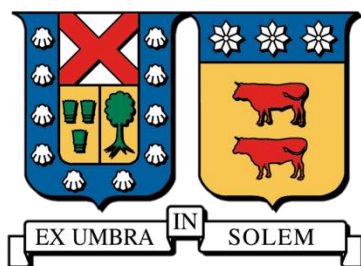


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y MATERIALES
SANTIAGO-CHILE



“EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD PARA
DEPRIMIR PIRITA PURA DE
ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS Y
METABISULFITO DE SODIO EN UN PROCESO
DE FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR
UTILIZANDO CELDAS HALLIMOND”

Presentado por

DIEGO SEBASTIÁN GÓMEZ ALARCÓN

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesor Guía

PhD. ING. FRANCISCA SAN MARTÍN ROBBIANO

SANTIAGO, DICIEMBRE 2023

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis padres Sandra y Carlos, a mi hermana Claudia que me han acompañado toda la vida, me han entregado su amor y apoyo incondicional, el cual me ha dado las fuerzas más que necesarias para superar cada reto enfrentado. También quisiera agradecer a Rocky, el fiel compañero de la familia que nos acompañó durante 17 años.

A mis tíos que viven aquí en Santiago, Pato que me ha apoyado desde niño, me recibió en su casa por más de dos años, que me dio un lugar al cual llegar con los brazos abiertos y donde sentirme como en casa. A mi tía Vero, tío Pello y Patricio por darme un espacio en sus hogares, por su orientación, sabiduría y apoyo constante a lo largo de esta carrera, la cual fue fundamental para mi desarrollo personal y académico.

A mis amigos, Bastián, Ignacio, María José, Paola, Paula y Rodrigo que me han acompañado desde el colegio, que han brindado su apoyo y diversos consejos en los momentos más difíciles.

A mis amigos y compañeros de universidad, Aldo, Andrés, Diego y Greek, que han estado presentes en todo este camino y gracias a su compañía es que este viaje ha sido más que gratificante.

Quisiera expresar mi agradecimiento a la profesora Francisca por su orientación y apoyo constante a lo largo de este proyecto de investigación. Igualmente agradecer por la oportunidad y la confianza depositada en mi para el desarrollo esta memoria.

Agradezco también a Elizabeth, Jamiro y Jean por su valiosa colaboración durante este desafiante proceso que llevamos a cabo en el laboratorio del departamento de minas en el último año.

Este proyecto fue posible gracias a la financiación del proyecto fondecyt de iniciación N° 11200144 titulado EVALUATION OF CHEMOLITHOAUTOTROPHIC MICROORGANISMS AS PYRITE DEPRESSANT IN FLOTATION OF COPPER SULFIDES WITH SEAWATER.

En resumen, mi más sincero agradecimiento a todas las personas e instituciones que contribuyeron de alguna manera a la realización de esta tesis. Su apoyo ha sido inestimable.

Resumen

En el presente trabajo, se comparó el uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y metabisulfito de sodio (MBS) como depresores de la pirita en la flotación en agua de mar y agua destilada. Se llevaron a cabo un total de 165 experimentos de flotación en una celda Hallimond con pirita pura a diferentes valores de pH (4, 6, 8, 10 y 12).

Los experimentos se pueden dividir en: aquellos realizados para encontrar la dosis ideal de metabisulfito de sodio en agua de mar, experimentos de flotabilidad natural, flotabilidad con colector isopropil xantato de sodio, bioflotación con *A. ferrooxidans*, flotación con metabisulfito de sodio y flotación con MBS y sulfato de cobre.

Los resultados mostraron que la concentración óptima de MBS en agua de mar a pH natural es de 300 g/t, donde se alcanzó la menor recuperación (86,8%). Se observó que *A. ferrooxidans* fue más efectivo que el MBS para deprimir la pirita en experimentos con solo este mineral. En agua destilada a pH 8 la flotabilidad con colector alcanzó los 89,7% y se redujo a 88,8% y 28,5%, con MBS y bacterias, respectivamente. Por el contrario, en agua de mar la flotabilidad llegó a 95,3% y disminuyó a 86,8% y 64,3% en MBS y bacterias, respectivamente. Sin embargo, al incorporar iones de cobre a la flotación con metabisulfito de sodio en forma de sulfato de cobre la recuperación de pirita disminuyó a 75,9% en agua destilada y 75,8% en agua de mar, notándose el efecto depresor del MBS en la pirita en presencia de cobre. Lo cual confirma resultados de trabajos anteriores donde se establece que el MBS puede ser utilizado como depresante de pirita solo si hay presencia de cobre y no actúa sobre pirita pura. A diferencia de las bacterias que fueron capaces de deprimir pirita pura y con mayor efectividad.

Con ello se identifica que las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* podrían ser un depresante alternativo de pirita en agua de mar a pH natural, en reemplazo de la cal y del MBS.

Abstract

In the present study, the use of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and sodium metabisulfite (MBS) as pyrite depressants in seawater and distilled water flotation was compared. A total of 165 flotation experiments were conducted in a Hallimond cell with pure pyrite at different pH values (4, 6, 8, 10, and 12).

The experiments can be categorized as follows: those conducted to find the optimal dosage of sodium metabisulfite in seawater, experiments on natural floatability, floatability with sodium isopropyl xanthate collector, bioflotation with *A. ferrooxidans*, flotation with sodium metabisulfite, and flotation with MBS and copper sulfate.

The results showed that the optimal concentration of MBS in seawater at natural pH is 300 g/t, where the lowest recovery was achieved (86.8%). It was observed that *A. ferrooxidans* was more effective than MBS at depressing pyrite in experiments with only this mineral. In distilled water at pH 8, floatability with a collector reached 89.7% and decreased to 88.8% and 28.5% with MBS and bacteria, respectively. In contrast, in seawater, floatability reached 95.3% and decreased to 86.8% and 64.3% with MBS and bacteria, respectively. However, when copper ions were introduced into flotation with sodium metabisulfite in the form of copper sulfate, pyrite recovery decreased to 75.9% in distilled water and 75.8% in seawater, highlighting the depressant effect of MBS on pyrite in the presence of copper. This confirms results from previous studies where it is established that MBS can be used as a pyrite depressant only in the presence of copper and does not act on pure pyrite. In contrast, bacteria were capable of depressing pure pyrite and with greater effectiveness.

This identifies *Acidithiobacillus ferrooxidans* as a potential alternative pyrite depressant in seawater at natural pH, replacing lime and MBS.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 FLOTACIÓN.....	3
2.1.1 Colectores.....	4
2.1.2 Espumantes	6
2.1.3 Activadores.....	7
2.1.4 Depresantes	7
2.2 RECURSOS HÍDRICOS.....	9
2.3 PROBLEMAS ASOCIADOS AL AGUA DE MAR	13
2.3.1 Precipitación de iones del agua de mar a pH elevado	13
2.3.2 Consumo excesivo de cal.....	14
2.3.3 Depresión de la molibdenita en agua de mar.....	15
2.4 BACTERIAS/MICROORGANISMOS	16
3. METODOLOGÍA.....	18
3.1 PREPARACIÓN DE MUESTRA DE MINERAL.....	18
3.2 PREPARACIÓN DE SOLUCIONES LÍQUIDAS DE FLOTACIÓN	18
3.3 PREPARACIÓN DE MICROORGANISMOS	19
3.4 EXPERIMENTOS DE MICROFLOTACIÓN.....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
5. CONCLUSIONES	32
6. BIBLIOGRAFÍA	33

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1. CLASIFICACIÓN DE COLECTORES IONIZADOS SEGÚN SU TIPO Y SU APLICACIÓN.	5
TABLA 2.2. COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUA DE MAR A SALINIDAD 35‰ (CASTRO & HUBER, 2007)	13
TABLA 3.1. FÓRMULA PARA 1 KG DE AGUA DE MAR ARTIFICIAL AL 35‰ (KESTER ET AL., 1967).....	18
TABLA 3.2. COMPUESTOS MEDIO DE CULTIVO BACTERIAS.....	19
TABLA 3.3. MATRIZ DE EXPERIMENTOS	24

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1: PRINCIPIOS DE FLOTACIÓN (WILLS & FINCH, 2016)	3
FIGURA 2.2. REPRESENTACIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO Y LA TENSIÓN SUPERFICIAL (WILLS & FINCH, 2016)	4
FIGURA 2.3. ADSORCIÓN DEL COLECTOR EN LA INTERFASE AGUA-MINERAL.....	5
FIGURA 2.4. ADSORCIÓN DEL ESPUMANTE EN LA INTERFASE AIRE-AGUA	6
FIGURA 2.5. RELACIÓN ENTRE LA CONCENTRACIÓN DE DITIOFOSFATO DE DIETILO SÓDICO Y EL pH CRÍTICO (NAPIER-MUNN & WILLS, 2006).....	9
FIGURA 2.6. DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS DEL AGUA SEGÚN ACTIVIDAD ECONÓMICA (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS, 2012)	10
FIGURA 2.7. TENDENCIA EXTRACCIONES DE AGUA EN LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS (M ³ /SEG) (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2022A)	11
FIGURA 2.8. USO DEL AGUA SEGÚN EL PROCESO EN LA MINERÍA DE COBRE AL 2021 (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2022A)	11
FIGURA 2.9. PROYECCIÓN ESPERADA DEMANDA DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE SEGÚN ORIGEN 2022-2033 (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2022C).....	12
FIGURA 2.10. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DE DEMANDA DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE SEGÚN ORIGEN 2022-2033 (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2022C).....	12
FIGURA 2.11. DEMANDA DE AGUA EN LA MINERÍA DEL COBRE EN EL ÁREA PLANTA CONCENTRADORA (COMISIÓN CHILENA DEL COBRE, 2022C).....	13
FIGURA 2.12. CONSUMO DE CAL EN FUNCIÓN DEL pH EN AGUA DE AMAR Y AGUA DULCE (S. CASTRO, 2012)	15
FIGURA 2.13. RECUPERACIÓN DE MOLIBDENO EN FUNCIÓN DEL pH EN AGUA DE MAR Y AGUA DULCE (S. CASTRO, 2012).....	16
FIGURA 3.1. MATRAZ ERLLENMEYER CON A. FERROOXIDANS AL PRIMER (A) Y TERCER (B) DÍA DE INCUBACIÓN	19
FIGURA 3.2. FOTOGRAFÍA CONCENTRACIÓN BACTERIANA	20
FIGURA 3.3. MICROSCOPIO OLYMPUS CX23 Y CÁMARA NEUBAUER USADA PARA EL RECuento DIRECTO DE BACTERIAS.....	21
FIGURA 3.4. CELDA HALLIMOND UTILIZADA PARA REALIZAR LOS EXPERIMENTOS DE FLOTACIÓN..	22
FIGURA 3.5. DIAGRAMA PROCEDIMIENTO DE FLOTACIÓN.	23
FIGURA 4.1. EFECTO DE DIFERENTES DOSIS DE METABISULFITO DE SODIO EN LA RECUPERACIÓN DE PIRITA EN AGUA DE MAR	26
FIGURA 4.2. EFECTO DE A. FERROOXIDANS Y METABISULFITO DE SODIO EN PIRITA EN AGUA DESTILADA. LA CONCENTRACIÓN DE A. FERROOXIDANS, MBS Y XANTATO FUERON DE 1,5x10 ⁸ BACTERIA/ML, 7,89x10 ⁻⁵ M Y 4,74x10 ⁻⁵ M, RESPECTIVAMENTE.	27
FIGURA 4.3. EFECTO DE A. FERROOXIDANS Y METABISULFITO DE SODIO EN PIRITA EN AGUA DE MAR. LA CONCENTRACIÓN DE A. FERROOXIDANS, MBS Y XANTATO FUERON DE 1,5x10 ⁸ BACTERIA/ML, 7,89x10 ⁻⁵ M Y 4,74x10 ⁻⁵ M, RESPECTIVAMENTE	28
FIGURA 4.4. EFECTO DEL SULFATO DE COBRE EN FLOTACIÓN DE PIRITA CON METABISULFITO DE SODIO Y XANTATO EN AGUA DESTILADA. LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO DE COBRE EN EL ACONDICIONAMIENTO ERA 3,0x10 ⁻⁵ M	29
FIGURA 4.5. EFECTO DEL SULFATO DE COBRE EN FLOTACIÓN DE PIRITA CON METABISULFITO DE SODIO Y XANTATO EN AGUA DE MAR. LA CONCENTRACIÓN DE SULFATO DE COBRE EN EL ACONDICIONAMIENTO ERA 3,0x10 ⁻⁵ M	30

1. Introducción

En minería, uno de los insumos críticos es el recurso hídrico, donde el consumo de agua para el año 2021 alcanzó los 17,58 m³/seg, ello sin considerar el reúso o reciclaje de esta. De los cuales 11,84 m³/seg corresponden a agua de origen continental y 5,73 m³/seg agua de mar, donde en la última se identifica un 37% como agua de mar directa y un 63% como agua desalada. Se reconoce como agua de mar aquella captada desde la costa, se subdivide en agua desalinizada y agua salada o sin tratar (Comisión Chilena del Cobre, 2022a).

Cabe destacar que desde el año 2012 al 2021 se observa una tasa de crecimiento en el consumo de agua de mar del orden 22% promedio anual. Mientras que se observa una variación nula en el consumo de agua continental en los últimos 5 años. Por otra parte, se observa que el proceso de concentración de minerales es la principal fuente de consumo de agua representando un 73% de la entrada de agua. El área de planta concentradora incluye los procesos de conminución, flotación, clasificación y espesamiento (Comisión Chilena del Cobre, 2022a).

Se proyecta una tasa promedio de crecimiento del agua de mar de 9% anual, donde se estima alcance los 15,28 m³/seg al año 2033, lo cual representa un aumento de 167% respecto al 2021. Igualmente, para el año 2033 se espera que el agua de mar represente un 71% del agua requerida por la minería del cobre (Comisión Chilena del Cobre, 2022c).

De igual manera que se espera aumente la participación del agua de mar, se espera que el consumo del procesamiento de concentrados represente el 86% de la industria y con una participación de 76% de agua salada, para el año 2033 (Comisión Chilena del Cobre, 2022c).

Es necesario señalar que para poder separar los minerales valiosos desde la pirita (que es un mineral de la ganga) en flotación de debe tener un medio alcalino con un pH entre 10 y 12 (Napier-Munn & Wills, 2006). El pH natural del agua de mar se encuentra entre 7,8 y 8,2, ello dependiendo de la salinidad, la concentración de carbonato/bicarbonato y borato/ácido bórico lo que es responsable del efecto buffer (Pytkowicz & Atlas, 1975).

Uno de los depresantes de pirita mayormente utilizados en la flotación de sulfuros de cobre – molibdeno es la cal (CaO) debido a su bajo costo, sin embargo, el agua de mar actúa como una solución buffer, donde se observa que a medida que aumenta el pH, el consumo de cal aumenta significativamente, de tal manera que se debe añadir una cantidad aproximadamente 10 veces mayor a lo que se utiliza en agua dulce para llegar a pH 11 (S. Castro, 2012). Por otra parte, se observa que la recuperación de molibdenita disminuye cuando el pH es mayor que 9,5 en agua de mar, mientras que en agua dulce o fresca aquello no ocurre (S. Castro, 2012).

Por otro lado, se ha demostrado anteriormente la capacidad de la bacteria *A. ferrooxidans* para adherirse y deprimir la pirita en agua dulce y en agua de mar por sobre otros minerales, ya sean, galena, esfalerita, calcopirita, calcosina, molibdenita, millerita, entre otros. No obstante, estos microorganismos solo han sido utilizados en estudios científicos, aún no se utilizan a escala industrial en flotación (Chandraprabha et al., 2004, 2005; Hosseini et al., 2005; Mehrabani et al., 2011; Misra et al., 1996; Nagaoka et al., 1999; Ohmura et al., 1993; San Martín et al., 2018). Igualmente, se demostró la habilidad de deprimir pirita del metabisulfito de sodio frente a otros minerales, siendo

este un depresante que se utiliza actualmente a nivel industrial (Arancibia-Bravo et al., 2021; Chen et al., 2021; Hassanzadeh & Hasanzadeh, 2017; Uribe et al., 2016). Sin embargo, este último, pese a que actualmente se utiliza en la industria, en la práctica se requieren altas dosis y presentan un costo operacional mayor limitando su aplicación (Mu et al., 2016). Adicionalment, presenta riesgos tales como, irritación de la piel, nariz, ojos, entre otros y es un material corrosivo ácido cuando se mezcla con agua (National Center for Biotechnology Information, 2023).

El presente trabajo de título estudia la capacidad depresante de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* y del metabisulfito de sodio sobre la pirita en flotación con agua de mar, con la finalidad de visualizar y comparar los desempeños de ambos.

Objetivo General del Trabajo

Comparar el desempeño de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y el metabisulfito de sodio como depresante de pirita con agua de mar y agua destilada en flotación.

Objetivos Específicos

- Determinar la concentración óptima de metabisulfito de sodio en flotación en agua de mar.
- Evaluar la capacidad depresante de pirita de las bacterias *A. ferrooxidans* y el metabisulfito de sodio en agua de mar y agua destilada.
- Evaluar el efecto del pH en la recuperación de la pirita en agua de mar y agua destilada.
- Comparar los resultados obtenidos de la flotabilidad natural, con colector, colector/bacterias y colector/metabisulfito de sodio.

2. Marco Teórico

2.1 Flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico utilizado para separar minerales de interés o valioso de minerales de ganga explotando sus diferencias en la hidrofobicidad. Si las partículas de mineral son fácilmente mojadas, se dice son hidrofílicas, en cambio si repelen el agua, son hidrofóbicas, estas propiedades pueden ser intrínsecas del mineral o inducidas por reactivos. Si un mineral es hidrofóbico puede adherirse a una burbuja de aire y flotar.

Con anterioridad al proceso de flotación es requerido reducir el tamaño del mineral y añadirle agua para convertirlo en una pulpa, la cual se ingresa en una celda de flotación donde es agitada y aireada. Las partículas de mineral valioso al ser hidrofóbicas se unen a las burbujas de aire y son llevadas a la superficie de la pulpa donde son recuperadas, donde pasan a llamarse concentrado. Por otra parte, las partículas de ganga al ser hidrofílicas permanecen en la pulpa, formando el relave. A este proceso se le denomina flotación directa, su opuesto es la flotación inversa donde la ganga es separada en la espuma. En la Figura 2.1 se puede observar el principio de flotación de una celda de flotación donde el impulsor provee de turbulencia y aire a la celda, lo que promueve la colisión entre partículas y burbujas que resulta en la adherencia entre estas y posterior flotación. Cabe mencionar que en la flotación de cobre se separan minerales sulfurados de cobre (calcopirita y bornita) y típicamente molibdenita de minerales de ganga, principalmente pirita.

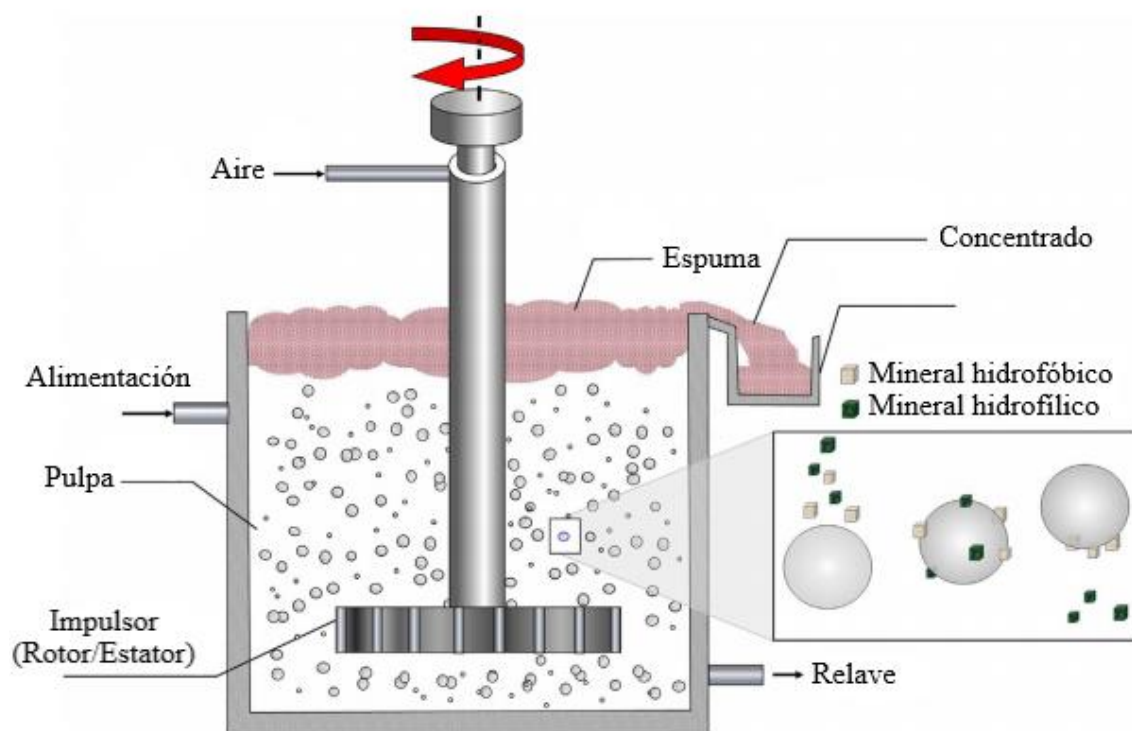


Figura 2.1: Principios de Flotación (Wills & Finch, 2016)

La hidrofobicidad es un factor clave el cual puede ser medido mediante el ángulo de contacto. Este es formado entre la partícula de mineral y la superficie de la burbuja de aire, se desarrolla debido a las fuerzas de tensión superficial que mantienen la partícula adherida a la burbuja. Dicho esto, se observa que mientras mayor sea el ángulo de contacto, mayor es la hidrofobicidad del mineral. Los mecanismos de adherencia se pueden observar en la Figura 2.2. En equilibrio las fuerzas tensionales se relacionan con la siguiente ecuación:

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos \theta$$

Donde $\gamma_{s/a}$, $\gamma_{s/w}$, $\gamma_{w/a}$ son la tensión superficial entre sólido y aire, sólido y agua, agua y aire, respectivamente y θ es el ángulo de contacto entre la superficie del mineral y la burbuja.

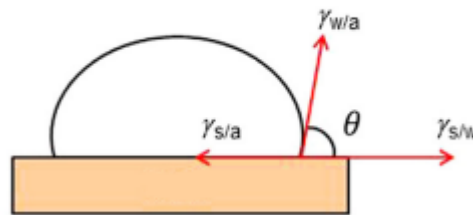


Figura 2.2. Representación del ángulo de contacto y la tensión superficial (Wills & Finch, 2016)

Las partículas minerales solo pueden adherirse a las burbujas de aire si son en cierta medida hidrófobas. Una vez que han llegado a la superficie de la pulpa, las burbujas de aire solo continúan sosteniendo las partículas minerales si pueden formar una espuma estable, de lo contrario, explotarán y dejarán caer las partículas minerales. Para lograr estas condiciones, es necesario utilizar los numerosos compuestos químicos conocidos como reactivos de flotación (Wills & Finch, 2016).

2.1.1 Colectores

Puesto que una gran parte de los minerales no son hidrofóbicos naturalmente, esta propiedad es impartida mediante reactivos, los cuales son llamados colectores. Estos se añaden a la pulpa agitada, donde se adsorbe al mineral tras un lapso, denominado periodo de acondicionamiento.

Los colectores son compuestos orgánicos que permiten que ciertos minerales sean repelentes al agua mediante la adsorción en la superficie del mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa al mineral de la burbuja de aire. Son moléculas heteropares que contienen un grupo de hidrocarburos no-polar y un grupo polar. El grupo radical hidrocarburo no-polar repele fuertemente el agua, mientras que el grupo polar reacciona con la superficie del mineral, siendo este el grupo funcional. Los colectores se adsorben sobre las partículas con sus grupos no-polares orientados hacia la solución como se observa en la Figura 2.3.

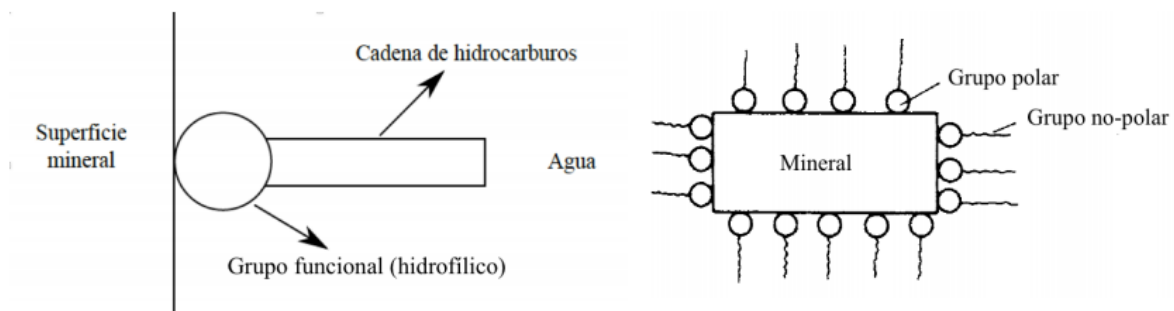
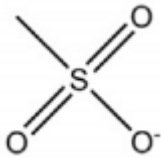
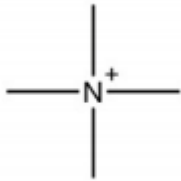
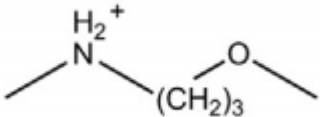


Figura 2.3. Adsorción del colector en la interfase agua-mineral.

Los colectores ionizados pueden ser clasificados según el tipo de ion, aniónicos o catiónicos e igualmente según su aplicación, minerales no sulfurosos o minerales sulfurosos, estos se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Clasificación de colectores ionizados según su tipo y su aplicación.

Tipo de colector		Aplicación	Colector	Formula Química del grupo polar
Aniónicos	Sulfhidrilo	Sulfurado	Xantato	$\begin{array}{c} \text{S} \\ \\ \text{---O---C---S}^- \end{array}$
		Sulfurado	Ditiofosfato	$\begin{array}{c} \text{---O} \quad \text{S} \\ \diagdown \quad / \\ \text{P} \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{---O} \quad \text{S}^- \end{array}$
		Sulfurado	Ditiocarbamato	$\begin{array}{c} \text{S} \\ \\ \text{N---C---S}^- \end{array}$
	Oxhidrilo	No sulfurado	Carboxilo	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{---C---O}^- \end{array}$
		No sulfurado	Sulfato	$\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{O}^-\text{---S---O}^- \\ \\ \text{O} \end{array}$

	No sulfurado	Sulfonato	
Catiónico	No sulfurado	Amida	
	No sulfurado	Éter de amina	

En la flotación de minerales sulfurosos, los colectores de mayor relevancia son los xantatos, los cuales se utilizan principalmente en minerales de cobre, zinc, cobre-molibdeno, oro, níquel, el grupo del platino y minerales oxidados (Bulatovic et al., 1998; Wills & Finch, 2016).

2.1.2 Espumantes

Los espumantes son un reactivo que tiene la función de ayudar a la formación de espuma, ayudar a la formación y preservación de pequeñas burbujas y reducir la velocidad de ascenso de estas. Al aumentar la formación de espuma estas no explotarán cuando lleguen a la parte superior de la pulpa, lo que permite que las partículas recogidas se desborden como producto flotado. La reducción del tamaño de las burbujas aumenta el número y el área total de la superficie de las burbujas, lo que aumenta la tasa de colisión con las partículas y, por lo tanto, aumenta la cinética de flotación. Por último, la reducción de la velocidad de ascenso aumenta el tiempo de residencia de las burbujas en la pulpa, lo que aumenta el número de colisiones con las partículas y, por lo tanto, aumenta aún más la cinética (Klimpel & Isherwood, 1991).

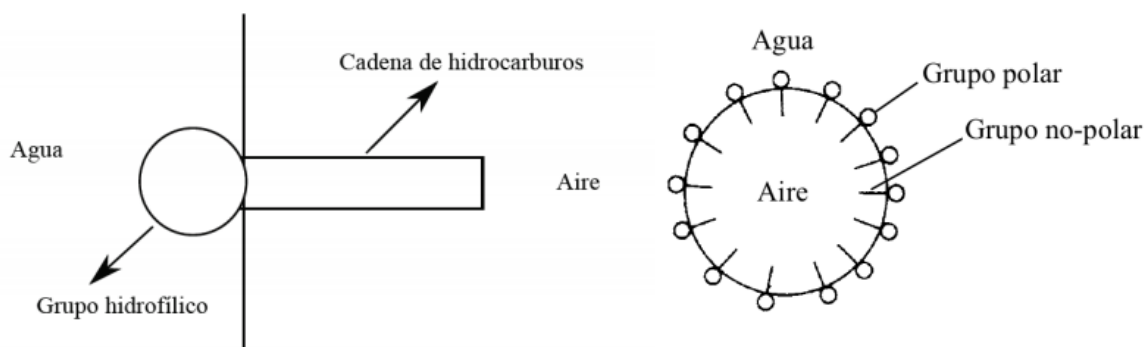


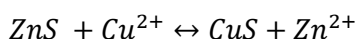
Figura 2.4. Adsorción del espumante en la interfase aire-agua

Al igual que los colectores, los espumantes son una clase de surfactante y son moléculas heteropolaes que tienen un grupo hidrofílico, típicamente hidroxilo que reacciona en la interfase aire-agua reduciendo la tensión superficial de la burbuja; y un grupo hidrofóbico, cadena de hidrocarburos, que se orienta hacia el aire reduciendo la tensión superficial de la burbuja como se observa en la Figura 2.4. En el agua, sus grupos polares se combinan rápidamente con los dipolos del agua, pero no reaccionan con los grupos no-polares, lo cual fuerza a estos últimos a la fase de aire. Los espumantes mayormente utilizados son alcoholes, como MIBC y poliglicoles, como DF250 (Bulatovic et al., 1998; Klimpel & Isherwood, 1991; Napier-Munn & Wills, 2006).

2.1.3 Activadores

Los activadores son un tipo de reguladores, los cuales se especializan en alterar la superficie de los minerales con el fin de hacerlas apropiadas para reaccionar con el colector y volverse hidrofóbicos. Suelen ser sales inorgánicas solubles que se ionizan en solución, y los iones reaccionan con la superficie del mineral.

Un ejemplo de activación es el uso de sulfato de cobre en la flotación de esfalerita (ZnS), la cual no puede ser flotada simplemente añadiendo un colector, puesto que el xantato de zinc, formado cuando el colector interactúa con el mineral, es soluble en agua y, por lo tanto, no es capaz de hacer que la superficie del mineral sea hidrofóbica. Cuando se agrega sulfato de cobre, los iones de cobre se intercambian por los iones de zinc en la superficie de la esfalerita, como se muestra en la ecuación siguiente. De esta manera, el colector es capaz de reaccionar con el mineral formando xantatos de cobre que son insolubles (Fuerstenau, 2007).



En ocasiones puede ocurrir la activación accidental de minerales perjudicando la selectividad del proceso. Por ejemplo, en los sistemas de flotación de sulfuros de cobre la pirita puede ser activada por el Cu (San Martín et al., 2021; Uribe et al., 2016).

2.1.4 Depresantes

Los depresantes son un tipo de reguladores, los cuales se utilizan para aumentar la selectividad de la flotación al hacer que ciertos minerales sean hidrofílicos, evitando así su flotación. Pueden llevar a cabo su función de tres formas: previniendo la acción del colector (desorción), removiendo las especies activadoras (desactivación) o eliminando los colectores adsorbidos en la superficie mineral. El tipo de depresor depende del tipo de mineral que se esté procesando. Cabe mencionar que el rol del pH y el potencial de la pulpa es factor de gran importancia a la hora de controlar la depresión de minerales (Fuerstenau, 2007; Wills & Finch, 2016). Los reactivos involucrados se dividen en tres clases: inorgánicos, pequeñas moléculas orgánicas y polímeros orgánicos. Dentro de los depresantes inorgánicos se encuentran el cianuro, sulfato de zinc, dióxido de azufre, sulfuros e hidrosulfuros, que se utilizan principalmente en sistemas con minerales sulfurosos (Nagaraj & Ravishankar, 2007).

El cianuro es ampliamente utilizado para la flotación selectiva en sistemas Pb-Cu-Zn y Cu-Zn para deprimir la esfalerita (ZnS), pirita (FeS₂) y algunos sulfuros de cobre, como la calcopirita

(CuFeS_2). En la separación Cu-Zn el cianuro reacciona con los iones de cobre para formar $\text{Cu}(\text{CN})_2^-$ previniendo la activación de la esfalerita. Por otra parte, en la separación Cu-Fe el depresante actúa sobre la pirita formando un complejo de ferricianuro férrico, que produce una superficie hidrofílica y previene la acción del colector sobre este. Cabe destacar que el cianuro es un compuesto altamente tóxico y debe ser manejado con gran cuidado (Wills & Finch, 2016).

En la separación Cu-Mo, se utilizan depresantes como el sulfhidrato de sodio (NaSH), sulfuro de sodio (Na_2S) y metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$). En estos sistemas el molibdeno es un subproducto cuando se procesan minerales de un pórfido cuprífero. La molibdenita (MoS_2) es recolectada junto a los sulfuros de cobre en un concentrado, luego ambos son separados deprimiendo los sulfuros cobre usando NaSH , Na_2S o $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ y flotando la molibdenita. Estos depresantes disminuyen el potencial de la pulpa por debajo del potencial de la reacción del xantato-mineral, impidiendo la reacción del colector con el mineral (Napier-Munn & Wills, 2006; Wills & Finch, 2016). La molibdenita no se ve afectada puesto que es naturalmente hidrofóbica. Cabe destacar que en la separación Cu-Mo se prefiere el uso de nitrógeno en vez de aire porque reduce las reacciones de oxidación que consumen los depresantes (Poorkani & Banisi, 2005).

En la flotación de minerales sulfurosos de cobre, la cal (CaO) es el depresante mayormente utilizado para deprimir la pirita y arsenopirita cuando se usa xantato como colector. Son deprimidas por la cal debido a la reacción del grupo hidroxilo y los iones de calcio, la cual permite la formación de $\text{Fe}(\text{OH})$, $\text{FeO}(\text{OH})$, CaSO_4 y CaCO_3 en la superficie de la pirita reduce la adsorción del xantato, haciendo que el mineral no sea flotable. La cal no tiene ese efecto en los minerales de cobre, pero si deprime la galena en cierta medida (Wills & Finch, 2016). Por otra parte, la cal es un modificador que aumenta el pH, lo que obstruye la adsorción del colector. Cabe mencionar que la depresión ocurre en valores de pH diferentes para cada sulfuro, proporcionando una ventana de pH que permite la flotación selectiva. Cuando se aumenta el pH, la pirita se deprime primero a pH 10 y la calcopirita a pH 12. Para cada mineral hay un valor crítico de pH por debajo del cual el mineral está deprimido. Además, el pH crítico para la depresión del sulfuro dependerá de la concentración del colector, como se observa en la Figura 2.5, donde se muestra el pH crítico de la pirita, galena y calcopirita a diferente concentración de colector de ditiofosfato de dietilo sódico (Napier-Munn & Wills, 2006).

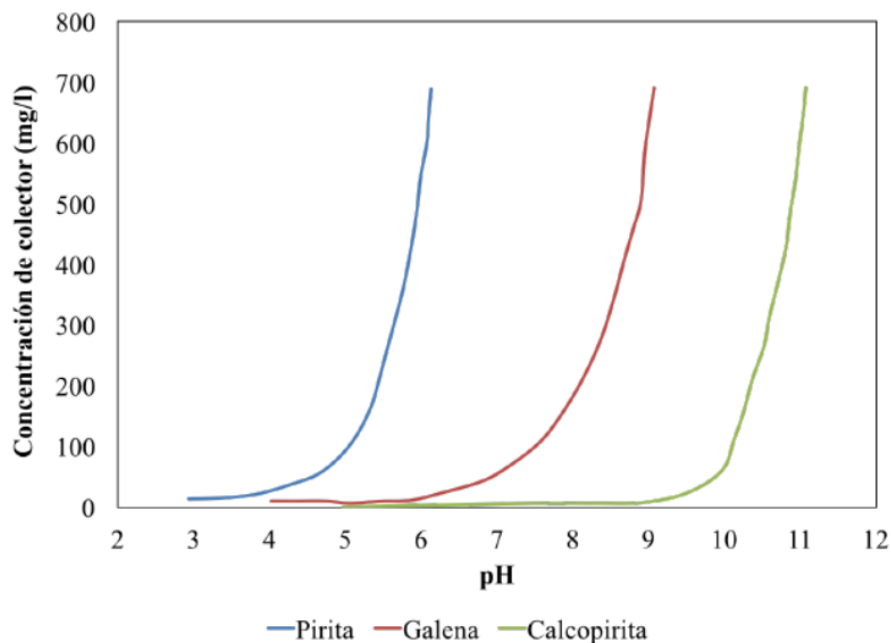


Figura 2.5. Relación entre la concentración de ditiofosfato de dietilo sódico y el pH crítico (Napier-Munn & Wills, 2006).

La cal al ser una sustancia económica se utiliza ampliamente para regular la alcalinidad de la pulpa y se usa en forma de lechada de cal, una suspensión de partículas de hidróxido cálcico en una solución acuosa. Igualmente, a menudo, se agrega cal o ceniza de soda a la pulpa antes de la flotación para precipitar los iones de metales pesados de la solución, ya que estos pueden activar la esfalerita y la pirita y evitar su flotación selectiva de los minerales de plomo o cobre (Napier-Munn & Wills, 2006).

2.2 Recursos Hídricos

Los recursos hídricos son de vital importancia, sin embargo, en Chile en los últimos años se ha observado una reducción en la disponibilidad de los recursos hídricos, notándose entre un 20% y 50% de disminución en las macrozonas sur y centro-norte, respectivamente (DGA, 2019).

La actualización del Balance Hídrico Nacional sugiere que la disponibilidad del agua para el periodo 2030-2060 podría disminuir más del 50% debido a un aumento en la demanda por parte de los usuarios, el cambio del uso del suelo y motivos climatológicos. Igualmente, en casi la totalidad de las cuencas más importantes de las macrozonas estudiadas se observó que disminuyó el caudal de los ríos, tendencia que, se proyecta, continuará en el futuro (DGA, 2020).

La minería del cobre representa 9% del consumo de agua nacional por actividad económica en Chile según el Ministerio de Obras Públicas (Figura 2.6). Esta se utiliza en diversas áreas, ya sea realizando tareas de control de polvo, en procesos de lixiviación, conminución, flotación u otros (Ministerio de Obras Públicas, 2012).

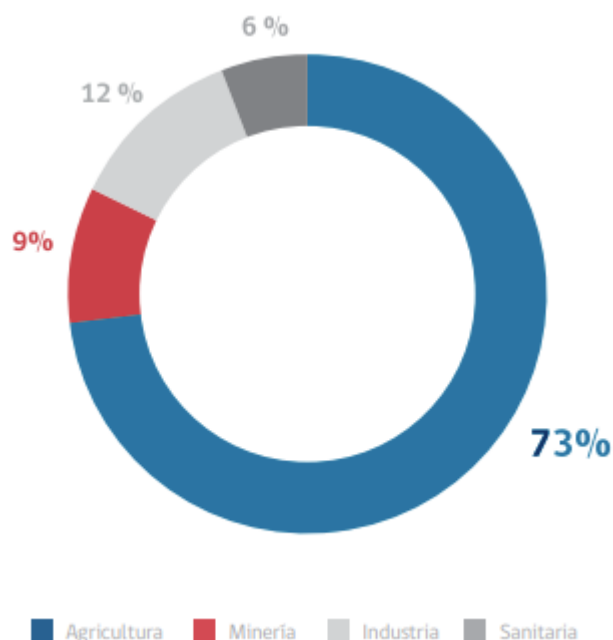


Figura 2.6. Distribución de los usos del agua según actividad económica (Ministerio de Obras Públicas, 2012)

Sin embargo, en la actualidad la minería de cobre hace uso tanto de agua dulce como de agua salada, donde el agua dulce corresponde a las lluvias, escorrentías, embalses superficiales, lagos, ríos y aguas subterráneas. El agua de mar se refiere tanto aquella desalinizada como aquella aplicada directamente en el proceso sin ningún previo tratamiento (Comisión Chilena del Cobre, 2022b).

Dicho aquello, se observó que el consumo de agua de la industria minera durante el año 2021 alcanzó los 17,58 m³/seg, ello sin considerar el reúso o reciclaje de esta. De los cuales 11,8 m³/seg corresponden a agua de origen continental y 5,73 m³/seg agua de mar, donde en la última se identifica un 37% como agua de mar directa y un 63% como agua desalada. A partir de la Figura 2.7 se desprende que desde el año 2012 al 2021 se presenta una tasa de crecimiento en el consumo de agua de mar del orden 22% promedio anual, mientras que en el consumo del agua continental no hubo una variación significativa en los últimos 5 años (Comisión Chilena del Cobre, 2022a).

En la Figura 2.8 se percibe que el proceso de concentración de minerales es la principal fuente de consumo de agua con un total de 12,87 m³/seg, representando un 73% de la entrada de agua. El área de planta concentradora incluye los procesos de conminución, flotación, clasificación y espesamiento (Comisión Chilena del Cobre, 2022a). De acuerdo con el último registro de inversión minera, se estima que en los próximos 10 años la matriz de producción de cobre en Chile se enfocará cada vez más en la producción de cobre fino en concentrados, equivalentes al 77% del aporte productivo de todos los proyectos (Comisión Chilena del Cobre, 2022b).

Como se observa en la Figura 2.9 y Figura 2.10, se proyecta una tasa promedio de crecimiento del agua de mar de 9% anual, donde se estima alcance los 15,28 m³/seg al año 2033, lo cual representa un aumento de 167% respecto al 2021. Igualmente, para el año 2033 se espera que el agua de mar represente un 71% del agua requerida por la minería del cobre (Comisión Chilena del Cobre, 2022c).

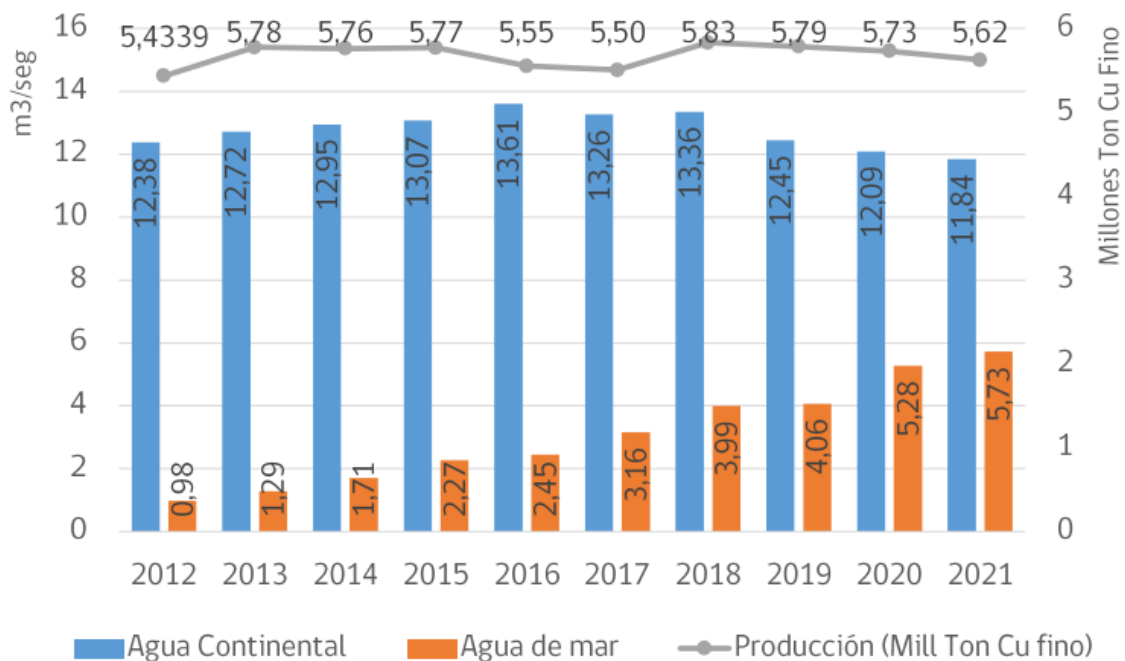


Figura 2.7. Tendencia extracciones de agua en los últimos 10 años (m^3/seg) (Comisión Chilena del Cobre, 2022a)

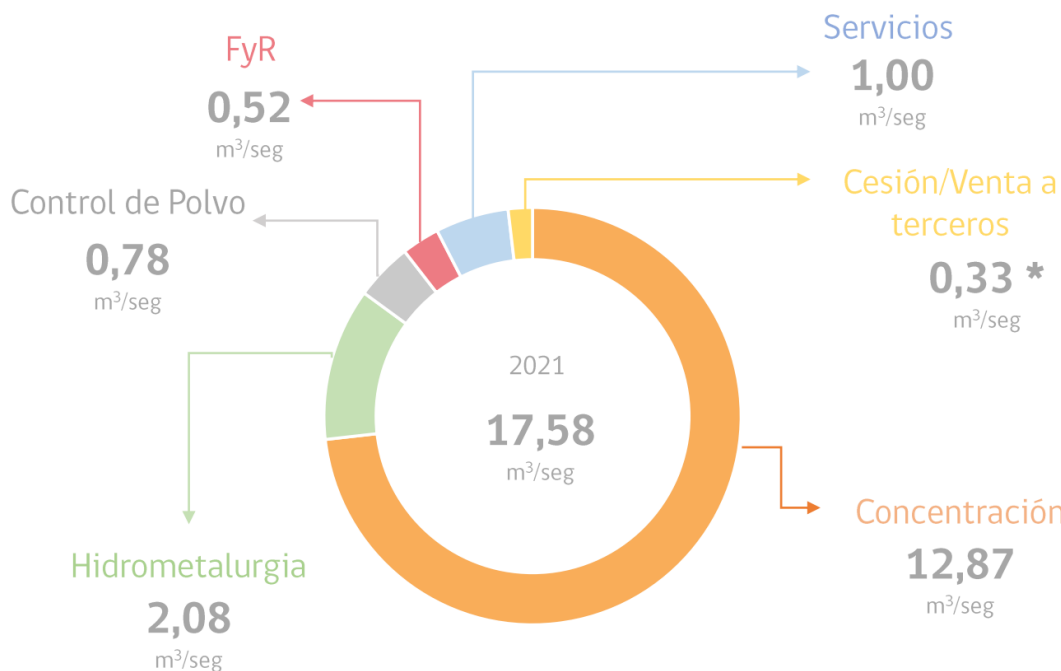


Figura 2.8. Uso del agua según el proceso en la minería de cobre al 2021 (Comisión Chilena del Cobre, 2022a)

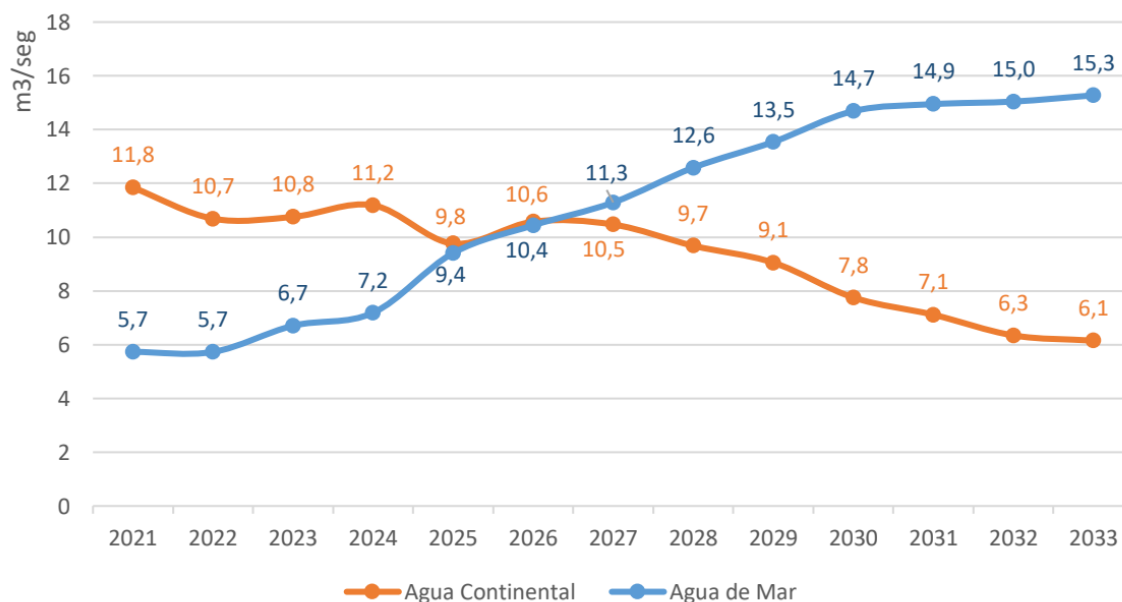


Figura 2.9. Proyección esperada demanda de agua en la minería del cobre según origen 2022-2033 (Comisión Chilena del Cobre, 2022c)

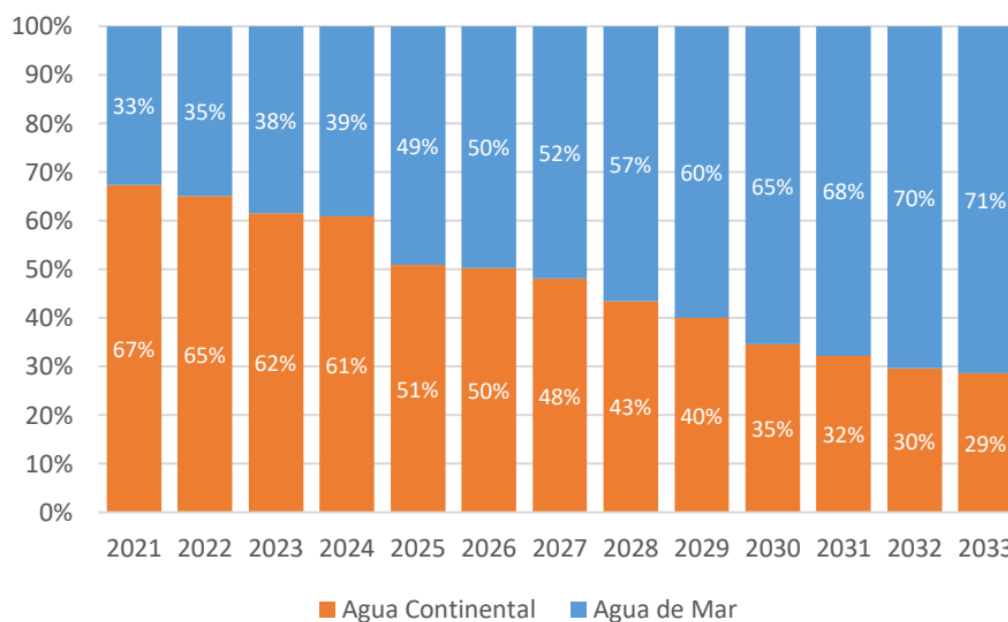


Figura 2.10. Distribución porcentual de demanda de agua en la minería del cobre según origen 2022-2033 (Comisión Chilena del Cobre, 2022c)

Se considera que el consumo de agua en el área planta de concentración alcanzará los 18,5 m³/seg, el cual representará el 86% de la industria, con una participación de 76% de agua de mar para el año 2033, como se presenta en la Figura 2.11 (Comisión Chilena del Cobre, 2022c).

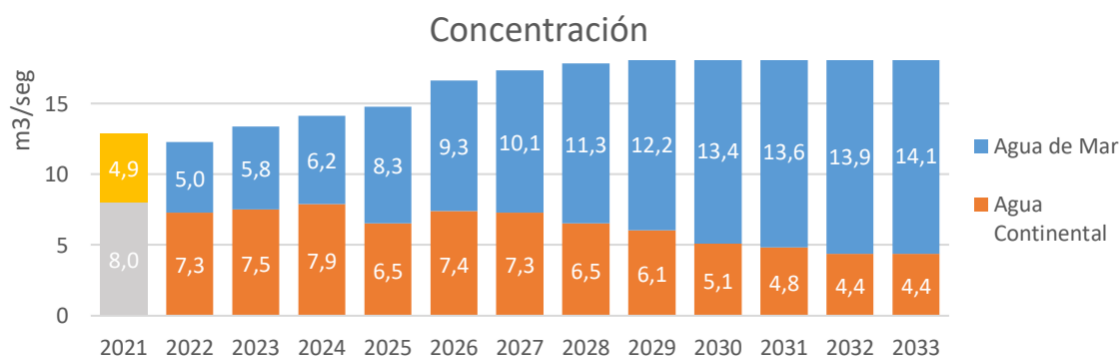


Figura 2.11. Demanda de agua en la minería del cobre en el área planta concentradora (Comisión Chilena del Cobre, 2022c)

2.3 Problemas asociados al agua de mar

Tras lo mencionado anteriormente, se proyecta un aumento en el consumo de agua de mar en los procesos de flotación, sin embargo, pese a que esta representa una alternativa para reemplazar el agua dulce existen factores que pueden afectar el proceso, los cuales son presentados a continuación.

2.3.1 Precipitación de iones del agua de mar a pH elevado

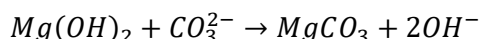
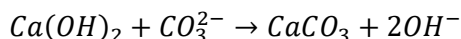
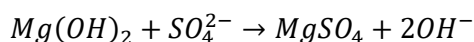
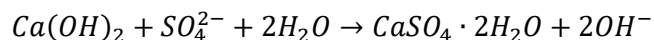
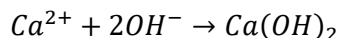
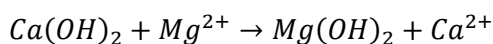
La salinidad del agua de mar es típicamente 3,5% (35 g/L), donde los iones de cloruro y sodio contribuyen aproximadamente al 86% de su salinidad. Adicionalmente, contiene la presencia importante de algunos iones secundarios tales como el ion sulfato, magnesio, calcio y bicarbonato, entre otros que se encuentran en la Tabla 2.2 (Castro, 2018).

Tabla 2.2. Composición típica del agua de mar a salinidad 35‰ (Castro & Huber, 2007)

Ion	Formula Química	Concentración (g/kg)
Cloruro	Cl^{-}	19,345
Sodio	Na^{+}	10,752
Sulfato	SO_4^{2-}	2,701
Magnesio	Mg^{2+}	1,295
Calcio	Ca^{2+}	0,416
Potasio	K^{+}	0,390
Bicarbonato	HCO_3^{-}	0,145
Bromuro	Br^{-}	0,066
Borato	BO_3^{3-}	0,027
Estroncio	Sr^{2+}	0,013
Fluoruro	F^{-}	0,001
Otros		<0,001

Los iones de sulfato, magnesio, calcio, bicarbonato y borato pueden cambiar la superficie química y por consiguiente la flotabilidad de algunos minerales e igualmente algunos de estos iones puede formar precipitados coloidales a pH mayor a 10. Los iones de calcio y magnesio pueden formar

hidróxidos, carbonatos y sulfatos coloidales los cuales pueden recubrir la molibdenita convirtiéndola en hidrofílica (Hirajima et al., 2016; Laskowski et al., 2014; Ramos et al., 2013). Las principales reacciones entre el agua de mar y la cal bajo ciertas condiciones son:



$$k_{ps}Mg(OH)_2 = 1,2 \times 10^{-11}$$

$$k_{ps}Ca(OH)_2 = 4,1 \times 10^{-6}$$

$$k_{ps}CaCO_3 = 6,7 \times 10^{-7}$$

El pH natural del agua de mar se encuentra entre 7,8 y 8,2, el cual varía dependiendo de la salinidad y la concentración del par de iones bicarbonato/carbonato (HCO_3^-/CO_3^{2-}) y borato/ácido bórico ($B(OH)_3/B(OH)_4^-$), donde el equilibrio de estos pares de iones es responsable del efecto buffer y del pH alcalino en el agua de mar (Pytkowicz & Atlas, 1975).

El efecto buffer es principalmente dado por la química del ácido carbónico (H_2CO_3), puesto que cuando el dióxido de carbono (CO_2) reacciona con el agua forma ácido carbónico, el cual se disocia en los iones bicarbonato (HCO_3^-) e hidrogeno (H^+), subsecuentemente el bicarbonato se disocia en ion carbonato (CO_3^{2-}) e hidrógeno. Es por lo que mientras más dióxido de carbono se disuelva en el agua de mar, más ácida se vuelve la solución. En el rango de pH alcalino, las concentraciones de iones de carbonato aumentan con el aumento del pH (S. Castro, 2018).

2.3.2 Consumo excesivo de cal

Uno de los depresante mayormente utilizados en la flotación de sulfuros de cobre–molibdeno es la cal (CaO) debido a su bajo costo, sin embargo, el efecto buffer del agua de mar incrementa significativamente el consumo de cal cuando el pH es ajustado a valores comúnmente usados para la flotación de sulfuros de cobre, es decir, un pH entre 10 y 12, los cuales son necesarios para deprimir pirita en flotación (S. Castro, 2012).

En la Figura 2.12 se observa el efecto buffer donde a medida que aumenta el pH, el consumo de cal aumenta significativamente en agua de mar, de tal manera que se debe añadir una cantidad aproximadamente 8 veces mayor a lo que se utiliza en agua dulce para llegar a pH 10. De la misma manera, los precipitados de hidróxido de magnesio ($Mg(OH)_2$) y el carbonato de calcio ($CaCO_3$), formados en agua de mar a un pH mayor a 10 afectan el consumo de cal (S. Castro, 2018).

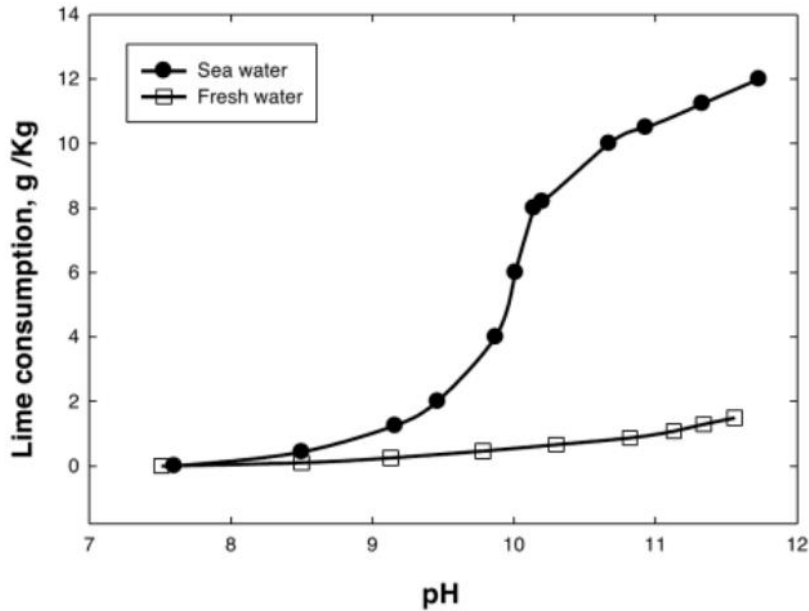


Figura 2.12. Consumo de cal en función del pH en agua de amar y agua dulce (S. Castro, 2012)

2.3.3 Depresión de la molibdenita en agua de mar

La recuperación del molibdeno en agua de mar se ve altamente afectada por el pH, debido a que su flotabilidad es fuertemente deprimida a un pH mayor que 9,5. La Figura 2.13 ilustra la diferencia en la recuperación del molibdeno en agua de mar que se genera respecto al agua dulce, a raíz del aumento el pH, donde esta se reduce drásticamente cuando el pH es mayor a 9,5. Aquello sugiere que la presencia de los iones secundarios tiene un rol en la depresión de la molibdenita en agua de mar.

Es necesario añadir que la molibdenita es un subproducto en la minería del cobre, el cual representa una parte importante del negocio, por consiguiente, es de gran importancia que el agua de mar no afecte su recuperación. Sin embargo, como se observó anteriormente la molibdenita es fácilmente deprimida a $\text{pH} > 9,5$,

Debido a los problemas anteriormente expuestos es que se sugiere un pH entre 8,5 y 9,5 para la flotación de sulfuros de cobre en agua de mar (S. Castro, 2012).

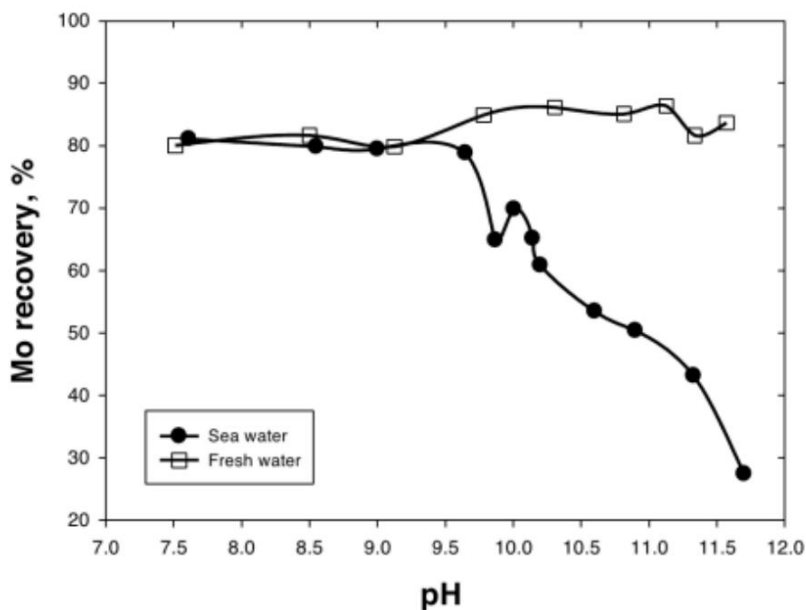


Figura 2.13. Recuperación de molibdeno en función del pH en agua de mar y agua dulce (S. Castro, 2012)

2.4 Bacterias/Microorganismos

Los microorganismos mayormente usados en la industria minera corresponden a bacterias que actúan en el proceso de biolixiviación, donde cumplen el rol de regenerar el ion férrico y mantener el pH ácido. Estas bacterias son quimiolitótrofas, es decir, obtienen su energía a partir de la oxidación de compuestos inorgánicos y obtienen el carbono para generar su masa celular del CO₂ a través del ciclo Calvin-Benson.

Los microorganismos más utilizados en el proceso de biolixiviación son las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* y *Leptospirillum ferrooxidans*. Las bacterias del gen *Acidithiobacillus* se caracterizan por ser bacilos móviles, Gram negativo, se desarrollan a un pH óptimo entre 1,3 y 4 y temperatura entre 30 y 35 °C, es decir, está clasificada como un microorganismo mesófilo. Mientras que las bacterias del gen *Leptospirillum* se caracterizan por ser bacterias Gram negativo, son móviles con forma de vibrio a espirilo, se desarrollan con pH óptimo entre 1,5 y 3 y con temperaturas entre 28 y 30 °C (Donati & Sand, 2007).

Acidithiobacillus ferrooxidans es un microorganismo que obtiene energía a partir de la oxidación de iones Fe (II), varios compuestos de azufre, como el azufre elemental, el tiosulfato, el tritronato, el tetratiónato y el sulfuro, e hidrógeno. Se ha informado que oxida arsenopirita (AsFeS), bornita (Cu₅FeS₄), calcocita (Cu₂S), calcopirita (CuFeS₂), covelina (CuS), enargita (Cu₃AsS₄), galena (PbS), millerita (NiS), oropimente (As₂S₃), pirita (FeS₂), esfalerita (ZnS), estibina (Sb₂S₃), así como sulfuro de galio y los sulfuros metálicos sintéticos CdS, CoS, CuS, Cu₂S, FeS, MnS, MoS₂, NiS, PbS, SnS y ZnS. La capacidad de oxidar iones de Fe (II) y pirita es la característica clave de esta especie de *Acidithiobacillus*. Vive en un ambiente con altas concentraciones de iones metálicos, es resistente a muchos metales catiónicos, aunque los metales que ocurren como oxianiones (como el molibdato) tienden a ser altamente tóxicos para la bacteria (Donati & Sand, 2007).

Acidithiobacillus thiooxidans crece de manera autótrofa con varios compuestos de azufre, como azufre elemental, tiosulfato y tetratiosulfato. Se ha informado crecimiento en los siguientes

sulfuros metálicos: covellita, galena, esfalerita, wurtzita, sin embargo, no oxida la pirita (Donati & Sand, 2007).

Leptospirillum ferrooxidans es capaz de oxidar Fe (II) pero no puede oxidar compuestos de azufre. Crece en pirita, esfalerita y calcopirita, y es resistente a los iones metálicos (Donati & Sand, 2007).

Acidithiobacillus prosperus es una bacteria del género *Acidithiobacillus* capaz de tolerar la concentración de sal del agua de mar (35 g/L). Oxida Fe (II), azufre elemental y sulfuro de hidrógeno (H₂S) y crece en sulfuros metálicos, como pirita, esfalerita, calcopirita, arsenopirita y galena (Donati & Sand, 2007).

El cloruro de sodio (NaCl) es tóxico para *Acidithiobacillus ferrooxidans* puesto que estas no tienen un mecanismo para expulsar los iones Cl⁻. Como resultado, los iones se acumulan dentro de las bacterias causando daño a la pared celular. Se ha observado que las concentraciones de NaCl superiores a 9 g/L no son toleradas por *A. ferrooxidans*. La toxicidad de los iones Cl⁻ depende del pH del medio, mientras más bajo el pH externo, más tóxicos son los iones Cl⁻ (Wei et al., 2011).

3. Metodología

3.1 Preparación de muestra de mineral

Se realizaron experimentos de flotación de pirita en agua destilada y agua de mar, con la finalidad de lograr los objetivos anteriormente planteados. Inicialmente se analizó la distribución granulométrica mediante tamices, las cuales se tamizaron en seco entre la malla #70 y #400 (37 μm y 212 μm). Posteriormente, se limpió con ácido clorhídrico 6 mol/L para remover el óxido de la superficie mineral. Se determinó la composición mineral de las muestras a partir de difracción de rayos X y se realizó una caracterización microscópica.

3.2 Preparación de soluciones líquidas de flotación

Se emplearon dos tipos de soluciones líquidas: agua destilada y agua de mar artificial. El agua de mar se preparó siguiendo el procedimiento de Kester et al. (1967) usando las sales que se presentan en Tabla 3.1. Las sales fueron secadas con anterioridad a la preparación debido a que especies como MgCl_2 , CaCl_2 y SrCl_2 contienen agua de hidratación, la cual genera que el pesaje sea deficiente. Para evitar la precipitación de CaCO_3 , CaSO_4 , SrCO_3 o SrSO_4 se preparó en contenedores separados las sales gravimétricas y las sales volumétricas, posteriormente las soluciones fueron mezcladas. Finalmente, el agua de mar artificial se aireó hasta que el pH no cambiara más de 0,02 unidades durante un periodo de 2 horas alcanzando 8,01 (Kester et al., 1967).

Tabla 3.1. Fórmula para 1 kg de agua de mar artificial al 35% (Kester et al., 1967)

A. Sales Gravimétricas				
Sales	Peso Molecular		g/kg de solución	
NaCl	58,44		23,926	
Na ₂ SO ₄	142,04		4,008	
KCl	74,56		0,677	
NaHCO ₃	84,00		0,196	
KBr	119,01		0,098	
H ₃ BO ₃	61,83		0,026	
NaF	41,99		0,003	
B. Sales Volumétricas				
Sales	Peso Molecular	mol/kg de solución	Concentración (M)	Densidad (g/mL)
MgCl ₂ x6H ₂ O	203,33	0,00527	1	1,071
CaCl ₂ x2H ₂ O	147,03	0,01033	1	1,085
SrCl ₂ x6H ₂ O	266,64	0,00009	0,1	1,013
C. Agua Destilada 1000g				

Por otra parte, se modificó el pH de las soluciones acuosas con el objetivo de evaluar el efecto de este en la recuperación de pirita en agua destilada y agua de mar. Para llegar a pH 4 y 6 se utilizaron soluciones de ácido sulfúrico (H_2SO_4), mientras que, para los pH básicos 8, 10 y 12 se usaron soluciones de hidróxido de sodio (NaOH).

3.3 Preparación de microorganismos

Se prepararon bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Las especies se incubaron en medio basal estéril a 30°C compuesto por las sales presentes en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Compuestos medio de cultivo bacterias

Sales	Fórmulas	Peso Molecular (g/mol)	g/L de solución
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	58,44	0,400
di-Potasio hidrogenofosfato trihidrato	$\text{K}_2\text{HPO}_4 \times 3\text{H}_2\text{O}$	142,04	0,056
Magnesio sulfato heptahidrato	$\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$	74,56	0,400

Una vez preparada la solución de medio de cultivo, se ajustó el pH a 1,6 para el óptimo crecimiento con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y se esterilizó en una autoclave con vapor de agua. Para el crecimiento bacteriano de *A. ferrooxidans* se utilizó hierro sulfato heptahidrato ($\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) como sustrato, el cual se preparó al 33% wt/v en una solución de medio de cultivo.

Las bacterias se prepararon en un matraz Erlenmeyer con volumen de 1 litro anteriormente esterilizado, en el que se agregó 362 mL de medio de cultivo, 18 mL de sustrato y 20 mL de bacterias *A. ferrooxidans*. Al tercer día de incubación la solución adquiere una coloración naranja rojiza producto de la oxidación del hierro como se observa en la Figura 3.1. Durante el periodo de incubación las bacterias se mantuvieron dentro de un agitador orbital a temperatura de 30°C y una frecuencia de 100 rpm (Figura 3.2).

El cultivo bacteriano se realizó mediante un filtrado de la solución que contiene las células con un papel filtro Whatman 42 para eliminar los precipitados de hierro. La solución obtenida libre de precipitados se filtró nuevamente usando una membrana Durapore de 0,22 μm . Finalmente, las células retenidas en la membrana se lavaron con agua a pH 2 con el fin de obtener células libres de residuos metabólicos (San Martín, 2018).

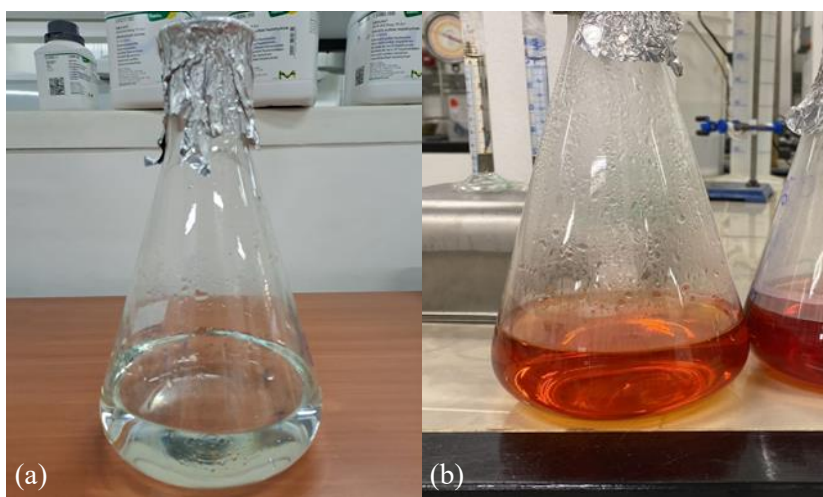


Figura 3.1. Matraz Erlenmeyer con *A. ferrooxidans* al primer (a) y tercer (b) día de incubación



*Figura 3.2. Agitador orbital usado para incubar bacterias *A. ferrooxidans**

La concentración bacteriana se controló mediante recuento directo (Figura 3.3) en un microscopio trinocular modelo CX23 marca Olympus presente en la Figura 3.4 (San Martín, 2018).



Figura 3.3. Fotografía concentración bacteriana



Figura 3.4. Microscopio Olympus CX23 y cámara Neubauer usada para el recuento directo de bacterias

3.4 Experimentos de microflotación

Se realizaron experimentos de flotación en una celda Hallimond (Figura 3.5) usando 1 g de pirita y 100 mL de agua de mar o agua destilada como se observa en el diagrama de flujo presentado en la Figura 3.6. Primero, se optimizó la concentración de MBS con el objetivo de encontrar la dosis de depresante que provoque la menor recuperación. Después, se realizaron experimentos de flotabilidad natural, flotabilidad con 150 g/ton de colector, flotabilidad con colector y depresante o biodepresante de la pirita en agua de mar o destilada a diferentes pH (4, 6, 8, 10 y 12). Las flotaciones se realizaron en un tubo Hallimond a diferentes pH (4, 6, 8, 10 y 12) con agua de mar o destilada. Primero, 1 g de mineral se agitó con 19,5 mL de agua, luego se añadió el depresante que puede ser MBS o bacterias *A. ferrooxidans*, y se agitó con este durante 15 min a diferentes pH. Posteriormente, se añadió el colector y se agitó con este durante 5 min. A continuación, se agregó agua a dichos pH (80 mL) para flotar el mineral durante 5 minutos inyectando aire a la celda (San Martín et al., 2020). Las flotaciones sin depresantes (solo con colector o natural) se realizaron de la misma manera, pero sin el acondicionamiento de 15 min con depresante. Finalmente, se recolectaron los concentrados y relaves de cada experimento y se pesó la masa de pirita para calcular las recuperaciones.

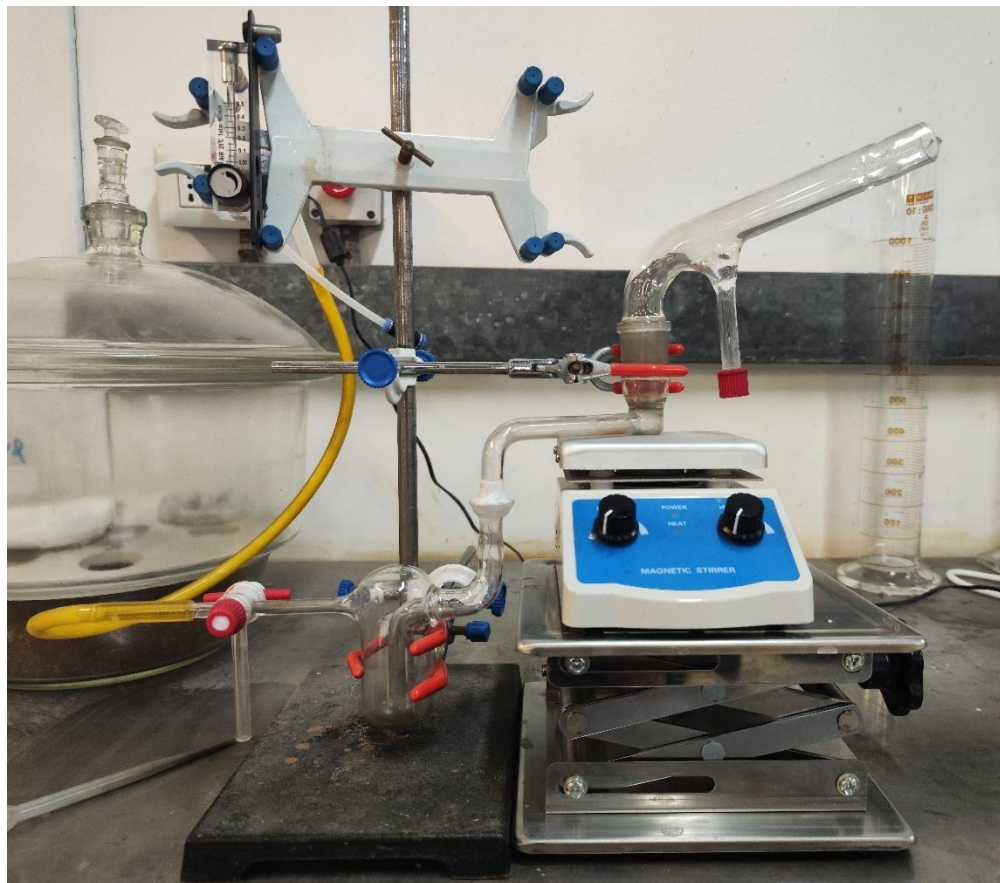


Figura 3.5. Celda Hallimond utilizada para realizar los experimentos de flotación

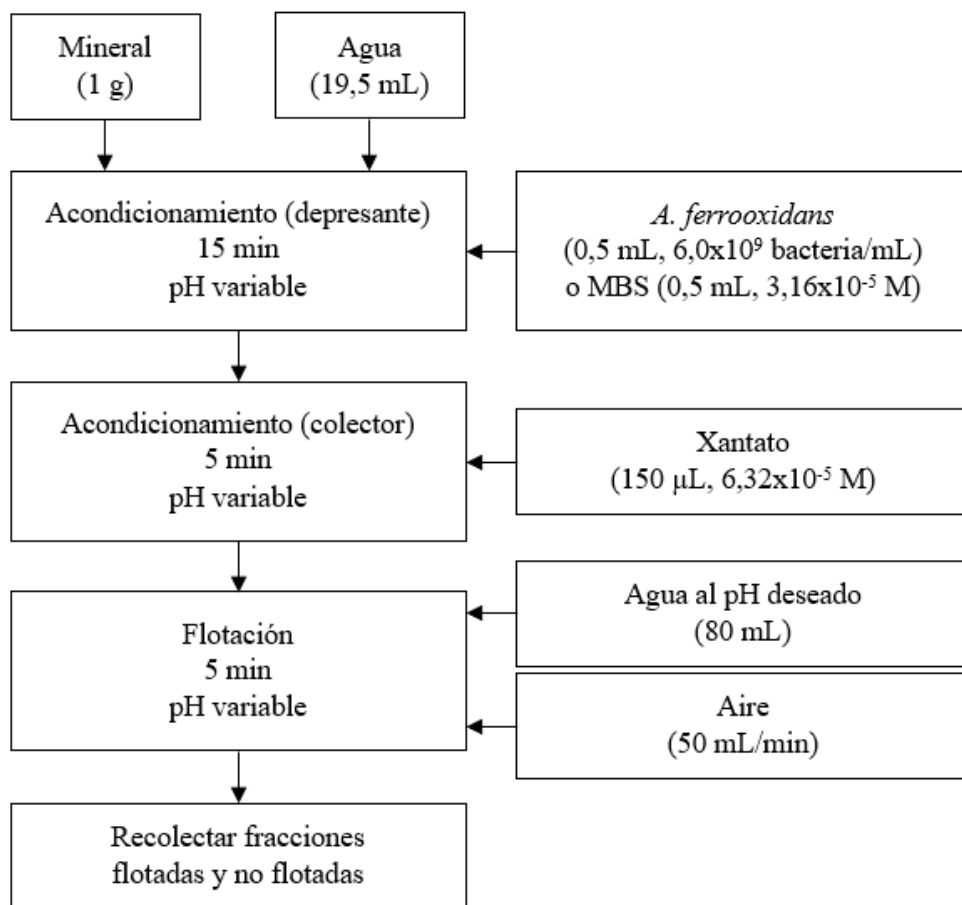


Figura 3.6. Diagrama procedimiento de flotación.

Se realizaron un total 50 flotaciones como se muestra en la Tabla 3.3 los cuales se conducirán en triplicado, por lo que ejecutaron un total de 150 experimentos. Adicionalmente, se incluyeron 15 experimentos, previos a la flotación, para la optimización del metabisulfito de sodio.

Se llevaron a cabo 10 experimentos en triplicado de flotación de pirita utilizando metabisulfito de sodio en agua destilada y agua de mar, a diferentes niveles de pH (4, 6, 8, 10 y 12). Estos experimentos incluyeron la adición del activador sulfato de cobre (CuSO_4) con el propósito de observar las diferencias en la recuperación entre la pirita no activada y la pirita activada, en respuesta al depresante MBS. Para llevar a cabo estas flotaciones, fue necesario incorporar una nueva etapa de acondicionamiento con sulfato de cobre (CuSO_4) con una concentración de 1×10^{-3} M durante 5 minutos antes del acondicionamiento con el depresante.

Tabla 3.3. Matriz de Experimentos

Nº	Agua	Tipo Flotación	pH
1	Agua de mar	Flotabilidad Natural	4
2			6
3			8
4			10
5			12
6		Flotabilidad con Colector	4
7			6
8			8
9			10
10			12
11		Bioflotación	4
12			6
13			8
14			10
15			12
16		Flotación con metabisulfito de sodio	4
17			6
18			8
19			10
20			12
21		Flotación con metabisulfito de sodio y sulfato de cobre	4
22			6
23			8
24			10
25			12
26	Agua destilada	Flotabilidad Natural	4
27			6
28			8
29			10
30			12
31		Flotabilidad con Colector	4
32			6
33			8
34			10
35			12
36		Bioflotación	4
37			6
38			8
39			10
40			12

41		Flotación con metabisulfito de sodio	4
42			6
43			8
44			10
45			12
46		Flotación con metabisulfito de sodio y sulfato de cobre	4
47			6
48			8
49			10
50			12

4. Resultados y discusión

En la Figura 4.1 se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de flotación con diferentes dosis de metabisulfito de sodio (MBS), realizadas en agua de mar a pH natural (pH 8), con la adición del reactivo xantato de sodio (150 g/t). Se observa que la mayor recuperación de pirita se logró con una dosis de 0 g/t (95%). Sin embargo, al introducir el depresante, se evidenció una disminución progresiva de la recuperación, alcanzando su nivel más bajo a 300 g/t (87%).

Este descenso en la recuperación se explica principalmente porque la adición de MBS, como reactivo depresante, inhibe la flotabilidad del mineral. Un fenómeno similar fue observado por Mu & Peng (2019), donde la recuperación de pirita con MBS a una dosis elevada de 700 g/t no fue efectiva cuando se incorporó durante la molienda. Sin embargo, al agregarlo durante la etapa de acondicionamiento, la recuperación de la pirita activada por cobre disminuyó significativamente con una dosis de 300 g/t.

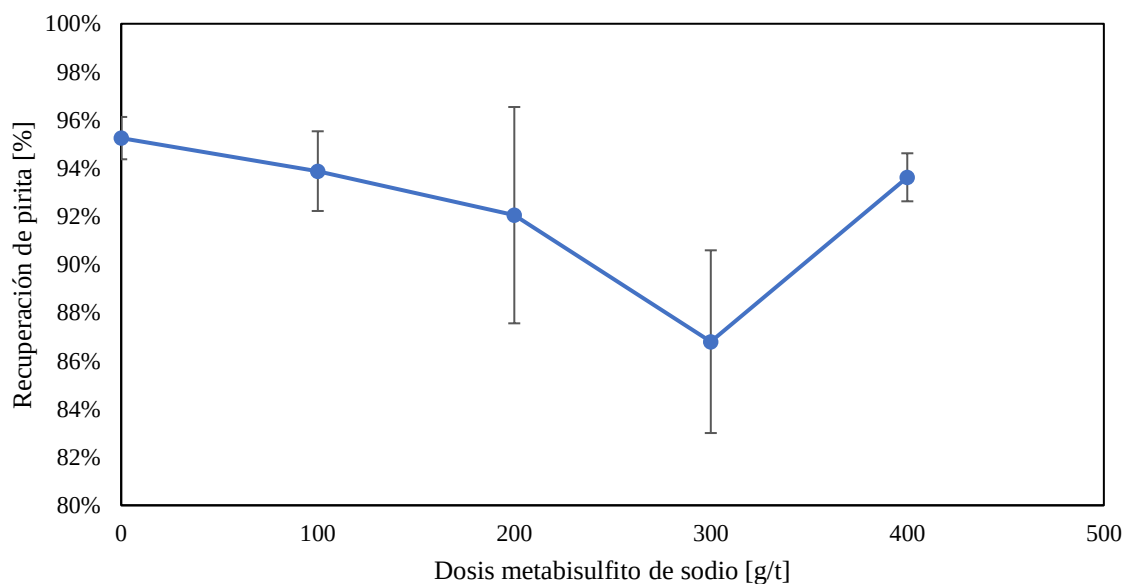


Figura 4.1. Efecto de diferentes dosis de metabisulfito de sodio en la recuperación de pirita en agua de mar

Figura 4.2 presenta los resultados de flotación llevados a cabo en agua destilada a diferentes pH, variando desde 4 a 12. La curva azul describe la flotabilidad natural de la pirita, donde se muestra que las recuperaciones de pirita están entre 16% y 26% a un rango de pH 4-12. Con la adición de colector xantato (curva naranja) la recuperación de pirita aumentó en gran medida entre los pH 4-10 alcanzando valores entre 78% y 90%, siendo un incremento promedio de 271% respecto a la flotabilidad natural, mientras que para pH 12 llegó a 28,7% incrementando un 20%. A su vez, los experimentos con el bioacondicionamiento de *A. ferrooxidans* (curva gris) mostraron una reducción en la recuperación de pirita obteniéndose valores similares a los resultados de flotabilidad natural. Por otra parte, los experimentos llevados a cabo con metabisulfito de sodio (curva amarilla) se comportaron semejantemente a aquellos conducidos solo con colector, aquello permite inferir que el depresante MBS no tiene efecto cuando se trata de disminuir la flotabilidad de únicamente pirita.

Los resultados observados en agua destilada coinciden con los descritos en Chandrababha et al. (2004) donde la flotación de pirita de manera natural y la flotación conducida con colector y bacterias en agua destilada poseen valores cercanos al 20% para los pH entre 4 y 9.

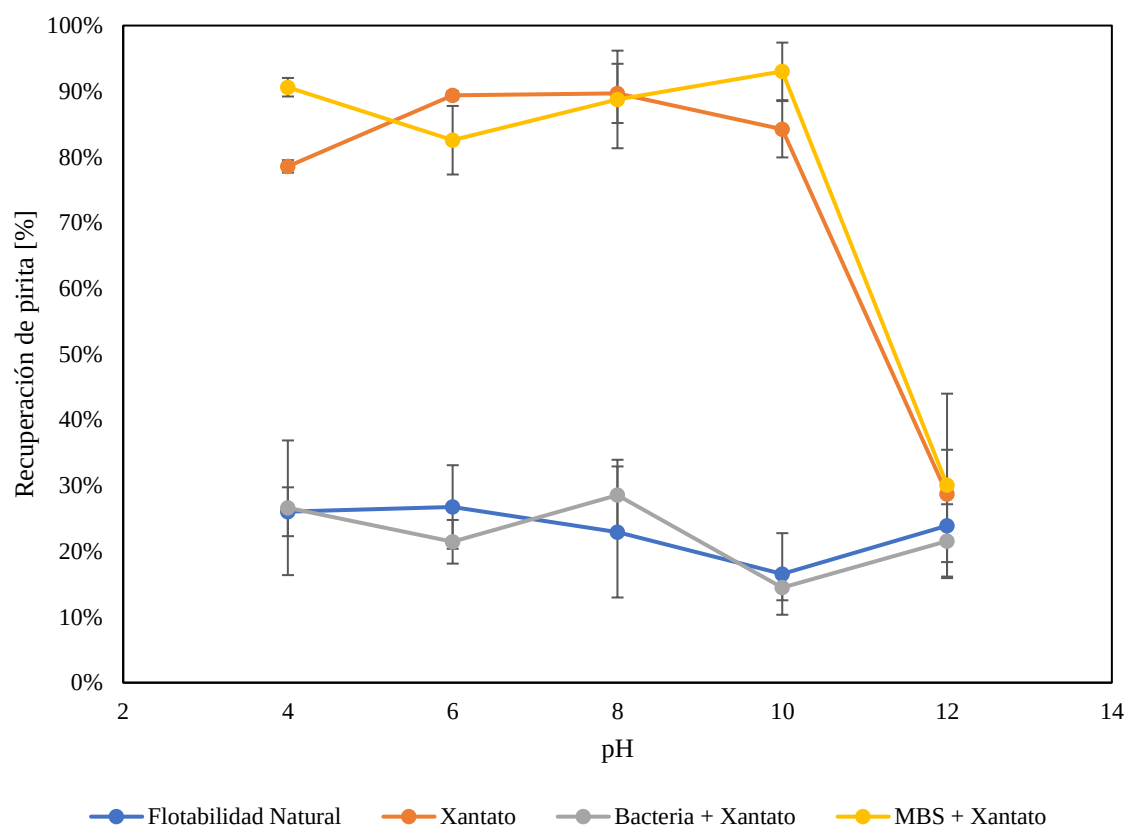


Figura 4.2. Efecto de *A. ferrooxidans* y metabisulfito de sodio en pirita en agua destilada. La concentración de *A. ferrooxidans*, MBS y xantato fueron de $1,5 \times 10^8$ bacteria/ml, $7,89 \times 10^{-5}$ M y $4,74 \times 10^{-5}$ M, respectivamente.

La Figura 4.3 contiene los resultados de flotación llevados a cabo en agua de mar a diferentes pH, variando desde 4 a 12. La curva azul describe la flotabilidad natural de la pirita en agua de mar, donde se muestra que las recuperaciones de esta se encuentran entre 24% y 31% a un rango de pH 4-12, siendo ligeramente superiores por un 22% en promedio respecto a su símil en agua destilada. Con la adición de colector xantato (curva naranja) la recuperación de pirita sufrió un alza drástica para los pH 4-10 alcanzando valores entre 95% y 96%, siendo un incremento promedio de 237% respecto a la flotabilidad natural, mientras que en pH 12 se posee la recuperación más baja (37,3%) representado un incremento de 30%.

Los experimentos con el bioacondicionamiento de *A. ferrooxidans* (curva gris) obtuvieron altas recuperaciones de 93,3% y 90,7% para los pH 4 y 6, respectivamente. A medida que el pH aumenta la flotabilidad disminuye, obteniéndose a pH 8 un valor a 64,3% y cae aún más entre pH 10 y 12, con resultados entre 21% y 29%. La curva descrita presenta un comportamiento similar a los resultados observados en San Martín et al. (2021), donde se muestra que a pH ácido (4-6) la recuperación de pirita es elevada y sufre una disminución importante para $\text{pH} \geq 8$.

Con respecto a los experimentos de metabisulfito de sodio (curva amarilla), estos se comportaron nuevamente parecido a aquellos conducidos solo con colector, reafirmando lo anteriormente mencionado, puesto que el depresante MBS no parece tener efecto cuando se trata de disminuir la flotabilidad de únicamente pirita.

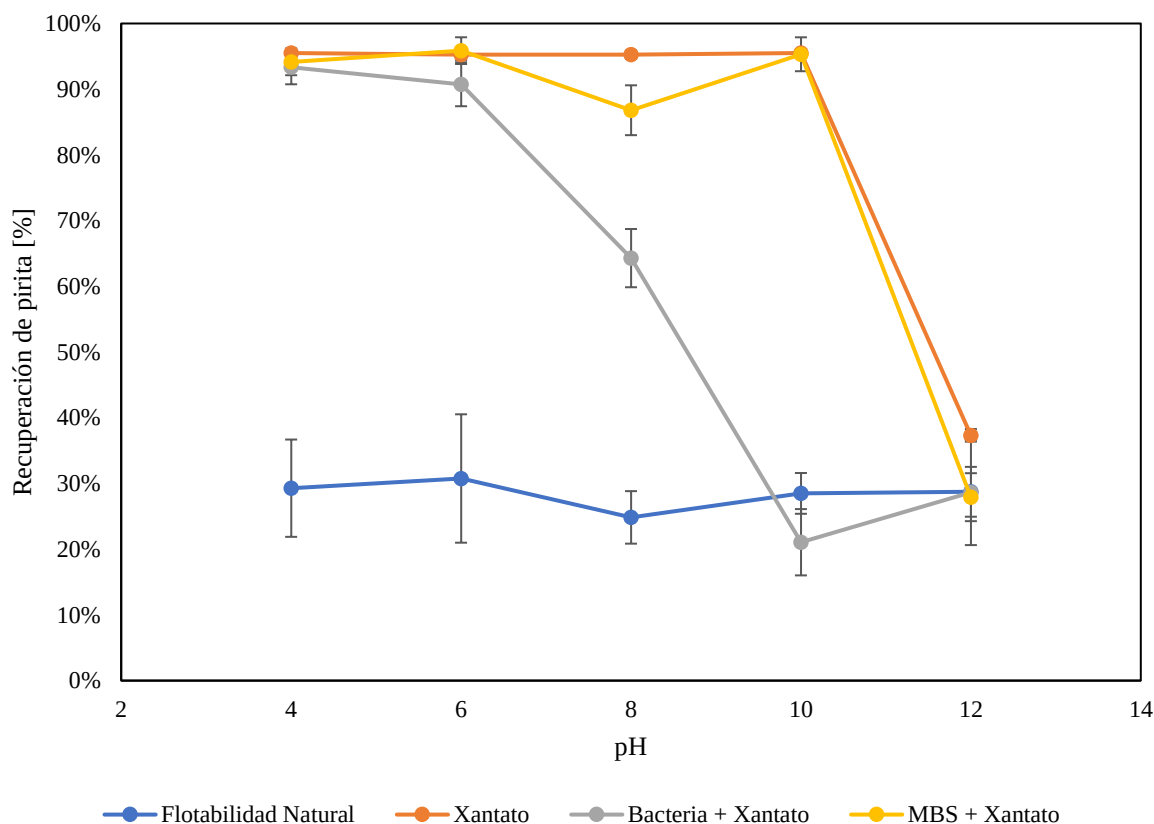


Figura 4.3. Efecto de *A. ferrooxidans* y metabisulfito de sodio en pirita en agua de mar. La concentración de *A. ferrooxidans*, MBS y xantato fueron de $1,5 \times 10^8$ bacteria/ml, $7,89 \times 10^{-5}$ M y $4,74 \times 10^{-5}$ M, respectivamente

La Figura 4.4 contiene los resultados de flotación de metabisulfito de sodio con la adición de sulfato de cobre (CuSO_4) llevados a cabo en agua destilada a diferentes pH, variando desde 4 a 12. La curva amarilla muestra los resultados de los experimentos realizados con xantato y metabisulfito de sodio donde se tiene una alta recuperación entre los valores 82% y 93% para los pH 4 y 10, aunque esta disminuye en pH 12 a un 30%. Con la adición de sulfato de cobre (curva verde) se observa una disminución del 14% promedio para los pH entre 4 y 10, obteniéndose valores recuperaciones entre 72% y 80%. Para el pH 12 se alcanza un valor de 24%, lo cual representa una disminución de 20%.

Por otro lado, la Figura 4.5 contiene los resultados de flotación de metabisulfito de sodio con la adición de sulfato de cobre (CuSO_4) llevados a cabo en agua de mar a diferentes pH, variando desde 4 a 12. La curva amarilla muestra los resultados de los experimentos realizados con xantato y metabisulfito de sodio donde se tiene una alta recuperación entre los valores 86% y 96% para los pH 4 y 10, aunque esta disminuye en pH 12 a un 28%. Con la adición de iones de cobre (curva verde) se observa que para pH 4 no hay cambio, sin embargo, cuando el pH es mayor o igual a 6 la recuperación disminuye a valores entre 70% y 76% para los pH 6 y 8 y aún más entre los valores 13% y 23% para los pH 10 y 12.

Estos resultados están de acuerdo con lo visto por Uribe et al. (2016), donde la presencia de iones cobre en la flotación reduce la recuperación a valores cercanos a 70% para pH 8 en agua destilada con una concentración de 30 ppm de Cu^{2+} . Sin embargo, para agua de mar bajo las mismas condiciones de pH y concentración de iones se observaron valores cercanos al 20%, lo cual difiere con los obtenidos en este estudio para pH 8 (75,8%), pero se obtiene resultados similares en pH 10 y 12.

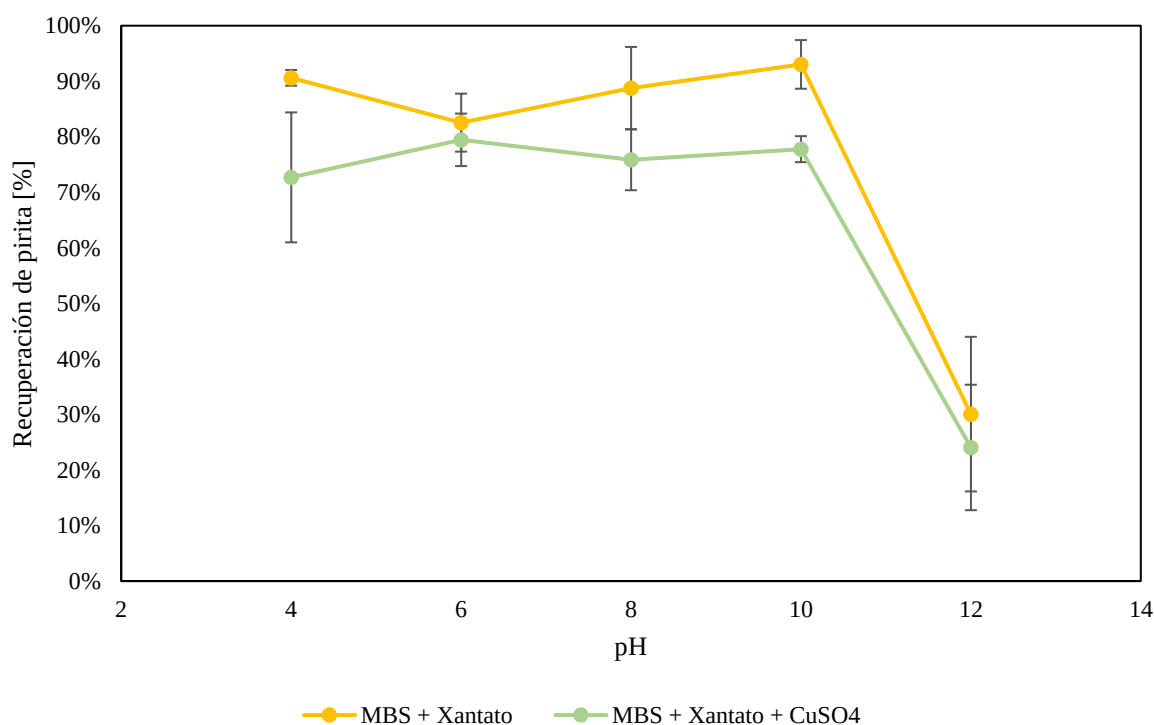


Figura 4.4. Efecto del sulfato de cobre en flotación de pirita con metabisulfito de sodio y xantato en agua destilada. La concentración de sulfato de cobre en el acondicionamiento era $3,0 \times 10^{-5} \text{ M}$

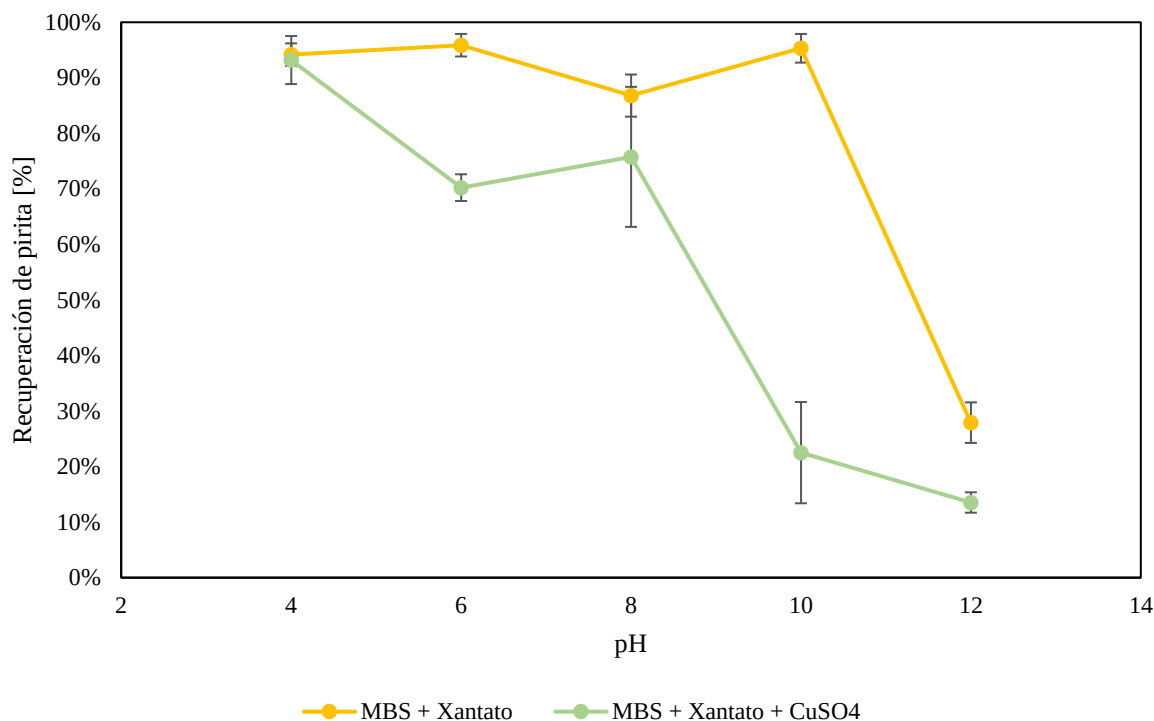


Figura 4.5. Efecto del sulfato de cobre en flotación de pirita con metabisulfito de sodio y xantato en agua de mar. La concentración de sulfato de cobre en el acondicionamiento era $3,0 \times 10^{-5}$ M

Se observa un mayor efecto en la depresión de mineral pirita con el uso de bacterias *A. ferrooxidans*, respecto a los resultados de metabisulfito de sodio, particularmente para los pH entre 8 y 10, donde los experimentos de MBS no sufrieron cambio alguno respecto a aquellos utilizando solo colector en agua destilada y agua de mar. Por el contrario, las flotaciones con bacterias mostraron una reducción en la recuperación, obteniendo valores de 28,5% y 14,5% en agua destilada, para los pH 8 y 10, respectivamente. En agua de mar con bacterias, las recuperaciones bajaron a 64,3% y 21,1%, para los pH 8 y 10, respectivamente.

Cuando se agrega sulfato de cobre, se observa que el MBS deprime fuertemente a la pirita a pH 10 en agua de mar obteniendo una recuperación de 23% que es comparable al resultado obtenido con bacterias (21,03%). En todos los otros valores de pH el efecto depresante de las bacterias es mayor que del MBS.

Cabe destacar que en pH 4 la recuperación de pirita en agua de mar ronda el 90%, para ambos depresantes, aquello se puede explicar debido a que el colector xantato a ese pH se forman productos ricos en azufre y dixantogeno (Leppinen, 1990; López Valdivieso et al., 2005), siendo este ultimo la especie responsable de la hidrofobicidad de la pirita (Fuerstenau, 2007; Miller et al., 2002). Cabe agregar, que en San Martín (2020) se observó el efecto que tiene el pH en la adherencia de la bacteria *A. ferrooxidans* a la pirita en agua de mar, donde el microorganismo se adhiere en mayor cantidad en pH 8 que en pH 4, es decir, la densidad de bacterias por partícula de pirita es mayor, de esta manera previniendo que actúe el colector sobre su superficie.

Mientras que, en todos los escenarios evaluados se observa que para pH 12, la pirita es deprimida alcanzando una recuperación máxima de 37,3% en agua de mar solo añadiendo colector, aquello se debe principalmente que en un medio alcalino la pirita disminuye considerablemente su

capacidad para flotar debido a la inestabilidad del dixantogeno y la formación de islas de oxihidróxido de hierro (Leppinen, 1990).

Aquello demuestra que la bacteria es capaz de deprimir la pirita en mejor medida que el metabisulfito de sodio, aun cuando estas se encuentran en un medio alcalino y/o agua de mar con una concentración de 35 g/L de NaCl. Cabe mencionar que las *A. ferrooxidans* son organismos acidófilos y son inhibidas a concentraciones de NaCl mayores que 9 g/L (Huynh et al., 2020; Suzuki et al., 1999).

Cabe señalar que mientras la presencia de sulfato de cobre (o iones de cobre) produce un aumento de la recuperación de pirita, debido a la activación de este mineral, que se observa incluso en presencia de bacterias depresantes *A. ferrooxidans* (San Martín et al. 2021). Sin embargo, cuando se utiliza MBS como depresante, los iones de cobre tienen el efecto contrario, es decir, se produce mayor depresión que sin cobre, esto se debe a que el MBS reacciona con el cobre sobre la superficie de la pirita, permitiendo su depresión (Uribe et al., 2016). 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, por lo tanto, el MBS podría ser más efectivo que las bacterias *A. ferrooxidans*.

Continuando con la idea anterior, cabe mencionar el estudio de Valenzuela (2023) donde se realizaron experimentos de flotación en agua de mar con bacterias *A. ferrooxidans* y metabisulfito de sodio (MBS) como depresor, usando muestras de mineral real, es decir, una mezcla compuesta de diversos minerales, como calcopirita, pirita, cuarzo, feldespato, entre otros. En dicho trabajo se observó que el MBS presentó mejores resultados que las bacterias, denotando una recuperación del 57% con el uso MBS a pH 8, mientras que, en bacterias se obtuvo una recuperación de 70% para el mismo pH. Estos resultados discrepan de los obtenidos en la presente investigación, principalmente debido a las diferencias en la composición del mineral empleado ya que en este estudio se utilizó pirita pura y en el estudio de Valenzuela (2023) se utilizó un mineral real. Además, la concentración de bacterias utilizada en el proceso de flotación fue mayor en este estudio ($1,5 \times 10^8$ bacterias/mL) que en el de Valenzuela (2023) ($1,34 \times 10^6$ bacterias/mL), por lo cual la cantidad de bacterias adheridas a la pirita fue mayor en esta investigación, por lo que el efecto depresante también fue mayor.

5. Conclusiones

En el presente estudio se observó el efecto de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y metabisulfito de sodio en flotación de pirita en agua destilada y agua de mar a un rango de pH entre 4 y 12, con el objetivo de comparar su desempeño como reactivo depresante en flotación.

Se identificó que la concentración óptima de metabisulfito de sodio para las condiciones de estos experimentos es de 300 g/t, donde se alcanzó la menor recuperación (86,8%) en agua de mar a pH natural (7,8-8,2).

El efecto metabisulfito de sodio en la depresión de pirita es despreciable en agua destilada y agua de mar para todos los pH estudiados (4-12). Se puede notar como a pH 8 las recuperaciones agua destilada y de mar se reducen de 89,7% a 88,8% y 95,3% a 86,8%, respectivamente. Sin embargo, se observó que bajo el efecto del activador sulfato de cobre con una concentración de 3×10^{-5} M, se logra deprimir mejor la pirita alcanzando valores 75,9% en agua destilada y 75,8% en agua de mar a pH 8.

Las bacterias *A. ferrooxidans* son capaces de deprimir la recuperación de pirita de 89,7% a 28,5% en agua destilada y de 95,3% a 64,3% en agua de mar ambos casos a pH 8, lo cual representa una disminución del 68% y 33% en agua destilada y agua de mar, respectivamente. Por otra parte, cabe destacar que en agua destilada para todos los pH estudiados (4-12) se presenció el efecto depresante de las bacterias, obteniéndose recuperaciones cercanas al 20%, alcanzando su máximo valor en pH 8 (28,5%). Por el contrario, en agua de mar se advirtieron pobres resultados en los pH más ácidos (4-6) con valores cercanos a 90%, que se ven reducidos a medida que se aumenta el pH a 8 (64,3%) y superiores llegando a valores aproximados a 20%.

Dicho esto, se identificó que las bacterias *A. ferrooxidans* presentan un mejor desempeño como depresante de pirita que el MBS en flotación en agua de mar y agua destilada. Al agregar sulfato de cobre, el desempeño del MBS como depresante mejoró, pero no superó a las bacterias. Por lo tanto, las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* podrían ser un depresante alternativo de pirita en agua de mar a pH natural, en reemplazo de la cal y del MBS.

Recomendaciones

Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los del trabajo de Valenzuela (2023), se destaca la necesidad de llevar a cabo nuevos experimentos utilizando muestras de mineral real en agua de mar. Estos experimentos deben realizarse con una concentración de bacterias *A. ferrooxidans* igual o mayor a 3×10^8 bacterias/mL, siguiendo los estudios de Chandraprabha et al. (2004) y San Martín et al. (2020, 2021). El objetivo es establecer una comparativa más precisa y así identificar cuál muestra una mejor capacidad depresante de la pirita.

Se recomienda también explorar una medida de la concentración de bacterias en g/L en lugar de bacterias/mL. Esto permitirá comparar la dosis de depresante de metabisulfito de sodio (MBS), medida en g/L, con la concentración de *A. ferrooxidans*. Esta comparación facilitará la determinación del consumo de bacterias y MBS necesarios en el proceso de flotación. Además, este enfoque posibilitará realizar un análisis económico más detallado del proceso.

6. Bibliografía

- Arancibia-Bravo, M. P., Lucay, F. A., Sepúlveda, F. D., & Cisternas, L. A. (2021). On the use of Na₂SO₃ as a pyrite depressant in saline systems and the presence of kaolinite. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 57(4), 168–179.
<https://doi.org/10.37190/PPMP/139511>
- 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. In *Minerals Engineering* (Vol. 11, Issue 4).
- Castro, Peter., & Huber, M. E. (2007). *Biología Marina* (6ta Edición). McGraw-Hill.
- Castro, S. (2012). Challenges in Flotation of Cu-Mo Sulfide Ores in Sea Water. *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, 29–40.
- Castro, S. (2018). Physico-chemical factors in flotation of Cu-Mo-Fe ores with seawater: A critical review. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 54(4), 1223–1236.
<https://doi.org/10.5277/ppmp18162>
- Chandraprabha, M. N., Natarajan, K. A., & Modak, J. M. (2004). Selective separation of pyrite and chalcopyrite by biomodulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 37(3–4), 93–100.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2004.06.011>
- Chandraprabha, M. N., Natarajan, K. A., & Somasundaran, P. (2005). Selective separation of pyrite from chalcopyrite and arsenopyrite by biomodulation using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *International Journal of Mineral Processing*, 75(1–2), 113–122.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2004.08.014>
- Chen, Y., Chen, X., & Peng, Y. (2021). The depression of molybdenite flotation by sodium metabisulphite in fresh water and seawater. *Minerals Engineering*, 168.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106939>
- Comisión Chilena del Cobre. (2022a). *Consumo de agua en la minería del cobre, Actualización al 2021*.
<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre%202021.pdf>
- Comisión Chilena del Cobre. (2022b). *Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2022-2031*.
- Comisión Chilena del Cobre. (2022c). *Proyección de demanda de agua en la minería del cobre, Periodo 2022-2033*.
<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Proyección%20de%20demanda%20de%20agua%20en%20la%20mineria%20del%20cobre.pdf>
- Donati, E. R., & Sand, W. (2007). *Microbial Processing of Metal Sulfides* (E. R. Donati & W. Sand, Eds.). Springer Science & Business Media.

- Fuerstenau, D. W. (2007). A Century of Developments in the Chemistry of Flotation Processing. In D. W. Fuerstenau, G. Jameson, & R.-H. Yoon (Eds.), *Froth Flotation: A Century of Innovation* (pp. 3–64). SME.
- Hassanzadeh, A., & Hasanzadeh, M. (2017). 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>
- Hirajima, T., Suyantara, G. P. W., Ichikawa, O., Elmahdy, A. M., Miki, H., & Sasaki, K. (2016). Effect of Mg^{2+} and Ca^{2+} as divalent seawater cations on the floatability of molybdenite and chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 96–97, 83–93.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.023>
- Hosseini, T. R., Kolahdoozan, M., Tabatabaei, Y. S. M., Oliazadeh, M., Noaparast, M., Eslami, A., Manafi, Z., & Alfantazi, A. (2005). Bioflotation of Sarcheshmeh copper ore using Thiobacillus Ferrooxidans bacteria. *Minerals Engineering*, 18(3), 371–374.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.005>
- Huynh, D., Norambuena, J., Boldt, C., Kaschabek, S. R., Levicán, G., & Schlömann, M. (2020). Effect of Sodium Chloride on Pyrite Bioleaching and Initial Attachment by *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*. *Frontiers in Microbiology*, 11.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.02102>
- Kester, D. R., Duedall, I. W., Connors, D. N., & Pytkowicz, R. M. (1967). Preparation of artificial seawater. In *Limnology and Oceanography* (Vol. 12, Issue 1, pp. 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. In *International Journal of Mineral Processing* (Vol. 33).
- Laskowski, J. S., Castro, S., & Ramos, O. (2014). Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 50(1), 17–29. <https://doi.org/10.5277/ppmp140102>
- Leppinen, J. O. (1990). FTIR and flotation investigation of the adsorption of ethyl xanthate on activated and non-activated sulfide minerals. In *International Journal of Mineral Processing* (Vol. 30).
- López Valdivieso, A., Cervantes, T. C., Song, S., Cabrera, A. R., & Laskowski, J. S. (2005). Dextrin as a non-toxic depressant for pyrite in flotation with xanthates as collector. *Minerals Engineering*, 17(9–10), 1001–1006. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.04.003>
- Mehrabani, J. V., Mousavi, S. M., & Noaparast, M. (2011). Evaluation of the replacement of NaCN with *Acidithiobacillus ferrooxidans* in the flotation of high-pyrite, low-grade lead-zinc ore. *Separation and Purification Technology*, 80(2), 202–208.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.04.006>
- Miller, J. D., Du Plessis, R., Kotylar, D. G., Zhu, X., & Simmons, G. L. (2002). *The low-potential hydrophobic state of pyrite in amyl xanthate flotation with nitrogen*.
www.elsevier.com/locate/ijminpro

- Ministerio de Obras Públicas. (2012). *Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2025*.
- Misra, M., Bukka, K., & Chen, S. (1996). THE EFFECT OF GROWTH MEDIUM OF THIOBACILLUS FERROOXIDANS ON PYRITE FLOTATION. *Minerals Engineering*, 9(2), 157–168.
- Mu, Y., & Peng, Y. (2019). The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water. *Minerals Engineering*, 142. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.105921>
- Nagaoka, T., Ohmura, N., & Saiki, H. (1999). A Novel Mineral Flotation Process Using Thiobacillus ferrooxidans. In *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* (Vol. 65, Issue 8).
- Nagaraj, D. R., & Ravishankar, S. A. (2007). Flotation Reagents - A Critical Overview from an Industry Perspective. In D. W. Fuerstenau, G. Jameson, & R.-H. Yoon (Eds.), *Froth Flotation: A Century of Innovation* (pp. 375–423). SME.
- Napier-Munn, Tim., & Wills, B. A. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology : An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Elsevier/BH.
- National Center for Biotechnology Information. (2023). *PubChem Compound Summary for CID 656671, Sodium metabisulfite*. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Sodium-metabisulfite>
- Ohmura, N., Kitamura, K., & Saiki, H. (1993). Mechanism of microbial flotation using Thiobacillus ferrooxidans for pyrite suppression. *Biotechnology and Bioengineering*, 41(6), 671–676. <https://doi.org/10.1002/bit.260410611>
- Poorkani, M., & Banisi, S. (2005). Industrial use of nitrogen in flotation of molybdenite at the Sarcheshmeh copper complex. *Minerals Engineering*, 18(7), 735–738. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.10.013>
- Pytkowicz, R. M., & Atlas, E. (1975). Buffer intensity of seawater. *Limnology and Oceanography*, 20(2), 222–229. <https://doi.org/10.4319/lo.1975.20.2.0222>
- Ramos, O., Castro, S., & Laskowski, J. S. (2013). Copper-molybdenum ores flotation in sea water: Floatability and frothability. *Minerals Engineering*, 53, 108–112. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.07.009>
- San Martín, F. (2018). *BIO-DEPRESSION OF PYRITE WITH ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS IN SEAWATER FLOTATION*.
- San Martín, F., Kracht, W., Vargas, T., & Rudolph, M. (2020). Mechanisms of pyrite biodepression with Acidithiobacillus ferrooxidans in seawater flotation. *Minerals Engineering*, 145. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106067>
- 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). <https://doi.org/10.3390/min11101039>

- Suzuki, I., Lee, D., Mackay, B., Harahuc, L., & Key Oh, J. (1999). Effect of Various Ions, pH, and Osmotic Pressure on Oxidation of Elemental Sulfur by *Thiobacillus thiooxidans*. In *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY* (Vol. 65, Issue 11).
- Uribe, L. M., Castro, S., Gutierrez, L., & Laskowski, J. S. (2016). DEPRESSION OF PYRITE BY METABISULFITE AND SULFITE IONS IN SEAWATER AND FRESH WATER. *IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings*, 978–979.
- Valenzuela, N. (2023). *COMPARACIÓN ENTRE LA FLOTACIÓN DE SULFUROS DE COBRE USANDO METABISULFITO DE SODIO Y BACTERIAS ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS COMO DEPRESANTE DE PIRITA EN FLOTACIÓN CON AGUA DE MAR*.
- Wei, Y., Wen-qing, Q., Rui-qiang, L., & Yun-chao, R. (2011). Effect of chloride ion on bacterial pre-oxidation of arsenic-containing gold concentrate. *J. Cent. South Univ. Technol*, 18. <https://doi.org/10.1007/s11771-011-0856-6>
- Wills, B. A. (Barry A., & Finch, J. A. (2016). Chapter 12 - Froth Flotation. In B. A. (Barry A. Wills & J. A. Finch (Eds.), *Wills' Mineral Processing Technology : An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (Eighth Edition, pp. 265–380). Butterworth-Heinemann.