el pH y Eh de la pulpa (pH final y Eh final, respectivamente), y se recuperan el concentrado y relave obtenidos para su posterior filtrado, secado y pesaje.

En segundo lugar, se realizarán series de pruebas variando la dosis de colector en el agua de mar artificial (“COLECTOR” en Figura 12), con el fin de identificar la concentración que maximice la recuperación de la pirita. En estas pruebas, posterior al acondicionamiento de la pulpa y la medición de pH y Eh inicial, se agregan volúmenes variables (Tabla 2) de una solución de xantato isopropílico de sodio (Xantato AERO343) para así dar inicio a un acondicionamiento de colector durante 5 minutos, en donde una vez transcurrido el tiempo, se mide el pH y Eh de la pulpa (pH AERO y Eh AERO, respectivamente) y se da paso a la etapa de flotación descrita anteriormente.

En tercer lugar, se realizarán pruebas manteniendo la dosis de colector óptima (mayor recuperación de pirita) y variando la dosis de metabisulfito de sodio (“DEPRESANTE” en Figura 12), con el objetivo de identificar la dosis que maximice la depresión de pirita. En estas pruebas, posterior al acondicionamiento de la pulpa y la medición de pH y Eh inicial, se agregan volúmenes variables (Tabla 2) de una solución de metabisulfito de sodio para así dar inicio a un acondicionamiento de depresante durante 10 minutos, en donde una vez transcurrido el tiempo, se mide el pH y Eh de la pulpa (pH MBS y Eh MBS, respectivamente) y se da paso a la etapa de acondicionamiento de colector y flotación descritas anteriormente.

En adición, con el objetivo de replicar un entorno a nivel industrial, donde la presencia de otros minerales que contienen cobre puede provocar la activación de la pirita, se replicarán las mismas pruebas mencionadas (flotabilidad natural, acondicionamiento de colector y acondicionamiento de depresante), activando previamente la pirita (durante el acondicionamiento de la pulpa) mediante la adición de 100 μL de una solución de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Los datos obtenidos, basados en los pesos de concentrados y colas, permitirán calcular la recuperación metalúrgica y construir las curvas de respuesta necesarias para validar la hipótesis de investigación. Además, la medición de pH y Eh en diferentes etapas del proceso permitirán evaluar su comportamiento e influencia en la depresión de pirita.

El diseño experimental adoptado en esta investigación presenta ciertas limitaciones inherentes que deben ser consideradas al interpretar los resultados. En primer lugar, la utilización de la celda de microflotación tipo Hallimond permite el empleo de muestras de pirita de alta pureza, aislando el comportamiento individual del mineral para fines de este estudio fundamental, pero omite las complejas interacciones galvánicas y la competencia por adsorción de reactivos que ocurren en una pulpa polimetálica real. Finalmente, el uso de agua de mar artificial garantiza la reproducibilidad de la fuerza iónica y evita la precipitación de carbonatos durante la preparación, pero excluye la materia orgánica y biológica propia del agua de mar natural, las cuales podrían ejercer efectos secundarios menores en la adsorción de colectores y depresantes en un entorno operativo real.

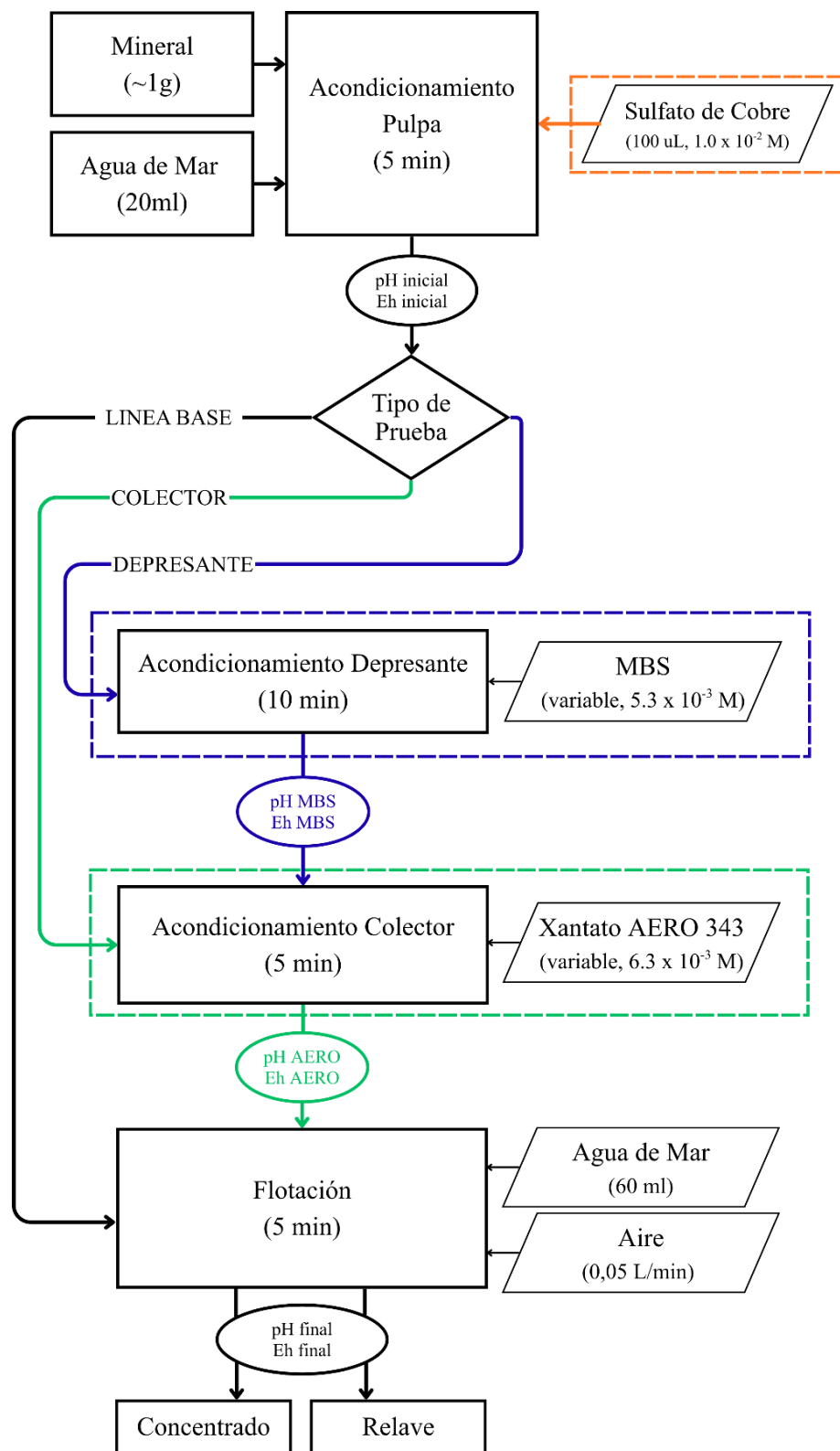


Figura 12: Metodología de las pruebas de flotación.

4. Resultados y Discusión

4.1 Flotabilidad Natural

En ausencia de colector Xantato AERO343, la pirita pura carece de hidrofobicidad, reportando una flotabilidad de 8,97%, depositando un 91,03% de la masa en el relave. La adición de iones de cobre no incrementa esta recuperación, manteniéndose prácticamente idéntica con un 8,80% en el concentrado y un 91,20% en el relave. Esto confirma que, si bien el cobre interactúa con la superficie del mineral (activación), esta modificación no es suficiente para inducir la flotación masiva de la pirita sin la presencia de un agente colector.

En cuanto a los valores de pH, luego del acondicionamiento de la pulpa, se registra un pH de 5,95 para la pirita pura. En presencia de cobre como agente activador, se acentúa este carácter ácido, reduciendo el pH a 5,66. Este descenso responde a la hidrólisis natural de los iones de cobre en la solución. A medida que transcurre el experimento, ambos sistemas exhiben una clara tendencia hacia la neutralización. El pH del sistema con pirita pura asciende hasta un pH de 6,92, mientras que el pH del sistema con pirita activada se eleva hasta 6,81. Esto indica que la pulpa tiende a equilibrarse de forma natural durante la aeración y agitación propias del proceso de flotación.

Desde el punto de vista electroquímico, el ambiente es uniforme y altamente oxidante. La prueba con pirita pura inicia con un Eh de +377,23 mV, y la prueba con pirita activada arranca con un potencial de +385,87 mV. A diferencia de las variaciones bruscas de pH, el potencial electroquímico se mantiene sumamente estable a lo largo de todo el proceso. La pirita pura finaliza con un potencial de +382,23 mV y la pirita activa con un potencial de +378,17 mV. Estos niveles tan altos reflejan un elevado poder oxidante del medio.

4.2 Optimización del Colector

En los ensayos de optimización de colector Xantato AERO343, se utilizaron dosis de 0, 50, 100, 150, 200 y 300 gramos de colector por tonelada de mineral. La *Figura 13* muestra los resultados de la recuperación de pirita para las diferentes dosis de colector.

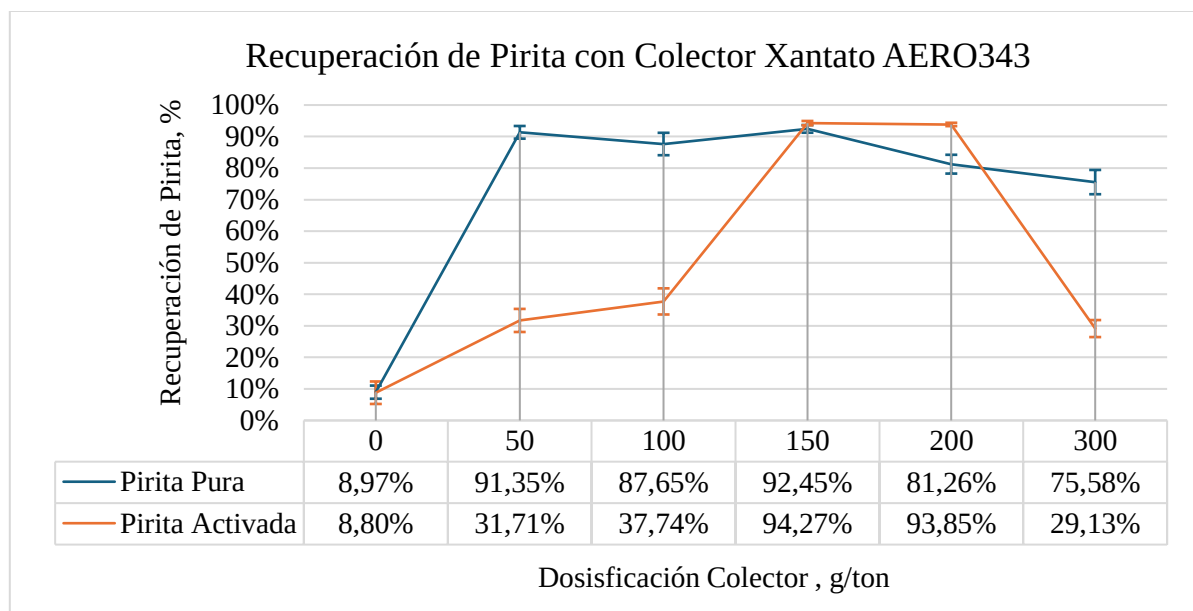


Figura 13: Efecto de diferentes dosis de colector Xantato AERO343 en la recuperación de pirita en agua de mar.

En las pruebas de pirita pura se puede apreciar que esta exhibe una hidrofobicidad excepcionalmente alta y estable a lo largo de todas las dosisificaciones de colector evaluadas. Las recuperaciones en el concentrado se mantienen uniformemente por encima del 75%, fluctuando entre un mínimo de 75,58% (300 g/ton) y un máximo de 92,45% (150 g/ton). Este comportamiento indica que, en agua de mar artificial, la pirita pura alcanza su punto de saturación con dosis muy bajas de xantato, haciendo que los incrementos posteriores de reactivo no generen cambios metalúrgicos sustanciales.

La adición de iones de cobre altera de forma radical la adsorción del colector, generando una curva de recuperación altamente dependiente de la dosisificación. A dosis bajas, 50 g/ton y 100 g/ton, la recuperación alcanza niveles de 31,71% y 37,74% respectivamente. Los iones de cobre en la superficie del mineral probablemente consumen el colector disponible formando complejos que no otorgan hidrofobicidad suficiente, derivando la mayor parte de la masa al relave (68,29% y 62,26%). Al alcanzar los 150 g/ton y 200 g/ton, el sistema supera la demanda química de la superficie activada, disparando recuperaciones hasta 94,27% y 93,85% respectivamente. Una dosis excesiva de 300 g/ton provoca una fuerte depresión en la recuperación hasta un valor de 29,13%.

Esto sugiere un efecto perjudicial por saturación o interacciones secundarias del exceso de reactivo.

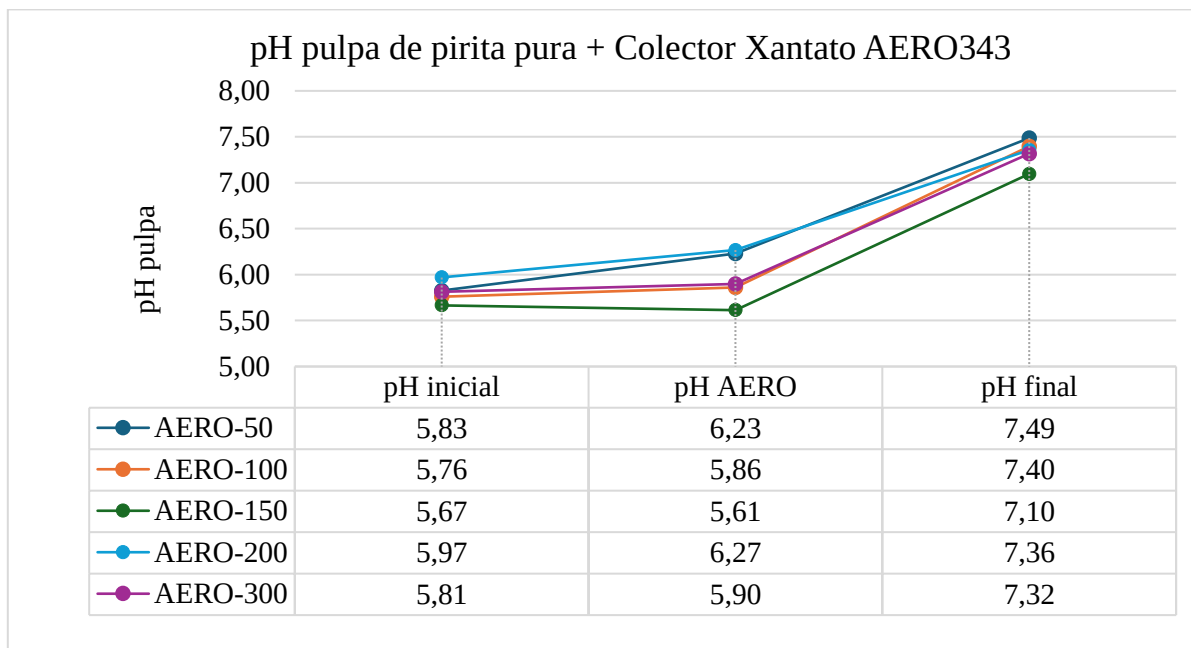


Figura 14: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita pura con adición de colector Xantato AERO343.

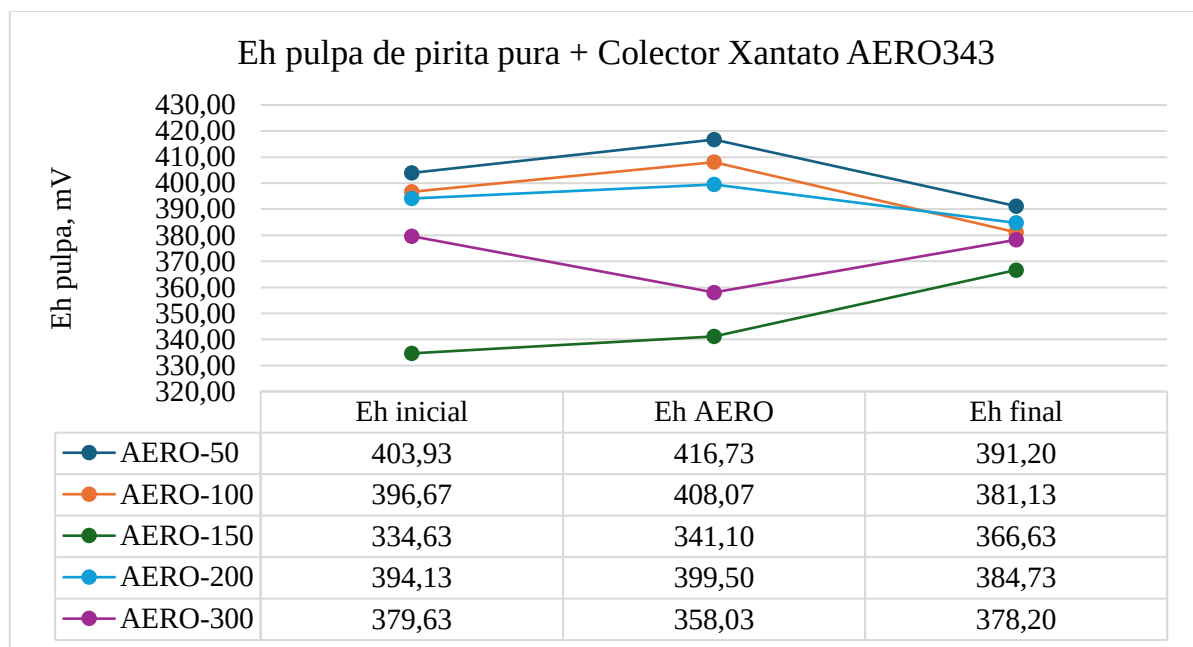


Figura 15: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita pura con adición de colector Xantato AERO343.

En el caso de la pirita pura, el entorno fisicoquímico respalda la alta flotabilidad exhibida. La pulpa inicia con un pH ácido, (5,67 a 5,97), se mantiene relativamente estable tras la adición del colector (5,61 a 6,27) y se neutraliza hacia el final de la flotación (7,10 a 7,49). Los potenciales estandarizados confirman una fuerza impulsora termodinámica masiva a lo largo de todo el proceso de flotación: los valores de Eh tras dosificar el colector oscilan entre +341,10 mV y +416,73 mV. Este elevado poder oxidante garantiza la conversión instantánea e ininterrumpida del xantato a dixantógeno.

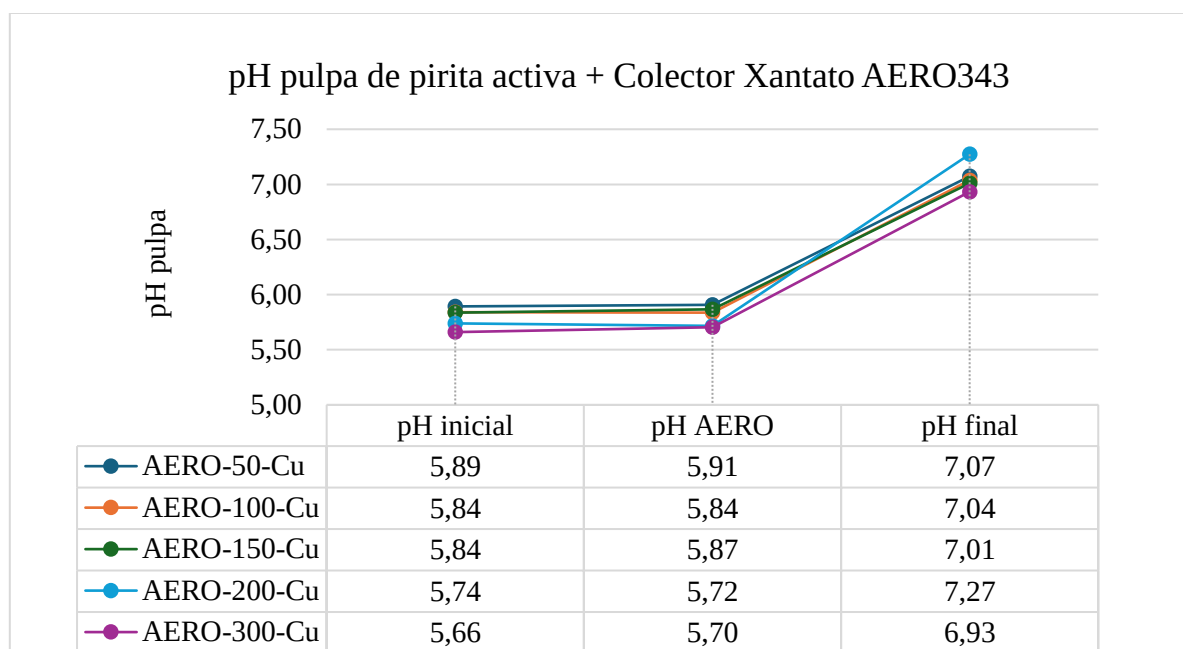


Figura 16: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita activada con adición de colector Xantato AERO343.

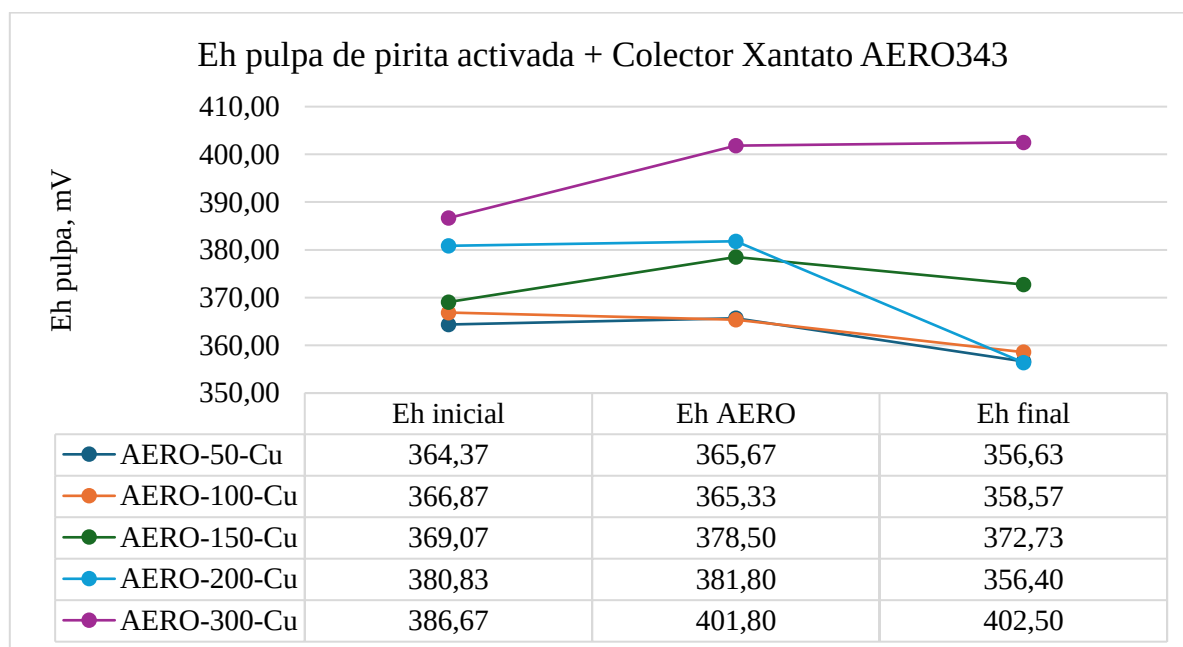


Figura 17: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita activada con adición de colector Xantato AERO343.

Para la pirita activada con cobre, el comportamiento del pH es muy similar al de la pirita pura (iniciando ácido y terminando neutro), pero ligeramente más tamponado durante la etapa de acondicionamiento con el colector xantato, manteniéndose casi invariable entre 5,70 y 5,91. Al igual que en las pruebas sin cobre, los potenciales permanecen en rangos altamente oxidantes ($>+356$ mV en todas las etapas), demostrando que la caída en la recuperación a bajas y altas dosis no obedece a una falta de potencial termodinámico, sino estrictamente a la química de superficie mediada por el cobre.

Al comparar todas las pruebas realizadas, se observa que tanto para el sistema con pirita pura como para el sistema de pirita activada con cobre la mayor cantidad de mineral recuperado en el concentrado se logra con una dosis de 150 g/ton de AERE343, alcanzando una recuperación de 92,45% y 94,27% respectivamente, por lo tanto, esta será la dosis definida para realizar las pruebas de optimización de metabisulfito de sodio.

4.3 Optimización Metabisulfito de Sodio

En los ensayos de MBS, se utilizaron dosis de 0, 50, 100, 200, 300 y 400 gramos de depresante por tonelada de mineral, una dosis fija de colector Xantato AERO343 de 150 g/t.

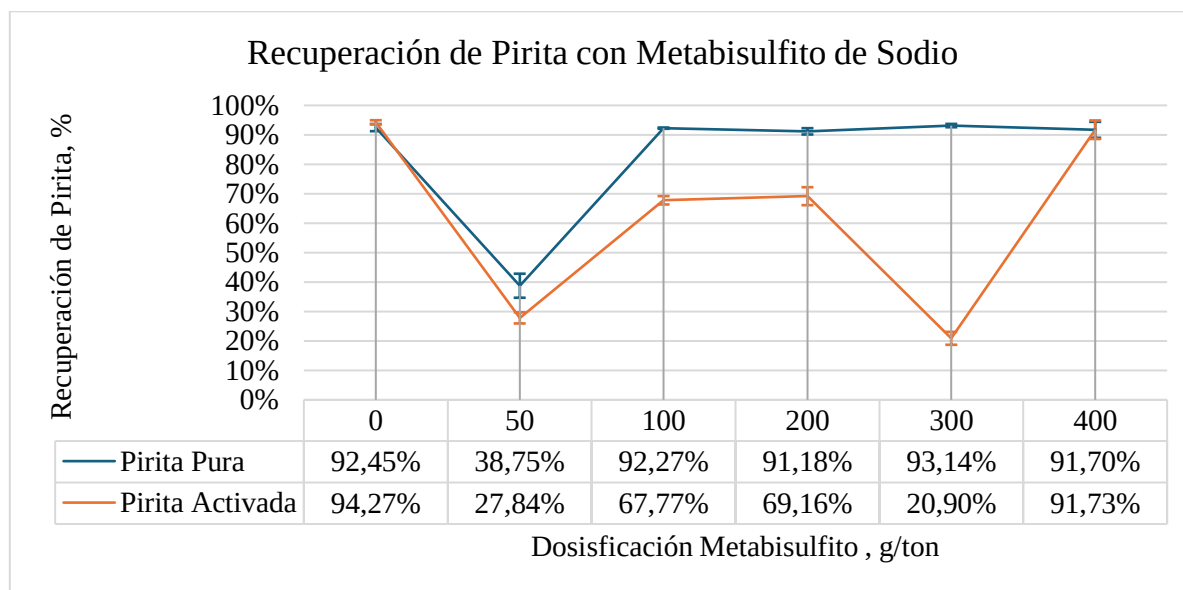


Figura 18: Efecto de diferentes dosis de colector Metabisulfito de Sodio y 150g/ton de colector Xantato AERO343 en la recuperación de pirita en agua de mar.

De la *Figura 18* se puede observar que, para el caso de flotación de pirita pura, la dosis más baja de reactivo (50 g/ton) logra la menor recuperación de mineral, presentando una recuperación en el concentrado a un 38,75% y enviando el 61,25% del mineral al relave. Al incrementar las dosis de MBS a 100, 200, 300 y 400 g/ton, el reactivo pierde totalmente su efecto depresante. En todos estos casos, la pirita vuelve a flotar masivamente, alcanzando recuperaciones superiores al 91%, llegando a un máximo de 93,14% con 300 g/ton.

El comportamiento frente al depresante cambia drásticamente con la activación mediante cobre. Una dosis de 50 g/ton logra una depresión efectiva, reduciendo el concentrado a 27,84%. Dosis intermedias de 100 y 200 g/ton de MBS generan una depresión parcial e ineficaz, con recuperaciones en el concentrado e 67,77% y 69,16% respectivamente. Al alcanzar los 300 g/ton de MBS, el sistema experimenta una fuerte depresión, desplomando la flotabilidad de pirita a apenas 20,90% en el concentrado, mientras que el relave posee el 79,10% del mineral. Sin embargo, una sobredosificación de 400 g/ton de MBS reactiva violentamente el mineral, disparando la recuperación del concentrado a un 91,73%.

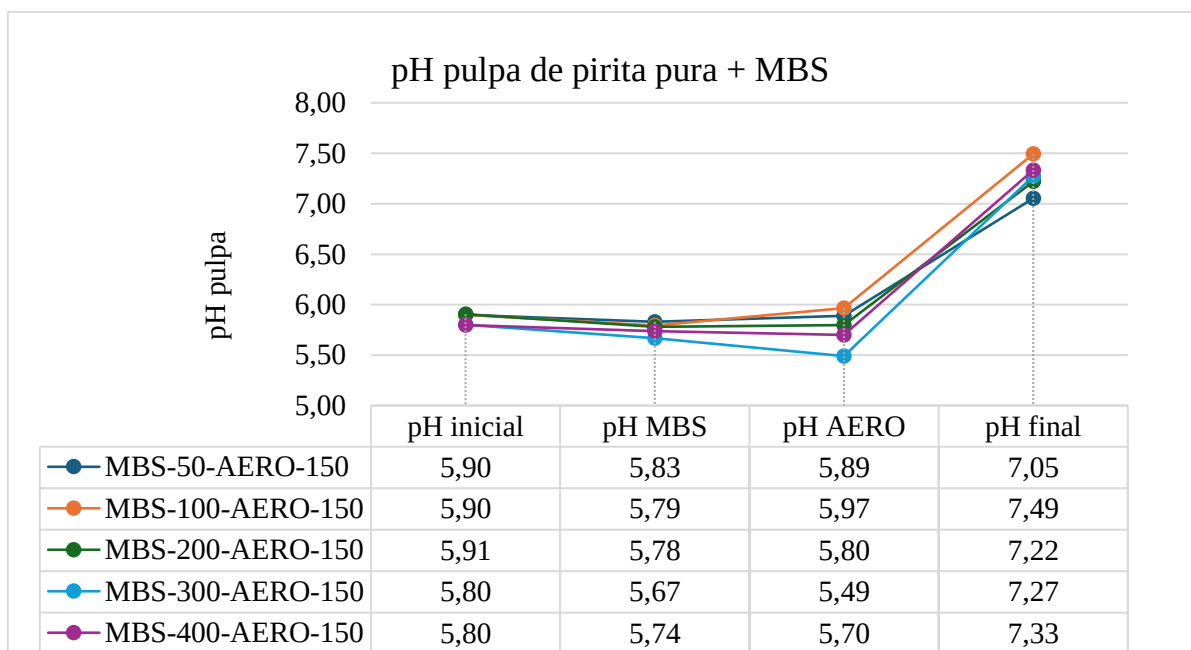


Figura 19: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita pura con adición de MBS.

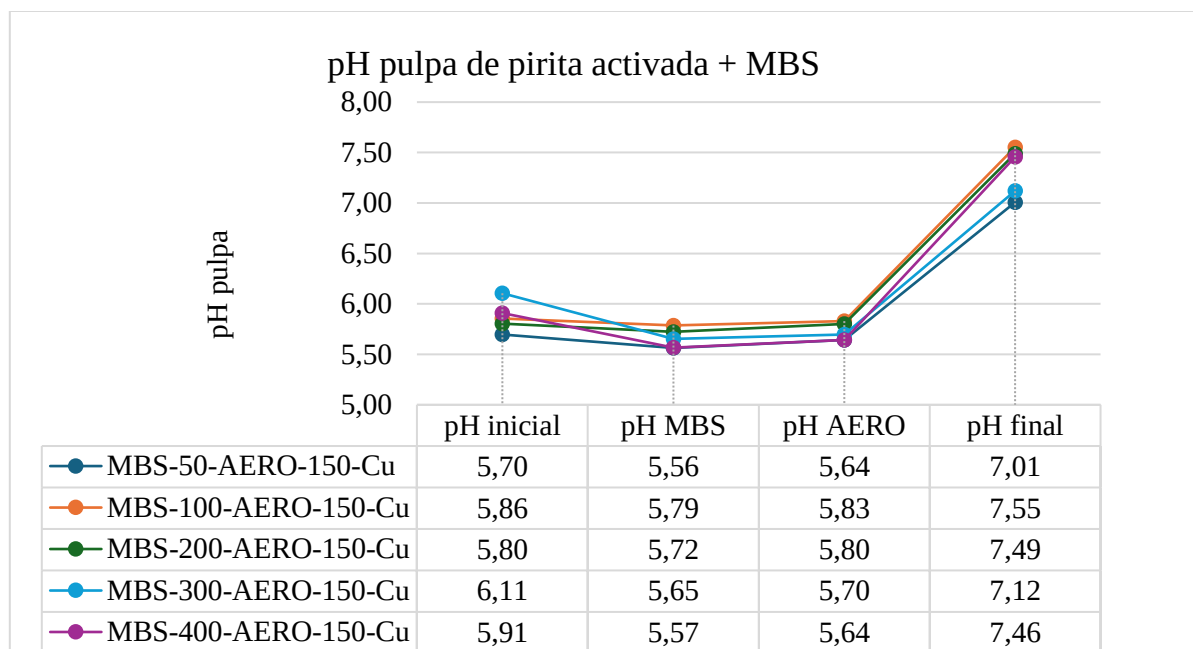


Figura 20: Variación de pH en pruebas de flotación de pirita activada con adición de MBS.

En cuanto a la evolución del pH, la pirita pura inicia en un entorno ácido con promedios entre 5,80 y 5,91, los cuales se mantienen con variaciones menores durante el acondicionamiento con MBS y colector AERO343, para finalmente neutralizarse al terminar la flotación, alcanzando valores de pulpa entre 7,05 y 7,49. De manera similar, la pulpa con pirita activada con cobre arranca con un pH inicial ácido de 5,70 a 6,11 y experimenta una ligera acidificación adicional tras añadir los reactivos, pero también evidencia una clara tendencia hacia la neutralización natural al final del proceso, estabilizándose en un rango final de 7,01 a 7,55.

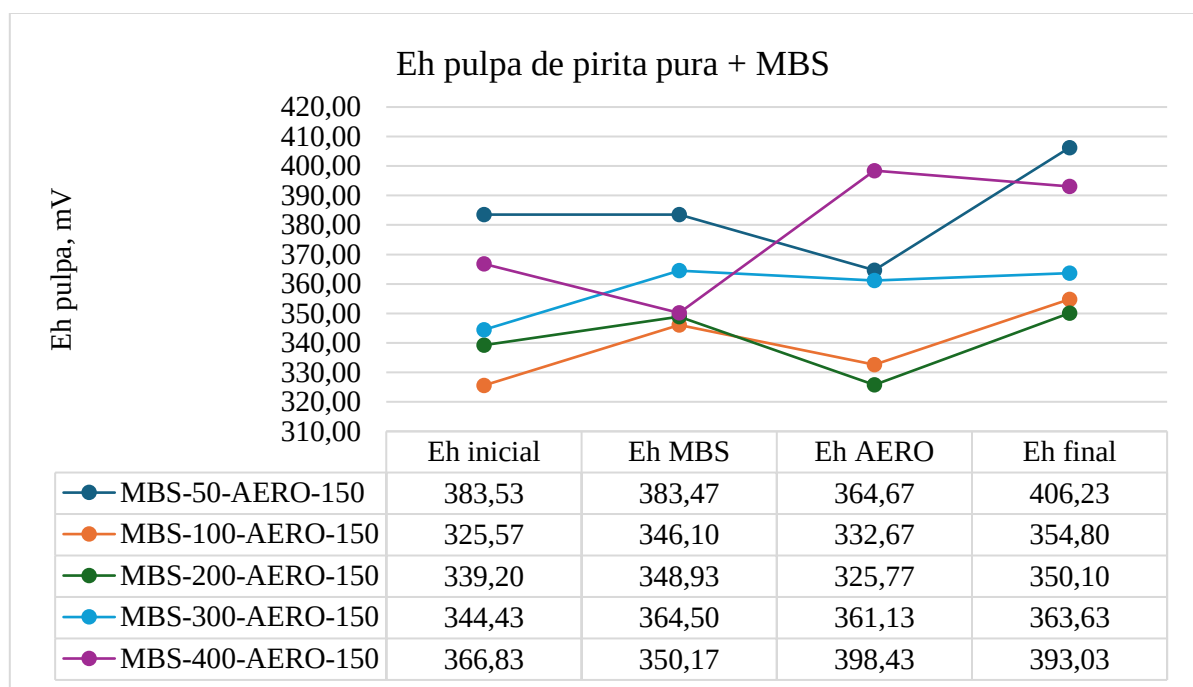


Figura 21: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita pura con adición de MBS.

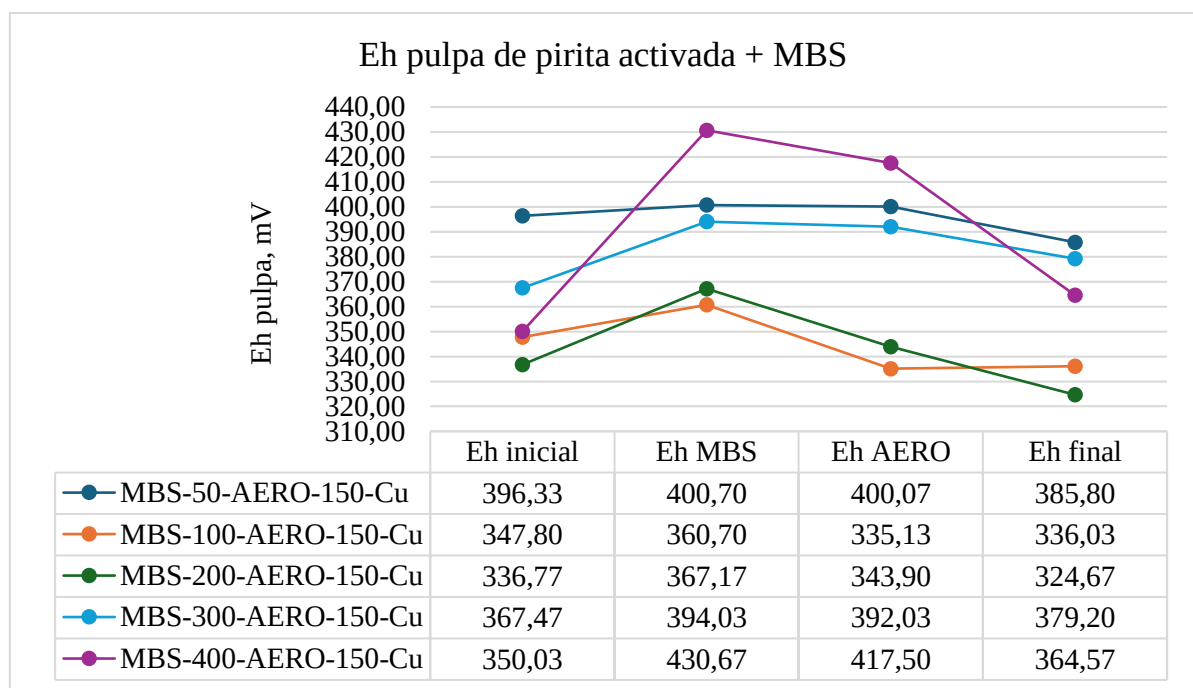


Figura 22: Variación de Eh en pruebas de flotación de pirita activada con adición de MBS.

El análisis de los potenciales electroquímicos, demuestra que el ambiente fisicoquímico se mantiene altamente oxidante durante todos los ensayos. En las pruebas con pirita pura, los potenciales iniciales fluctúan entre +325,57 mV y +383,53 mV, y las posteriores adiciones de MBS y AERO343 no logran reducir el entorno de forma significativa, finalizando el proceso con valores elevados entre +350,10 mV y +406,23 mV. Esta misma persistencia oxidante se observa en la pirita activada, donde los potenciales iniciales arrancan entre +336,77 mV y +396,33 mV. Notablemente, las dosis de depresante no logran mitigar esta fuerza impulsora termodinámica, llegando a registrar +430,6 mV en la pulpa tras dosificar 400 g/ton de MBS, lo que asegura que el colector siempre disponga de las condiciones para oxidarse.

Al contrastar la totalidad de los datos, la menor cantidad absoluta de pirita recuperada en el concentrado se obtiene en el sistema de pirita activada utilizando la dosis de 300 g/ton de MBS, lo que permite lograr un mínimo de 20,90% de mineral flotado. Para el caso de mineral sin activar, la depresión más pronunciada se consigue empleando la dosis de 50 g/ton de MBS, lo que logra reducir el material en el concentrado a un 38,75%.

De las *Figura 13* y *Figura 18*, se logra apreciar que tanto al evaluar el efecto del colector xantato, como cuando se utiliza MBS como depresante, los iones de cobre tienen el efecto importante en la recuperación de pirita, ya que ,al activar la pirita mediante cobre, se produce mayor depresión que sin él, esto se debe a que el MBS reacciona con el cobre sobre la superficie de la pirita, permitiendo su depresión. Este efecto debe ser tomado en cuenta cuando se trata un mineral real que es una mezcla de varios minerales y no solo una especie mineral debido a que los otros minerales presentes, además de pirita, pueden liberar iones de cobre.

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian un comportamiento complejo de la pirita frente al metabisulfito de sodio (MBS) en agua de mar, los cuales dialogan directamente con las problemáticas expuestas en la literatura reciente. En primer lugar, la estabilización natural del pH de la pulpa observada hacia el final de los ensayos (entre 7,01 y 7,55) confirma experimentalmente el fuerte efecto tampón del agua de mar descrito por Castro (2012, 2018). Esta neutralización inherente del sistema ratifica la premisa de que operar en rangos de pH alcalinos tradicionales resulta inviable por el alto consumo de modificadores de pH, validando la necesidad de trabajar a pH natural.

Respecto a la hidrofobicidad, la agresiva flotabilidad de la pirita al añadir colector xantato en medios salinos concuerda con lo reportado por Castellón et al. (2024), quienes indican que el agua de mar exacerba la recuperación de este mineral. Sin embargo, el hallazgo más crítico de esta investigación se centra en la ventana de dosificación del MBS. Mu & Peng (2019) sugirieron en sus estudios la existencia de comportamientos contradictorios en el uso de este reactivo, donde dosis puntuales deprimen la pirita, pero dosis excesivas revierten el efecto. Los resultados de esta memoria aportan evidencia empírica contundente a dicha propuesta: en la pirita activada por cobre, la depresión fue altamente efectiva a 300 g/ton de MBS (20,90% de recuperación), pero colapsó violentamente al incrementar la dosis a 400 g/ton (91,73% de recuperación). Esto demuestra que la ventana operativa del MBS es estrecha y altamente dependiente de la estequiometría de la superficie.

Adicionalmente, los datos electroquímicos obtenidos polemizan con ciertas concepciones del mecanismo del MBS. Hassanzadeh (2016) y Castro (2018) señalan que el MBS actúa en gran medida como un agente reductor que consume oxígeno y disminuye el potencial (Eh) de la pulpa, previniendo así la oxidación del xantato a dixantógeno. No obstante, las mediciones de potencial en este estudio demostraron que, incluso tras la adición de hasta 400 g/ton de depresante, el ambiente fisicoquímico se mantuvo fuertemente oxidante (registrando potenciales superiores a +350 mV e incluso alcanzando +430 mV).

Esta persistencia oxidante indica que, bajo las condiciones de agua de mar artificial evaluadas, el MBS no está logrando una inhibición termodinámica global por abatimiento del potencial reductor de la pulpa. Por el contrario, los resultados sugieren que el mecanismo de depresión a 300 g/ton obedece estrictamente a reacciones competitivas de química de superficie (como la destrucción de las especies activadoras de cobre y la desorción del xantato), aportando una nueva perspectiva a la cinética de interacción de los iones sulfito con los sulfuros activados.

5. Conclusiones

A partir del análisis exhaustivo de los resultados experimentales expuestos, se evidencia que tanto la pirita pura como la activada con iones de cobre carecen de hidrofobicidad natural en agua de mar artificial, presentando recuperaciones de 8,97% y 8,80% respectivamente, enviando más del 91% del mineral al relave en ausencia de un agente colector.

Sin embargo, al incorporar el colector Xantato AERO343, la pirita pura exhibe una flotabilidad excepcionalmente alta y estable, alcanzando su punto de saturación con dosis bajas y manteniendo recuperaciones superiores al 75%. Por el contrario, la presencia de iones de cobre altera de forma radical la adsorción del xantato, generando una fuerte dependencia a la dosificación, donde el punto óptimo se alcanza con 150 g/ton al lograr una recuperación de 94,27%, mientras que una sobredosificación de 300 g/ton de colector xantato provoca una caída abrupta en la recuperación a un valor de 29,13% debido a la formación de hemimicelas. Cabe recalcar que, a nivel industrial la adición de colector xantato, es un paso obligatorio debido a la necesidad de recuperar cobre, y que, por lo tanto, es en esta condición (presencia de colector) donde se debe comparar la eficiencia del metabisulfito.

En cuanto a la evaluación del metabisulfito de sodio (MBS) como depresante, para la pirita pura, la mayor depresión se logra con una dosis mínima de 50 g/ton, reduciendo la masa en el concentrado a un 38,75%, pero las dosificaciones mayores anulan el efecto y reactivan masivamente el mineral, logrando recuperaciones por sobre 90%. En contraste, el sistema con pirita activada por cobre alcanza su punto óptimo de depresión con 300 g/ton de MBS, desplomando la flotabilidad a un 20,90% en el concentrado. No obstante, este escenario presenta una ventana operativa crítica y estrecha, dado que un aumento a 400 g/ton reactiva violentamente la pirita, alcanzando una recuperación de 91, 73%. Por consiguiente, los resultados obtenidos indican que el MBS es favorable para ser usado a nivel industrial, debido a que su efectividad es mayor en pirita activada con cobre, condición similar a lo que ocurren en plantas de flotación, en donde la presencia de minerales de cobre puede provocar la activación de la pirita.

Durante todo el proceso de flotación, el pH inicia con un carácter ácido y tiende naturalmente hacia la neutralización (estabilizándose entre 7,01 y 7,55), manteniendo a la vez un entorno

termodinámico sumamente oxidante que supera los +430 mV en algunos ensayos. Esto demuestra que la depresión no obedece a una falta de potencial para oxidar el xantato a dixantógeno, sino estrictamente a modificaciones químicas en la superficie, donde los iones de cobre cumplen un rol sinérgico al reaccionar con el MBS para permitir una depresión mucho más severa que en el mineral sin activar.

La efectividad del MBS en el agua de mar radica en interacciones cinéticas competitivas en la superficie del mineral activado y no en una inhibición termodinámica global del sistema, lo que subraya la importancia crítica de los tiempos de acondicionamiento sobre la dosis bruta, demostrando que el reemplazo de cal por dosis bajas y estables de MBS permite hacer frente al cambio mineralógico hacia los sulfuros, reduciendo drásticamente el consumo de agua dulce al habilitar circuitos estables con agua de mar sin desalar. Además, esto valida al MBS como un reactivo estratégico capaz de reemplazar el uso de cal en circuitos con agua de mar, previniendo la precipitación de lamas de magnesio y protegiendo la reología de la celda de flotación.

Tomando en cuenta estos hallazgos es imperativo plantear recomendaciones estratégicas para el desarrollo de experimentos futuros que complementen esta investigación.

En primer lugar, es necesario realizar el escalamiento a pruebas selectivas en flotación *batch*, transitando desde la celda de microflotación del sistema Hallimond hacia ensayos hidrodinámicos en celdas mecánicas agitadas. Esto permitirá validar la dosis óptima descubierta de 300 g/ton de MBS utilizando un sistema bimetalico sintético compuesto por una mezcla de pirita y calcopirita, o un mineral sulfurado real, con el fin de cuantificar la selectividad del MBS frente a los sulfuros de cobre bajo condiciones que simulen la realidad industrial de una planta concentradora.

En segundo lugar, se requiere incorporar una caracterización avanzada de química de superficie, implementando análisis espectroscópicos como espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) o espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) directamente sobre las muestras de pirita reactivadas a altas dosis de depresante, como las obtenidas a 400 g/ton de MBS. Determinar las especies moleculares ancladas a la superficie permitirá confirmar si el colapso del efecto depresante obedece a una oxidación masiva de xantato a dixantógeno, impulsada por el alto potencial residual (SHE), o a la precipitación de complejos hidrofóbicos indeseados de cobre-sulfito que actúan promoviendo la flotabilidad en lugar de deprimir la partícula mineral.

En tercer lugar, considerando que las dosis de MBS no lograron abatir el potencial electroquímico de la pulpa por debajo del umbral de +300 mV (SHE), se sugiere realizar pruebas de acondicionamiento con control atmosférico y depresión sinérgica. Esto implica inyectar un gas inerte, como el nitrógeno, para desplazar el oxígeno disuelto y forzar un entorno que impida la formación del dixantógeno.

Finalmente, para responder al desafío de la escasez hídrica y la necesidad operativa de cerrar los circuitos de planta, es fundamental ejecutar simulaciones de recirculación utilizando agua de mar sobrecargada progresivamente con los subproductos naturales de la degradación del metabisulfito, para medir si la acumulación iónica en el tiempo afecta la capacidad depresante sobre la pirita o altera el consumo de reactivo colector.

6. Bibliografía

- Bulatovic, S. M., Wyslouzil, D. M., & Kant, C. (1998). Operating practices in the beneficiation of major porphyry copper/molybdenum plants from Chile: Innovated technology and opportunities, a review. *Minerals Engineering*, 11, 313-331.
- Castellón, C. I., Toledo, P., Rojas, F., Sepúlveda, F. D., & Jeldres, R. I. (2024). Pyrite Depression by Sodium Metabisulfite in Freshwater and Seawater with Copper Activation. *Minerals*, 14(10), 1036. <https://doi.org/10.3390/min14101036>
- Castro, S. (2012). Challenges in Flotation of Cu-Mo Sulfide Ores in Sea Water. En *Water in Mineral Processing—Proceedings of the 1st International Symposium* (pp. 29-40). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Castro, S. (2018). Physico-chemical factors in flotation of Cu-Mo-Fe ores with seawater: A critical review [PDF]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing; ISSN 2084-4735*. <https://doi.org/10.5277/PPMP18162>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. Center for Climate and Resilience Research. www.cr2.cl/megasequia
- Comisión Chilena del Cobre. (2025). *Consumo de Agua en la Minería del Cobre* (DEEP 16/2025). Comisión Chilena del Cobre.
- Comisión Chilena del Cobre. (2026). *Proyección de la demanda de agua en la minería del cobre en Chile: Período 2025-2034* (DEEP 02/2026). Comisión Chilena del Cobre. <https://www.cochilco.cl/web/informe-proyeccion-del-consumo-de-agua-en-la-mineria-del-cobre-2025-2034/>
- Echeveste Vargas, C. (2023). *Depresión en la flotación selectiva de pirita-calcopirita con la combinación de metabisulfito de sodio y dextrina en presencia de xantato amílico de potasio* [Trabajo de Investigación en Ingeniería Metalúrgica]. Universidad de Guanajuato.
- Gobierno de Chile. (2022). *Crisis hídrica: Un desafío de todos*.

- Hassanzadeh, A. (2016). Chalcopyrite and pyrite floatabilities in the presence of sodium sulfide and sodium metabisulfite in a high pyritic copper complex ore. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 38(6), 782-788. <https://doi.org/10.1080/01932691.2016.1194763>
- Kester, D. R., Duedall, I. W., Connors, D. N., & Pytkowicz, R. M. (1967). PREPARATION OF ARTIFICIAL SEAWATER¹. *Limnology and Oceanography*, 12(1), 176-179. <https://doi.org/10.4319/lo.1967.12.1.0176>
- Klimpel, R. R., & Isherwood, S. (1991). Some industrial implications of changing frother chemical structure. *International Journal of Mineral Processing*, 33, 369-381.
- Ministerio de Obras Públicas. (2020). *Mesa Nacional del Agua – Primer Informe*.
- Mu, Y., & Peng, Y. (2019). The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water. *Minerals Engineering*, 142, 105921. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105921>
- Pytkowicz, R. M., & Atlas, E. (1975). Buffer intensity of seawater¹. *Limnology and Oceanography*, 20(2), 222-229. <https://doi.org/10.4319/lo.1975.20.2.0222>
- San Martín, F., Valles, I., Kracht, W., Vargas, T., & Aguilar, C. (2021). Biodepression of Copper-Activated Pyrite with Acidithiobacillus ferrooxidans in Flotation with Fresh and Seawater. *Minerals*, 11(10), 1039. <https://doi.org/10.3390/min11101039>
- Serey, J. R. (2023). *Riesgo hídrico en la industria minera* [Tesis de Magíster (o Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas)]. Universidad de Chile.
- Wills, B. A., & Finch, J. E. (2016). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (Eighth edition). Elsevier.
- Wills, B. A., Napier-Munn, T., & Wills, B. A. (with Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre). (2006). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7th ed). Elsevier/BH.