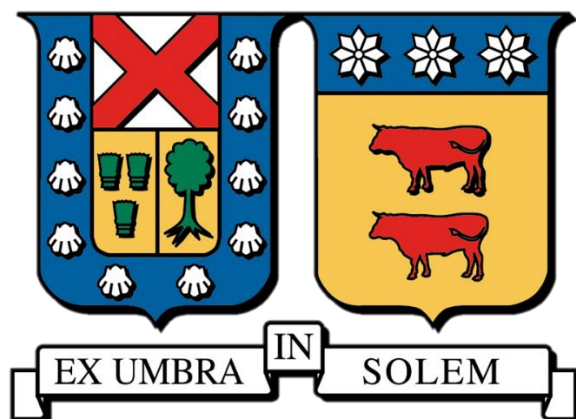


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES
SANTIAGO – CHILE



**OPTIMIZACIÓN DE PARÁMETROS EN BIOFLOTACIÓN DE
SULFUROS DE COBRE EN AGUA DE MAR**

Manuel Alejandro González Cayuhan

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

Profesora guía: **Francisca San Martín R.**

DICIEMBRE, 2024

RESUMEN

La presente memoria tiene como objetivo principal evaluar el efecto de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* en la depresión de pirita en una mezcla de minerales sulfurados reales, optimizando parámetros de flotación en presencia de agua de mar. Los ensayos se realizaron a escala de laboratorio, empleando agua fresca (destilada) y agua de mar (artificial), esta última caracterizada por una concentración de sales inorgánicas, como cloruro de sodio (NaCl), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), que influyen en las interacciones químicas y la estabilidad de las espumas. Las pruebas incluyeron variaciones de pH y dosis de colector xantato isopropílico de sodio (SIPX), con y sin acondicionamiento bacteriano, utilizando una concentración promedio de $2,6 \times 10^7$ bacterias/mL.

Se evaluaron tres dosis de colector (0, 25 y 100 g/t), siendo 25 g/t la más eficiente desde el punto de vista técnico y económico, logrando recuperaciones superiores al 89% de calcopirita con una depresión parcial de pirita, especialmente en agua fresca. El análisis comparativo entre ambos tipos de agua demostró que, en agua de mar, las recuperaciones de calcopirita fueron ligeramente superiores, lo cual se atribuyó a la formación de espumas más estables debido a la acción sinérgica entre las sales y el espumante MIBC. De manera similar, en agua de mar, la flotación de pirita también fue mayor que en agua fresca, explicado por la mayor estabilidad de las espumas generadas bajo estas condiciones.

Los resultados indican que *A. ferrooxidans* no mostró eficacia significativa en la depresión de pirita en sistemas heterogéneos, como los estudiados. La presencia de ganga, como cuarzo e illita, disminuyó la interacción bacteriana con los minerales objetivos, limitando el impacto del bioacondicionamiento. Este comportamiento contrasta con estudios previos realizados en minerales puros, donde bacterias mostraron mayor efectividad.

Índice

Introducción	8
1 Revisión bibliográfica.....	10
1.1 Principios de flotación	10
1.1.1 Reactivos de flotación.....	11
1.2 Uso del recurso hídrico en Chile.....	14
1.3 Consideraciones asociadas al uso de agua de mar en flotación	16
1.4 Microorganismos y el procesamiento de minerales.....	18
1.4.1 Estructura bacteriana.....	19
1.4.2 Adherencia bacteriana a minerales	19
1.5 Estudios de bioflotación.....	20
1.5.1 <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> en agua fresca	20
1.5.2 <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> en agua de mar.....	22
1.5.3 Activación de pirita por iones de cobre	24
2 Materiales y metodología.....	27
2.1 Mineral.....	27
2.2 Selección y preparación de muestras	27
2.3 Análisis granulométrico	28
2.4 Reactivos de flotación.....	29
2.5 Microorganismos	29
2.6 Agua de mar.....	32
2.7 Flotación con agua fresca y agua de mar sin bacterias	34
2.8 Flotación con acondicionamiento bacteriano.....	35
3 Resultados y discusiones.....	38
3.1 Ensayos con y sin acondicionamiento bacteriano en agua fresca y de mar.....	39

3.2	Concentración bacteriana.....	50
3.3	Competencia de adherencia bacteriana en mezclas minerales.....	50
3.4	Comparativa ente agua fresca y agua de mar.....	51
3.5	Dosis óptima de colector.....	51
Conclusiones		54
Recomendaciones		56
Bibliografía		57
Anexos		59

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del agua de mar (Castro S. , 2018).....	17
Tabla 2. Leyes de elementos presentes en el mineral de alimentación usado en ensayos de flotación.	28
Tabla 3. Determinación de P80 para ensayos de flotación a través de método Rosin-Rammler. .	29
Tabla 4. Composición química del medio basal usado en el cultivo de <i>A. ferrooxidans</i>	30
Tabla 5. Formulación para preparar 1 kg de agua de mar artificial con 35 g/L de salinidad (Kester et al. 1967).	33
Tabla 6. Parámetros operacionales usados en los ensayos de flotación de este trabajo.....	36
Tabla 7. Consumo y costo de dosis de colector entre 25 y 100 g/t.	52
Tabla 8. Balance económico en base a la producción adicional de Cu (34,63% contenido de cobre en calcopirita) a pH natural de agua de mar.....	52
Tabla 9. Resumen de resultados para recuperaciones (triplicados) en base a parámetros operacionales.....	59
Tabla 10. Composición mineralógica del mineral usado por Leiva (2022) proveniente del yacimiento Inca de Oro.	61

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una celda de flotación mecánica (Wills & Finch, 2016).	10
Figura 2. Estructura y adsorción del colector; orientación del grupo polar y no polar en el mineral (Wills & Finch, 2016).	11
Figura 3. Clasificación de colectores ionizantes según tipo: catiónico o aniónico (Wills & Finch, 2016).	12
Figura 4. Disposición del espumante en la interfase aire-agua.	13
Figura 5. Reporte consumo hídrico en la minería del cobre 2022 (COCHILCO, 2023).	15
Figura 6. Proyección de uso de agua continental y agua de mar en la minería del cobre (COCHILCO, 2022).	16
Figura 7. Recuperaciones de pirita (a) y calcopirita (b) sin acondicionamiento bacteriano, solo con diferentes concentraciones de colector PIPX (Chandrababha et al., 2004).	21
Figura 8. Recuperaciones de pirita (a) y calcopirita (b), con acondicionamiento bacteriano (15 min) y diferentes concentraciones de colector PIPX (Chandrababha et al., 2004).	22
Figura 9. Efecto de <i>A. ferrooxidans</i> (3×10^8 bacterias/mL) en la recuperación de pirita en agua fresca (a) y de mar (b), con $4,74 \times 10^{-5}$ M de xantato (San Martín et al., 2018).	23
Figura 10. Efecto de <i>A. ferrooxidans</i> en la recuperación de pirita en agua salina (35 g/L NaCl), con $4,74 \times 10^{-5}$ M de xantato (San Martín et al., 2018).	24
Figura 11. Recuperación de pirita sin microorganismos (a) y efecto de <i>A. ferrooxidans</i> (3×10^8 bacterias/mL) sobre pirita (b), acondicionado a diferentes concentraciones de CuSO_4 , en agua fresca. La dosis de colector xantato fue $4,7 \times 10^{-5}$ M (San Martín et al., 2021).	25
Figura 12. Recuperación de pirita sin microorganismos (a) y efecto de <i>A. ferrooxidans</i> (3×10^8 bacterias/mL) sobre pirita (b), acondicionado a diferentes concentraciones de CuSO_4 , en agua de mar. La dosis de colector xantato fue $4,7 \times 10^{-5}$ M (San Martín et al., 2021).	26
Figura 13. Cultivos de <i>A. ferrooxidans</i> . Esquina superior izquierda color típico que indica oxidación del hierro por parte de las bacterias y evidencia actividad metabólica.	31
Figura 14. Distribución porcentual en matraz Erlenmeyer para el cultivo de <i>A. ferrooxidans</i> (400 mL de solución).	31
Figura 15. Vista al microscopio para el recuento bacteriano.	32
Figura 16. Diagrama de flujo proceso flotación en agua fresca y agua de mar.	35

Figura 17. Diagrama de flujo proceso flotación en agua fresca y de mar con acondicionamiento bacteriano.	37
Figura 18. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca cuando dosis de colector SIPX es 0 g/t, con y sin bacterias (acondicionamiento con <i>A. ferrooxidans</i>).	40
Figura 19. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar cuando la dosis de colector SIPX es 0 g/t, con y sin bacterias (acondicionamiento con <i>A. ferrooxidans</i>).	41
Figura 20. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca cuando la dosis de colector SIPX es 25 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.	44
Figura 21. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar, cuando la dosis de colector SIPX es 25 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.	45
Figura 22. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca, cuando la dosis de colector SIPX es 100 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.	48
Figura 23. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar, cuando dosis de colector SIPX es 100 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.	49

Introducción

La minería del cobre es una de las actividades económicas más importantes en Chile, representando una fuente significativa de ingresos y desarrollo tecnológico. Sin embargo, el proceso de extracción y procesamiento de minerales enfrenta desafíos cada vez mayores, como la disminución de las leyes minerales, el agotamiento de los recursos hídricos frescos y el impacto ambiental asociado al uso intensivo de reactivos químicos. Estos factores han incentivado la búsqueda de alternativas más sostenibles y eficaces en el procesamiento de minerales.

En este contexto, la bioflotación ha surgido como una tecnología innovadora que utiliza microorganismos para modificar selectivamente las superficies minerales, mejorando la eficiencia del proceso de flotación. Dentro de este campo, *Acidithiobacillus ferrooxidans* se ha destacado por su capacidad para modificar propiedades superficiales de los sulfuros, generando condiciones favorables para la depresión de minerales no deseados, como la pirita. A pesar de los avances en sistemas controlados con minerales puros, su aplicación en mezclas heterogéneas, como las provenientes directamente de yacimientos mineros, sigue siendo un desafío.

Por otra parte, el uso de agua de mar se presenta como una alternativa viable al agua fresca en regiones del norte de Chile, donde la disponibilidad de este recurso es limitada. No obstante, el empleo de agua de mar introduce nuevas variables al proceso de flotación, como la presencia de sales inorgánicas que afectan la estabilidad de las espumas y las interacciones entre reactivos y las superficies minerales.

El presente trabajo busca contribuir al conocimiento sobre la bioflotación en condiciones reales, evaluando el desempeño de *A. ferrooxidans* en la depresión selectiva de pirita en mezclas de minerales reales sulfurados de cobre, utilizando agua de mar como medio de flotación. Este enfoque permite explorar el impacto de los microorganismos en sistemas heterogéneos, optimizar los parámetros operativos y evaluar la recuperación selectiva de calcopirita y pirita en distintas condiciones experimentales.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* para deprimir pirita en una mezcla de minerales reales, optimizando parámetros de flotación en presencia de agua de mar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar el efecto depresor de bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* en pirita.
- Analizar la recuperación metalúrgica de calcopirita y pirita en una mezcla de minerales.
- Comparar el desempeño de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* en flotación con agua dulce y agua de mar.
- Optimizar la dosis de colector en flotación.

1 Revisión bibliográfica

1.1 Principios de flotación

La flotación de minerales es un proceso fisicoquímico ampliamente utilizado en la industria minera para separar selectivamente minerales valiosos de la ganga o minerales no deseados. En el caso de Chile, donde la minería es clave para la economía, la flotación de minerales sulfurados es de particular relevancia debido a la abundancia de especies como la calcopirita y bornita (sulfuros de cobre y hierro), así como la molibdenita (sulfuro de molibdeno).

El sistema de flotación es trifásico, ya que en él coexisten especies sólidas, líquidas y gaseosas. Este proceso se basa en la adhesión de partículas sólidas a burbujas de aire, lo que ocurre debido a las propiedades hidrofóbicas de ciertos minerales. Cuando las partículas están suspendidas en la pulpa, se adhieren a las burbujas y estas ascienden hacia una nueva fase denominada espuma. La espuma, que está formada por burbujas cargadas de partículas hidrofóbicas, es recolectada como concentrado, el producto final del proceso. Por otro lado, el material que no se recupera durante la flotación se denomina relave o cola.

Este proceso se lleva a cabo en una celda de flotación mecánica como la que se muestra en Figura 1. Se inyecta aire mientras un agitador genera turbulencia en la pulpa, facilitando la colisión entre burbujas y partículas. De este modo, se promueve que los minerales hidrofóbicos se adhieran a las burbujas y sean transportados a la fase de espuma para su posterior recuperación.

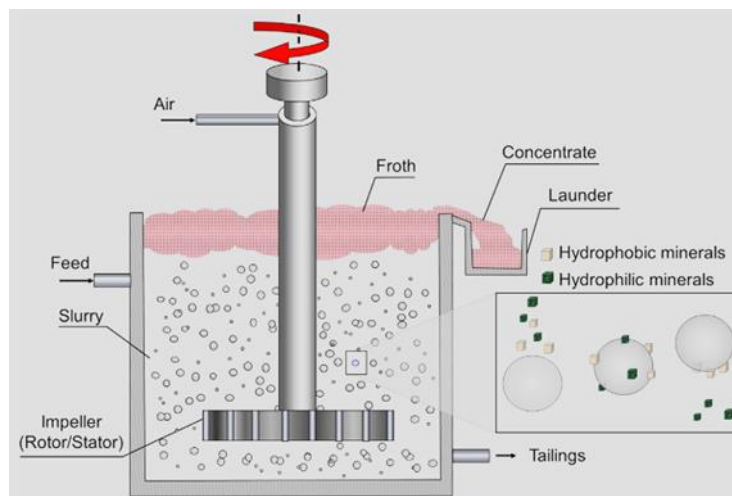


Figura 1. Esquema de una celda de flotación mecánica (Wills & Finch, 2016).

La hidrofobicidad del mineral juega un papel crucial en el éxito de la flotación de minerales sulfurados. Existen, por un lado, minerales hidrofóbicos y, por otro, minerales hidrofílicos. En la flotación directa se recupera el mineral valioso en la fase de espuma (concentrado) y el resto se descarta como relave, mientras que, en la flotación inversa, se flota la ganga y el valioso queda en la celda. La hidrofobicidad puede ser natural o inducida mediante la aplicación de reactivos químicos (Wills & Finch, 2016).

Se emplean reactivos químicos para mejorar la eficiencia del proceso, ya que la cantidad de especies con alta flotabilidad es limitada. Entre estos reactivos se encuentran los colectores, espumantes, modificadores y reguladores de pH.

1.1.1 Reactivos de flotación

Los colectores son sustancias orgánicas que proporcionan propiedades hidrofóbicas a la superficie de los minerales. Estos pueden ser iónicos o no iónicos. Los colectores poseen una estructura heteropolar compuesta por un hidrocarburo, con un extremo polar y otro apolar. El extremo polar se adhiere a la superficie hidrofílica del mineral, mientras que el extremo apolar queda libre y se orienta hacia la fase líquida, sin interactuar con ella. Esto transforma la superficie del sólido en hidrofóbica (ver Figura 2).

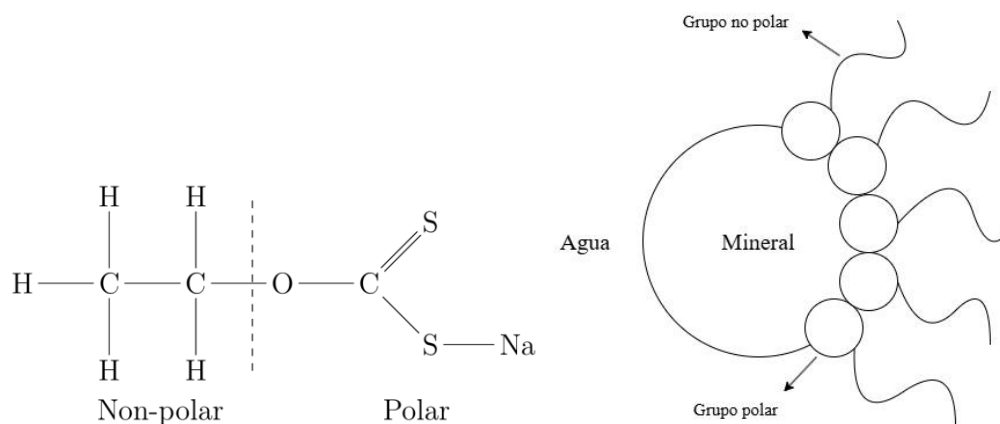


Figura 2. Estructura y adsorción del colector; orientación del grupo polar y no polar en el mineral (Wills & Finch, 2016).

Los colectores se clasifican según el tipo de carga que adquieren al disolverse en agua, existiendo los tipos catiónicos y aniónicos. Un ejemplo de colector aniónico es el xantato isopropílico de

sodio, que se disocia en un catión de sodio y un anión que contiene el resto de la cadena de hidrocarburo.

Los xantatos son los colectores más importantes en la industria de flotación de minerales sulfurados, debido a su bajo costo y alta eficiencia colectora. Los más utilizados de este grupo incluyen el xantato etil, isobutil, amil y hexil. Estos son selectivos para minerales sulfurados en comparación con los minerales de ganga no sulfurada, ya que forman precipitados insolubles con metales base como Cu, Ni, Pb y Zn, pero no con elementos como Si, Ca y Mg. En Figura 3 se observa un esquema de la clasificación de colectores.

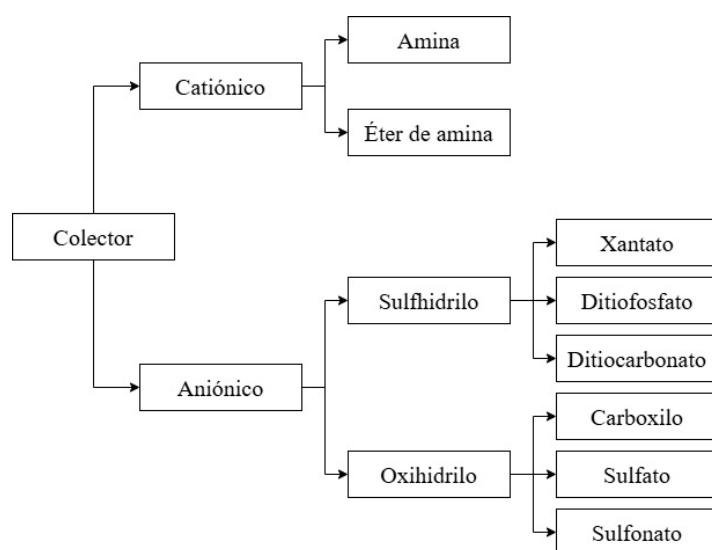


Figura 3. *Clasificación de colectores ionizantes según tipo: catiónico o aniónico (Wills & Finch, 2016).*

Los colectores deben emplearse en cantidades óptimas, suficientes para formar una capa monomolecular en la superficie de las partículas (Wills & Finch, 2016). Un exceso de colector puede provocar la formación de hemimicelas, que son agregados en la superficie del mineral. Esto aumenta el riesgo de que floten minerales sin interés económico, reduciendo o incluso perdiendo la selectividad del proceso.

Los espumantes tienen la función de generar y mantener una espuma estable en la superficie de la celda de flotación, donde se separan los minerales valiosos de los no deseados. Estos reactivos son moléculas heteropolaes, compuestas por un grupo hidrofílico (generalmente un hidroxilo) que interactúa con la interfase aire – agua, y un grupo hidrofóbico, constituido por una cadena de

hidrocarburos, que se orienta hacia la fase de aire y se mantiene en contacto con esta en el interior de la burbuja (Figura 4).

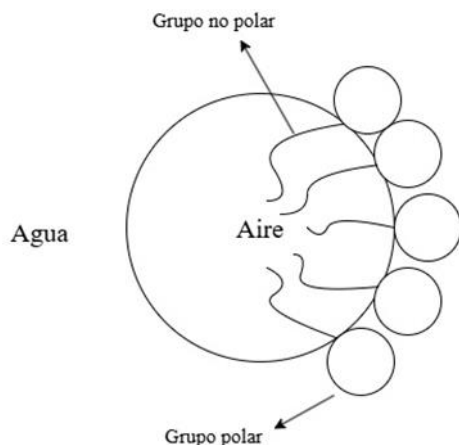


Figura 4. *Disposición del espumante en la interfase aire-agua.*

Entre las principales funciones de los espumantes se pueden mencionar tres (Wills & Finch, 2016):

1. Ayudan en la formación y preservación de burbujas pequeñas, lo que incrementa el número y la superficie total de burbujas, favoreciendo la tasa de colisión con las partículas.
2. Reducen la velocidad de ascenso de las burbujas, lo que incrementa el tiempo de residencia de estas en la pulpa y, en consecuencia, aumenta el número de colisiones con las partículas.
3. Contribuyen a la estabilidad de la espuma, ya que impiden que las burbujas estallen al llegar a la superficie de la pulpa, permitiendo que las partículas colectadas rebalsen como producto de la flotación.

Entre los espumantes comerciales más comunes utilizados en la industria se encuentran los alcoholes, como el metil isobutil carbinol (MIBC), y los poliglicoles, como el DF250.

Otro grupo importante en este proceso son los reguladores o modificadores (Wills & Finch, 2016). Estos ajustan la acción del colector, intensificando o reduciendo su efecto hidrofóbico en la superficie del mineral. Dentro de esta categoría se encuentran los activadores, depresores y modificadores de pH.

Los activadores alteran la naturaleza química superficial del mineral para permitir que este reaccione con el colector y se vuelva hidrofóbico. Por lo general, son sales inorgánicas solubles que se ionizan en solución, siendo los iones los que reaccionan con la superficie del mineral. En

algunas ocasiones, puede ocurrir una activación accidental de minerales, lo que perjudica la selectividad del proceso. Un ejemplo de esto es la flotación de sulfuros de cobre, donde la pirita puede ser activada por iones de Cu^{2+} disueltos (Mu & Peng, 2019).

En cuanto a los depresores, estos se utilizan para aumentar la selectividad del proceso de flotación al convertir ciertos minerales en hidrofílicos, evitando que lleguen a la superficie y floten. Este efecto puede lograrse a través de tres mecanismos principales, los cuales pueden actuar de manera individual o combinada: previniendo la acción del colector, eliminando las especies activadoras (desactivación) y removiendo los colectores adsorbidos en la superficie del mineral.

La cal es el depresor más utilizado en la flotación de minerales sulfurados de cobre, ya que deprime la pirita y la arsenopirita. Los iones hidroxilo y calcio participan en este efecto depresivo mediante la formación de películas mixtas de $\text{Fe}(\text{OH})$, $\text{FeO}(\text{OH})$, CaSO_4 y CaCO_3 en la superficie del mineral, lo que reduce la adsorción de xantato. La cal tiene poco efecto sobre minerales de cobre.

1.2 Uso del recurso hídrico en Chile

La minería enfrenta uno de sus desafíos más críticos: la gestión sostenible del recurso hídrico, especialmente en las zonas norte y central, donde la escasez de agua se ha intensificado debido a factores climáticos y al aumento de la demanda. Esta situación ha impulsado a las empresas mineras a buscar alternativas más sostenibles para garantizar el suministro de agua necesario para sus operaciones.

Según el último reporte de COCHILCO (COCHILCO, 2023), sobre el uso de agua en la minería del cobre, en 2022 el 73,9% del agua utilizada provino de fuentes recuperadas, como agua recirculada, de reúso o reciclada. El 17,2% fue agua continental y 8,9% agua de mar (Figura 5). La minería del cobre utilizó un total de 18,07 m^3/s de agua, de los cuales el proceso de concentración de minerales sulfurados representó el 76,2% del consumo total. Se espera que este consumo continúe en aumento debido a la mayor demanda del proceso metalúrgico.

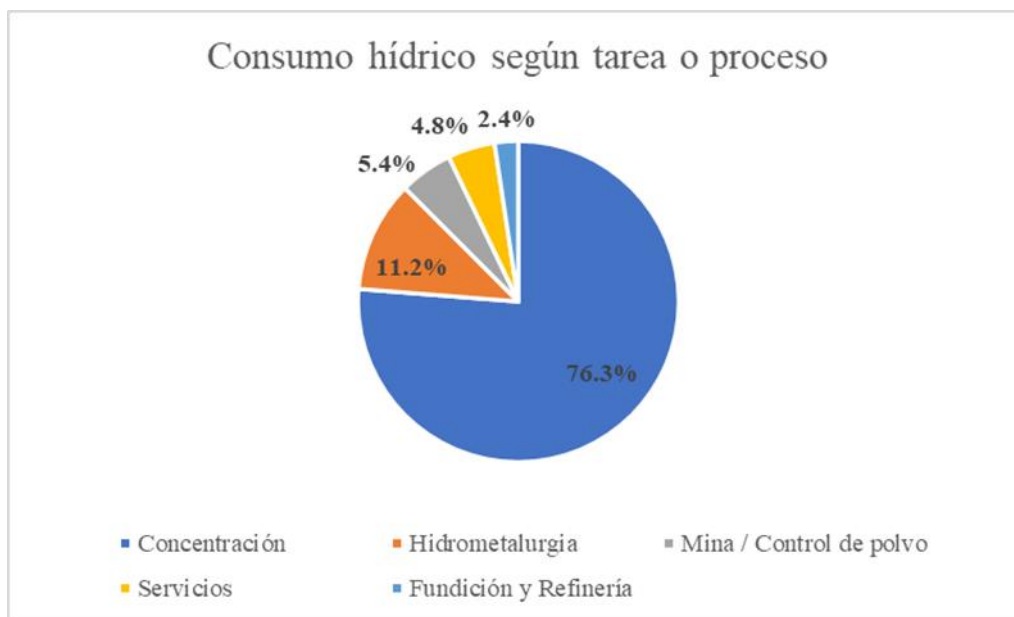


Figura 5. *Reporte consumo hídrico en la minería del cobre 2022 (COCHILCO, 2023).*

En el reporte de COCHILCO (COCHILCO, 2022) se proyecta que la demanda de agua para la minería del cobre alcanzará 21,4 m³/s a nivel nacional para el año 2033, con una tasa de crecimiento anual del 2%. Este crecimiento se debe, en parte, a la transición hacia la explotación de minerales sulfurados, los cuales requieren procesos de flotación para su tratamiento. Otro factor clave es la disminución de las leyes de los minerales, lo que implica un mayor uso de agua para obtener una tonelada de cobre fino, dado que es necesario procesar un mayor volumen de mineral.

En los últimos años, la industria ha promovido el uso de agua de mar por sobre agua continental en sus operaciones. Aunque en 2022 el uso de agua continental superaba al de agua de mar, las proyecciones muestran un cambio. Según COCHILCO (COCHILCO, 2023), en 2022 se utilizaron 11,92 m³/s de agua continental y 6,15 m³/s de agua de mar. Para 2033, se proyecta que el uso de agua continental descenderá a 6,15 m³/s, mientras que el uso de agua de mar aumentará a 15,28 m³/s. La Figura 6 muestra esta tendencia.

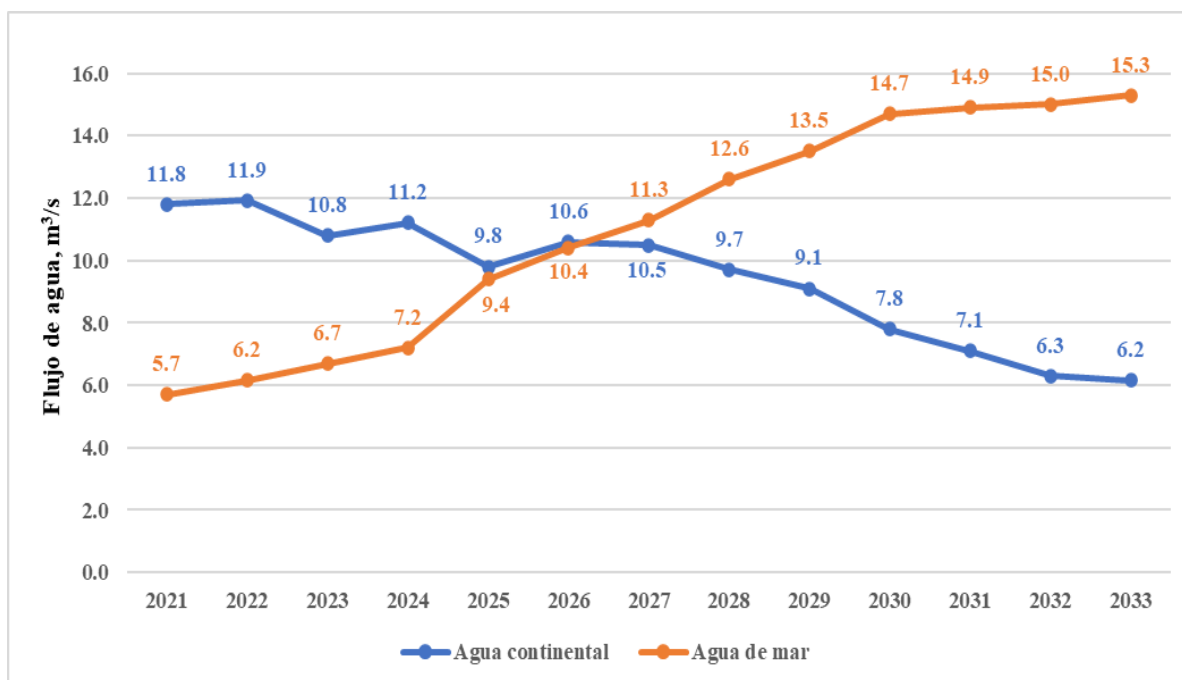


Figura 6. *Proyección de uso de agua continental y agua de mar en la minería del cobre (COCHILCO, 2022).*

1.3 Consideraciones asociadas al uso de agua de mar en flotación

El uso de agua de mar representa una alternativa al agua fresca en los procesos de flotación. Sin embargo, es necesario tener en cuenta diversas consideraciones asociadas a su composición y efectos en la flotación de minerales.

El agua de mar se caracteriza por su alta salinidad, con 35 g/L o 0,55 M de NaCl, además de la presencia de otros iones como sulfatos, magnesio, calcio y sodio, que contribuyen a sus propiedades químicas, como se muestra en la Tabla 1. Esta salinidad tiene varios efectos en el proceso de flotación: por un lado, incrementa la conductividad del agua, lo que puede promover interacciones galvánicas entre minerales como la calcopirita y la pirita; por otro lado, reduce la concentración de oxígeno disuelto, lo que, junto con el bajo potencial redox, favorece la activación de la pirita en presencia de cobre disuelto (Mu & Peng, 2019).

Tabla 1. *Composición química del agua de mar (Castro S. , 2018).*

Iones	Concentración (mg/kg)	Partes de salinidad (%)
Cloruro (Cl^-)	19,345	55,03
Sodio (Na^+)	10,752	30,59
Sulfato (SO_4^{2-})	2,701	7,68
Magnesio (Mg^{2+})	1,295	3,68
Calcio (Ca^{2+})	416	1,18
Potasio (K^+)	390	1,11
Bicarbonato (HCO_3^-)	145	0,41
Bromuro (Br^-)	66	0,19
Borato (BO_3^{3-})	27	0,08
Estroncio (Sr^{2+})	13	0,04
Fluoruro (F^-)	1	0,003

En los procesos de flotación que emplean agua de mar, el consumo de cal aumenta significativamente debido a su efecto buffer, que es controlado por la relación entre los iones carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-). La cal es ampliamente utilizada para depresar la pirita y regular el pH en los circuitos de flotación, pero en agua de mar, es necesario adicionar grandes cantidades, hasta 10 veces más, para alcanzar un pH de 11 (Castro, 2012). Es importante considerar que el pH natural del agua de mar oscila entre 7,8 y 8,2.

Estudios demuestran que la salinidad afecta la flotabilidad de minerales como la pirita y la calcopirita. Se ha demostrado que la mayor recuperación de pirita en agua de mar, en comparación con agua fresca, se debe a la activación más intensa por los iones de cobre disueltos (Mu & Peng, 2019). La alta conductividad del agua de mar favorece la oxidación de la calcopirita, liberando más iones de cobre que activan la pirita. Además, se ha demostrado que la salinidad contribuye a la formación de burbujas más pequeñas y estables, lo que mejora la eficiencia de flotación, pero también aumenta el arrastre mecánico de la pirita.

Otro aspecto relevante es la inhibición de la coalescencia y la reducción del tamaño de las burbujas debido a la presencia de sales inorgánicas como KCl, NaCl, Na_2SO_4 , MgCl_2 y CaCl_2 , lo que

contribuye a la formación de espumas más estables (Hirajima, et al., 2016; Mu & Peng, 2019; Wang & Peng, 2014). Estudios han demostrado que se pueden obtener burbujas finas en agua de mar, incluso sin la adición de espumantes (Castro et al., 2013). Cuando se añade espumante, se logra un efecto sinérgico en la formación de espuma.

Por último, los iones Mg^{2+} y Ca^{2+} presentes en el agua de mar afectan la flotabilidad de la calcopirita y molibdenita, especialmente cuando el pH es superior a 9. En estas condiciones, los compuestos $CaCl_2$ y $MgCl_2$ forman precipitados de $Mg(OH)_2$ y $CaCO_3$ en la superficie de los minerales, lo que reduce su hidrofobicidad y, en consecuencia, disminuye su recuperación (Hirajima, et al., 2016).

1.4 Microorganismos y el procesamiento de minerales

El uso de microorganismos en el procesamiento de minerales ha sido ampliamente investigado, especialmente en aplicaciones como la lixiviación y, más recientemente, la flotación. En la bioflotación, los microorganismos modifican las propiedades superficiales de los minerales para facilitar su separación. Aunque su uso a nivel industrial aún es limitado, los estudios de laboratorio han demostrado que bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* pueden ser altamente efectivas en este proceso (Chandrababha et al., 2004; San Martín et al., 2018; San Martín et al., 2021).

El mecanismo de acción de los microorganismos en la bioflotación se puede dar de tres maneras principales:

- Oxidación de la superficie del mineral por los microorganismos.
- Adhesión de células microbianas a la superficie mineral.
- Interacción de la superficie mineral con sustancias metabólicas producidas por los microorganismos.

Las bacterias que oxidan compuestos de hierro y azufre, como *A. ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, son acidófilas y aeróbicas, y obtienen energía mediante la oxidación de compuestos inorgánicos (Donati & Sand, 2007). El presente estudio se centra en *A. ferrooxidans*, debido a los múltiples estudios que han demostrado su capacidad para modificar las superficies minerales y su potencial en bioflotación.

1.4.1 Estructura bacteriana

Las bacterias se dividen en gram-positivas y gram-negativas según la estructura de su pared celular. *Acidithiobacillus ferrooxidans* es una bacteria gram-negativa, caracterizada por una pared celular compuesta de una capa delgada de peptidoglicano y una membrana externa rica en lipopolisacáridos (LPS). Los LPS son fundamentales para la adherencia de las bacterias a las superficies minerales y juegan un papel clave en la bioflotación (Donati & Sand, 2007).

Las bacterias gram-negativas, como *A. ferrooxidans*, tienen una membrana externa que contiene lipoproteínas y peptidoglicanos, que otorgan fuerza mecánica a la célula. Además, los LPS permiten la interacción con minerales mediante la captura de iones en la superficie mineral, lo que afecta directamente su flotabilidad.

1.4.2 Adherencia bacteriana a minerales

Una característica distintiva de los microorganismos es su capacidad para adherirse preferentemente a superficies sólidas en lugar de permanecer en suspensión, lo que facilita el acceso a nutrientes y ofrece mayor protección en condiciones ambientales adversas. Al colonizar estas superficies, las bacterias desarrollan biopelículas, comunidades organizadas de células bacterianas rodeadas por una matriz extracelular que se adhiere a una superficie sólida. En este entorno, los microorganismos están inmersos en una matriz de sustancias poliméricas extracelulares (LPS) de producción propia, que constituye su entorno inmediato. Esta matriz, compuesta principalmente por polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos y lípidos, proporciona estabilidad mecánica a la biopelícula, facilita su adhesión a diversas superficies, y forma una red tridimensional cohesiva que interconecta y retiene temporalmente a las células bacterianas en la biopelícula (Flemming & Wingender, 2010).

Estudios han demostrado que los lipopolisacáridos (LPS), desempeñan un papel en la adhesión de *A. ferrooxidans* (y otros microorganismos) a los minerales, al modificar propiedades superficiales como la carga y la hidrofobicidad. Estos LPS no solo facilitan la adsorción bacteriana mediante captura de iones estructurales o cercanos a la superficie, sino que también pueden formar enlaces químicos con el mineral, promoviendo reacciones químicas asociadas a la nutrición o respiración bacteriana (Donati & Sand, 2007). Además, se ha reportado que los LPS pueden liberarse de las células bacterianas cuando estas son sometidas a condiciones de pH más altas (6,5 a 8), mientras

que no se producen en medios ácidos, como a pH 1,5. Por último, la interacción entre las sustancias poliméricas extracelulares de las bacterias, como los LPS, y la pirita, genera una capa superficial más hidrófila que reduce su flotabilidad, favoreciendo su depresión en procesos de flotación (Bagdigian & Myerson, 1986).

1.5 Estudios de bioflotación

La bioflotación es una técnica emergente en el procesamiento de minerales que utiliza microorganismos para modificar las propiedades superficiales de los minerales y facilitar su separación. A diferencia de los reactivos químicos convencionales, los microorganismos, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, ofrecen una alternativa más sostenible y menos contaminante. Esta técnica ha demostrado ser efectiva en la depresión de minerales no deseados, como la pirita, mejorando la selectividad del proceso de flotación.

Diversos estudios han investigado la efectividad de los microorganismos en bioflotación, especialmente *A. ferrooxidans*, que ha sido ampliamente utilizada. Investigaciones como las de Chandrababha et al. (2004) y San Martín et al. (2018) han demostrado cómo el uso de estas bacterias puede disminuir la flotación de la pirita, particularmente en ambientes de pH controlado, cuando se trabaja con mineral puro.

1.5.1 *Acidithiobacillus ferrooxidans* en agua fresca

Chandrababha et al. (2004) realizaron un estudio pionero sobre el uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en la flotación de sulfuros, calcopirita y pirita pura (por separados), en condiciones de agua fresca, utilizando la técnica de biomodulación. La investigación mostró que el bioacondicionamiento con *A. ferrooxidans* reduce la flotabilidad de la pirita. Este cambio en la pirita se debe a la adhesión de las células bacterianas, lo cual altera las propiedades electrocinéticas y la carga superficial del mineral. Como resultado, se forma una capa protectora en la superficie de la pirita que limita la adsorción del colector, logrando así que la pirita quede deprimida, mientras que la calcopirita mantiene su flotabilidad debido a una menor adsorción de bacterias. Las Figuras 7 y 8 muestran el efecto de la bacteria *A. ferrooxidans* en la recuperación de pirita y calcopirita.

Para estos ensayos de micro flotación, se utilizó isopropil xantato de potasio (PIPX) como colector, siguiendo un procedimiento de bioacondicionamiento de 10 minutos con *A. ferrooxidans* a un pH 3-3,5, y un posterior acondicionamiento adicional con el colector, a 1 g de mineral puro. Los

resultados indicaron que la pirita muestra mayor flotabilidad en condiciones ácidas ($\text{pH} < 4$), pero su recuperación disminuye drásticamente cuando el pH aumenta, mientras que la calcopirita mantiene una recuperación estable en un amplio rango de pH. Las bacterias mostraron una afinidad significativa por la superficie de la pirita, atribuida a la presencia de proteínas específicas como la “aporrusticianina”, que actúan como receptores para la adhesión inicial. Este proceso modifica la química superficial del mineral, haciéndolo más hidrofílico y reduciendo su flotabilidad. Por el contrario, la interacción bacteriana con calcopirita es menos efectiva debido a la formación de especies de xantato de cobre (I), que son altamente hidrofóbicas y fuertemente quimiosorbidas en la superficie del mineral. Este avance representa un método alternativo y ambientalmente benigno para la recuperación selectiva de sulfuros, mejorando la flotabilidad de la calcopirita en un entorno controlado y reduciendo la recuperación de pirita.

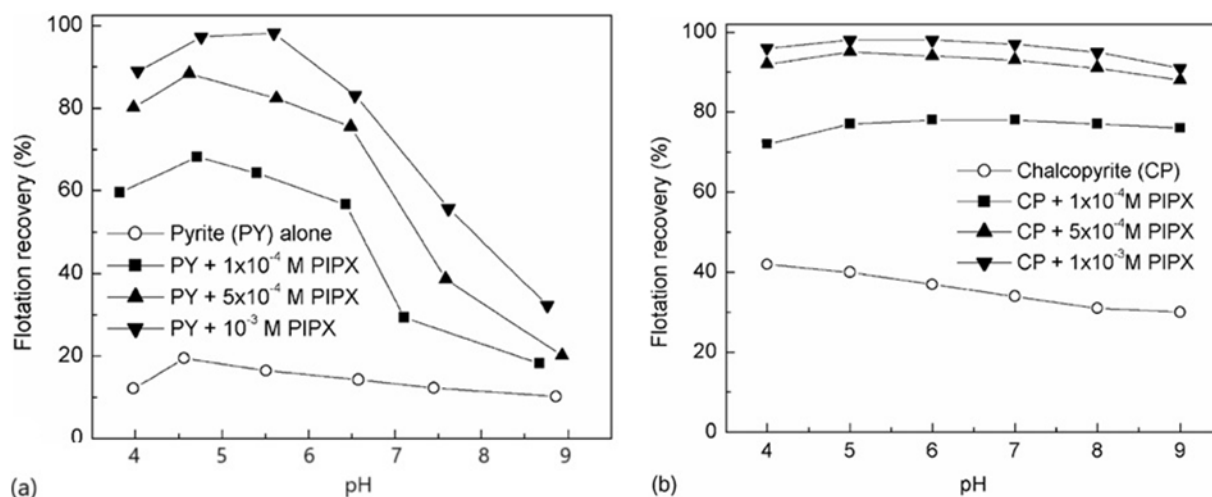


Figura 7. Recuperaciones de pirita (a) y calcopirita (b) sin acondicionamiento bacteriano, solo con diferentes concentraciones de colector PIPX (Chandraprabha et al., 2004).

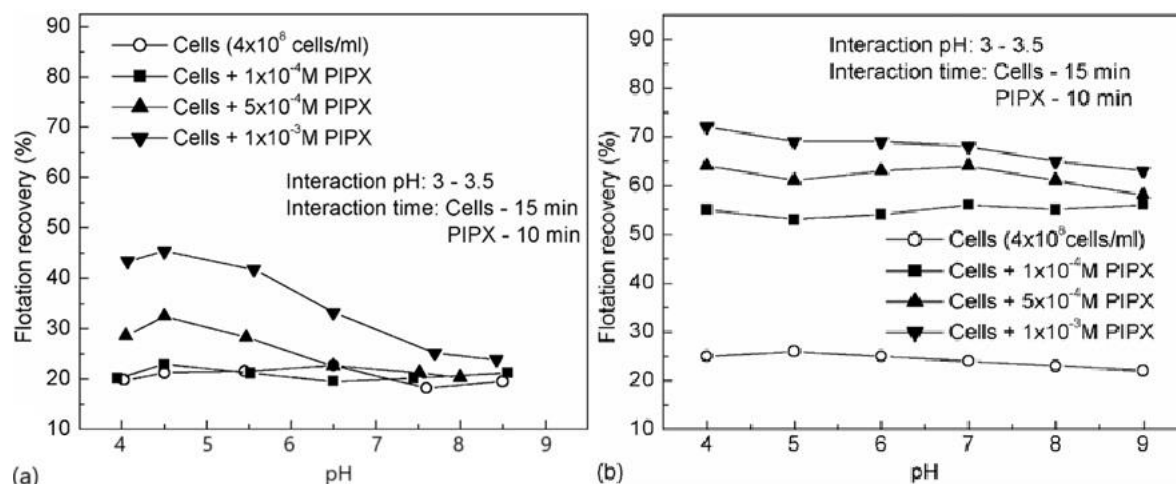


Figura 8. Recuperaciones de pirita (a) y calcopirita (b), con acondicionamiento bacteriano (15 min) y diferentes concentraciones de colector PIPX (Chandraprabha et al., 2004).

1.5.2 *Acidithiobacillus ferrooxidans* en agua de mar

San Martín et al. (2018) ampliaron el alcance de este trabajo al investigar la bioflotación en condiciones de agua salina y de mar, adaptando la técnica de bioflotación a escenarios donde el recurso hídrico fresco es limitado. Esta adaptación es especialmente relevante para zonas costeras o con restricciones de agua dulce, donde el uso de agua de mar en minería es una alternativa cada vez más común. En su estudio, observaron que en condiciones salinas y de agua de mar, la capacidad de *A. ferrooxidans* para deprimir la pirita también existe, aunque con ciertas diferencias debido a la mayor concentración de iones presentes en el agua de mar, como Na^+ , Cl^- y Mg^{2+} . Las Figuras 9 y 10, muestran el comportamiento observado en este estudio.

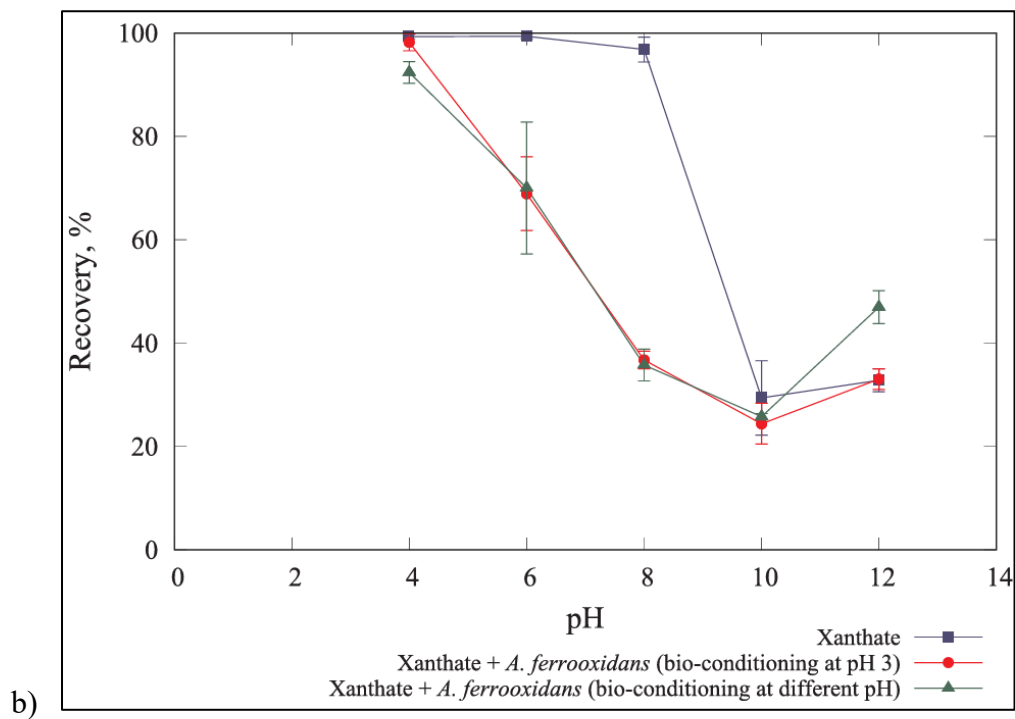
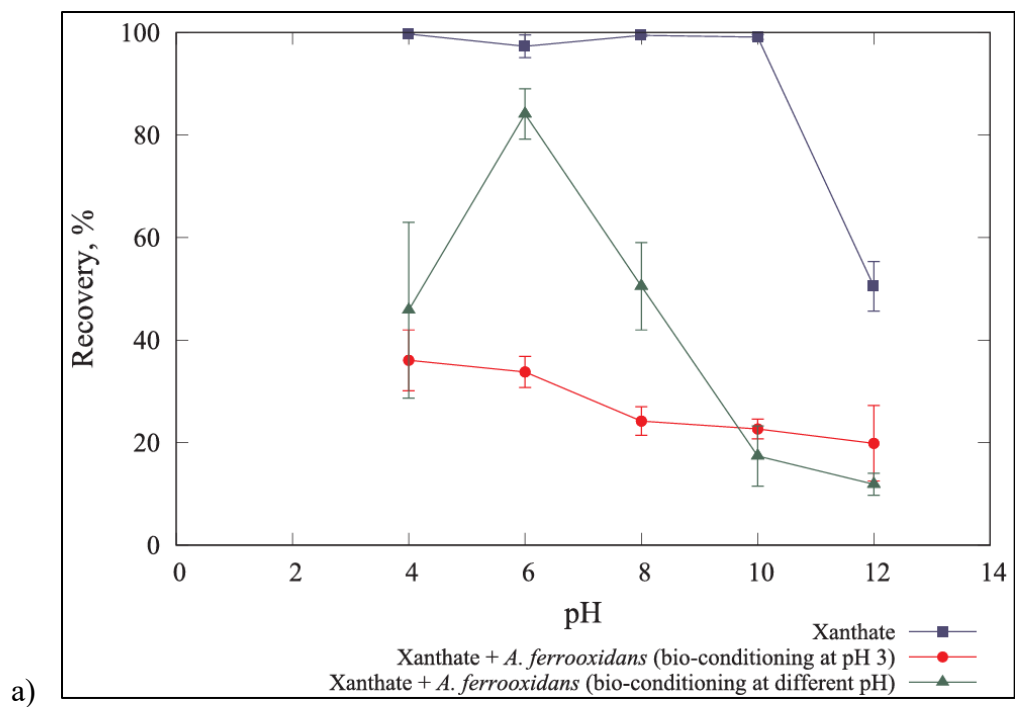


Figura 9. Efecto de *A. ferrooxidans* (3×10^8 bacterias/mL) en la recuperación de pirita en agua fresca (a) y de mar (b), con $4,74 \times 10^{-5} M$ de xantato (San Martín et al., 2018).

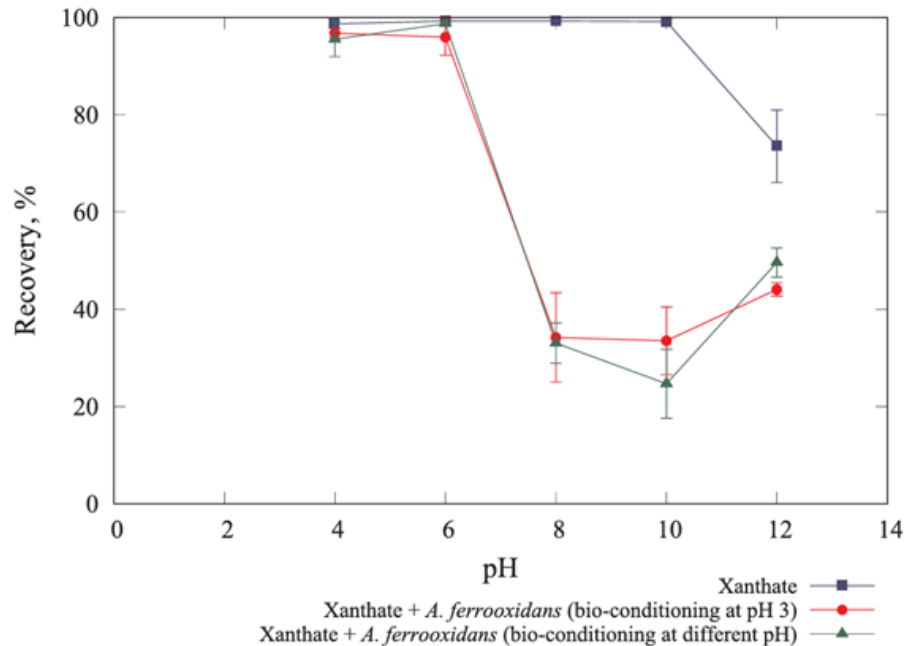


Figura 10. Efecto de *A. ferrooxidans* en la recuperación de pirita en agua salina (35 g/L NaCl), con $4,74 \times 10^{-5} M$ de xantato (San Martín et al., 2018).

1.5.3 Activación de pirita por iones de cobre

San Martín et al. (2021) investigaron el fenómeno de activación de la pirita por iones de cobre, un desafío clave en la flotación selectiva, especialmente en condiciones de agua de mar. La activación de la pirita ocurre cuando los iones de cobre se adsorben en su superficie, aumentando su hidrofobicidad al facilitar la reacción con colectores como los xantatos. Este efecto incrementa la flotabilidad de la pirita, lo que provoca que se recupere junto a los minerales valiosos en el concentrado y disminuye la selectividad del proceso.

En el estudio, San Martín et al. (2021) observaron que, en agua de mar, la activación de la pirita por cobre es menos eficiente debido a la presencia de cationes como el calcio y el magnesio, que compiten por la adsorción en la superficie de la pirita. Sin embargo, se evidenció que, en agua de mar, la pirita activada por cobre mantiene una alta recuperación, lo cual refuerza la necesidad de emplear agentes depresores eficaces como *Acidithiobacillus ferrooxidans* para mitigar este efecto.

En sus experimentos, San Martín et al. (2021) demostraron que el uso de *A. ferrooxidans* fue altamente efectivo para reducir la recuperación de pirita activada en distintos rangos de pH. En condiciones de agua fresca, la bacteria logró disminuir la flotabilidad de la pirita activada en un

amplio rango de pH (4-12), como se observa en Figura 11, mientras que, en agua de mar, los resultados más efectivos se obtuvieron en pH 8 y 10, como se observa en Figura 12. La bacteria redujo la recuperación de pirita activada con $2,5 \cdot 10^{-5}$ M de CuSO_4 de un 95% a un 32%, y con una concentración mayor de $5 \cdot 10^{-5}$ M, la recuperación bajó al 50%.

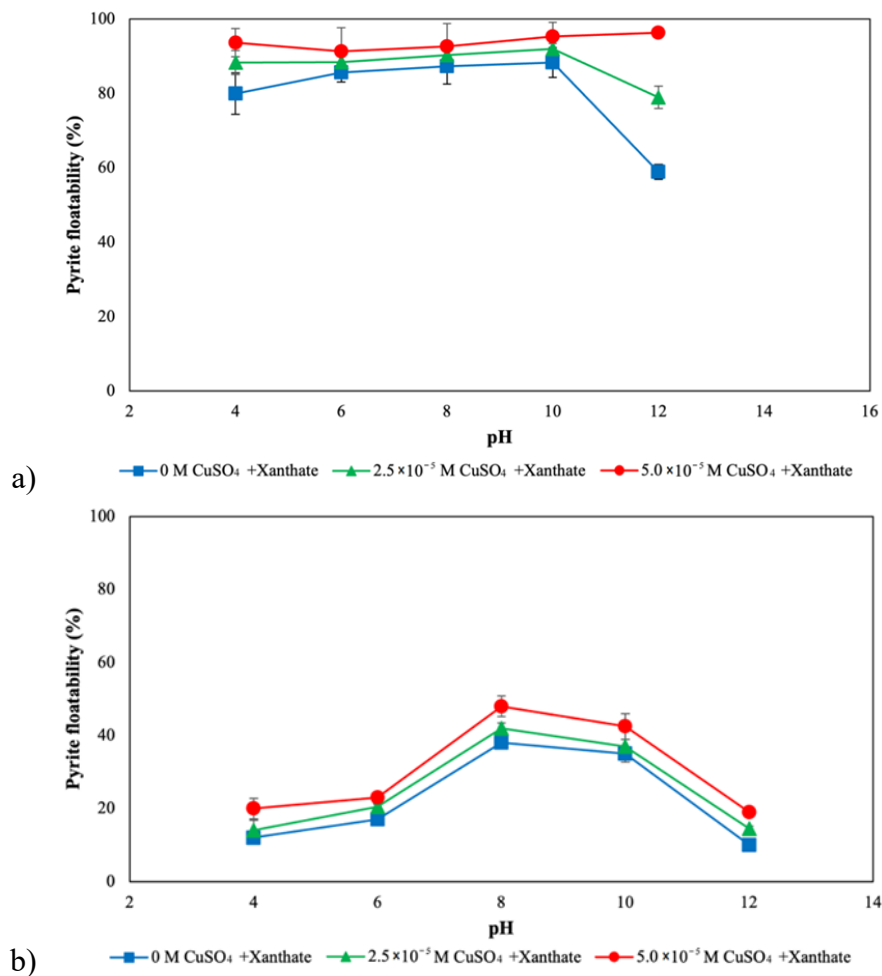


Figura 11. Recuperación de pirita sin microorganismos (a) y efecto de *A. ferrooxidans* (3×10^8 bacterias/mL) sobre pirita (b), acondicionado a diferentes concentraciones de CuSO_4 , en agua fresca. La dosis de colector xantato fue $4,7 \times 10^{-5}$ M (San Martín et al., 2021).

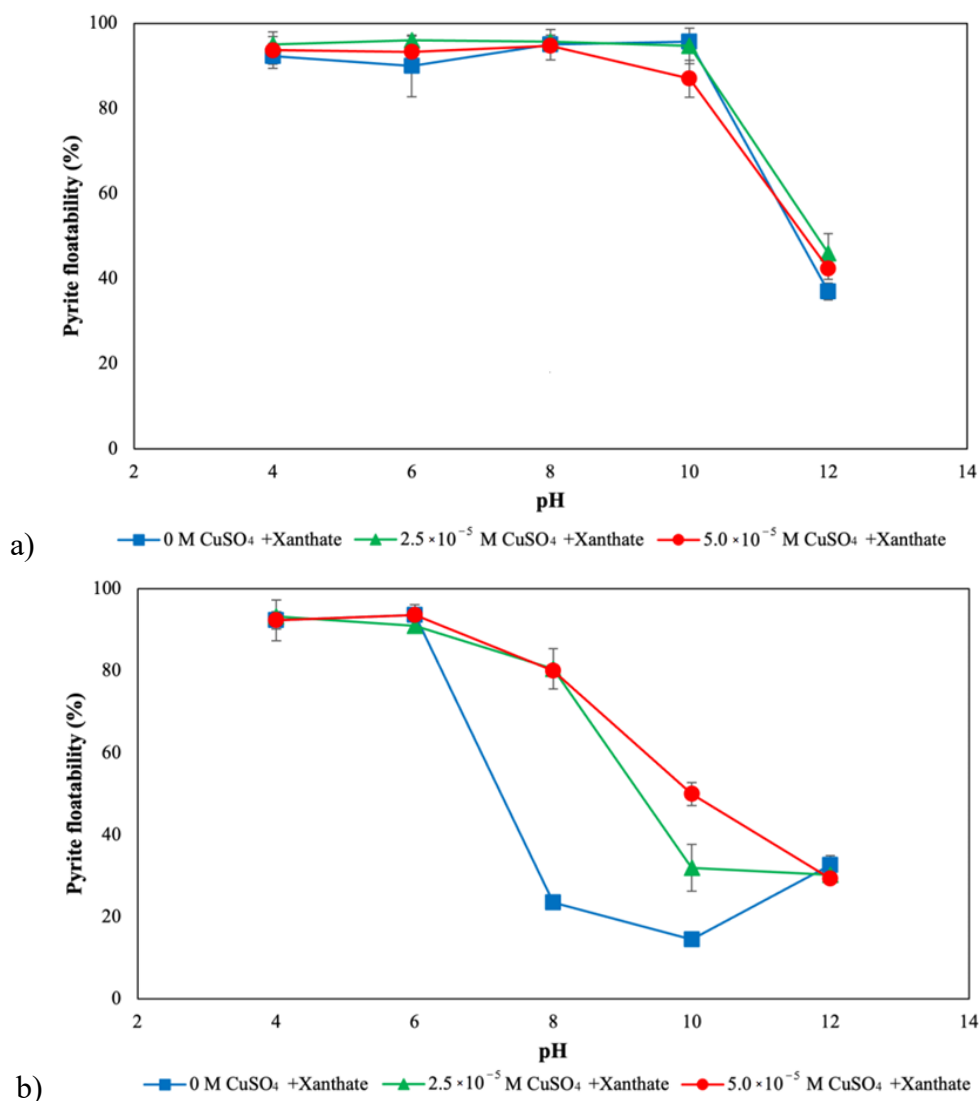


Figura 12. Recuperación de pirita sin microorganismos (a) y efecto de *A. ferrooxidans* (3×10^8 bacterias/mL) sobre pirita (b), acondicionado a diferentes concentraciones de CuSO₄, en agua de mar. La dosis de colector xantato fue $4,7 \times 10^{-5} M$ (San Martín et al., 2021).

Estos resultados son significativos para la bioflotación en ambientes salinos, ya que demuestran que *A. ferrooxidans* no solo reduce la hidrofobicidad de la pirita activada por cobre, sino que también mejora la selectividad del proceso de flotación en presencia de agua de mar.

2 Materiales y metodología

2.1 Mineral

La muestra de mineral utilizada fue proporcionada por la mina Inca de Oro, ubicada en la comuna de Diego de Almagro, región de Atacama, Chile. El material fue sometido a un proceso de chancado y molienda para reducir su tamaño. El chancador empleado fue un equipo de tipo mandíbula, marca Labtech Hebro, serie 0405M-15, que reduce el tamaño de las rocas de aproximadamente 4" a un 85% bajo malla #10 (1,7 mm). Posteriormente, el material fue molido en un molino de bolas, también de la marca Labtech Hebro, modelo MB-316, serie 5502M00-15, fabricado en acero inoxidable AISI 316, de 8" de diámetro y 11" de altura, con bolas de acero estándar de laboratorio.

2.2 Selección y preparación de muestras

Después del proceso de chancado y molienda, el material fue clasificado por tamizaje para obtener partículas bajo malla #70 (212 μm). El material que superaba este tamaño fue procesado nuevamente en el molino, y como último recurso, se utilizó un pulverizador. Una vez que todo material alcanzó un tamaño inferior a malla #70, se realizó la homogenización mediante técnicas de roleo y cuarteo, utilizando también un cortador de rifles. Este procedimiento garantizó la obtención de muestras representativas para los ensayos de flotación. Las muestras finales fueron divididas de manera equitativa y homogénea utilizando un divisor rotario.

Se realizó un análisis químico de la muestra de alimentación, en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales de la UTFSM, Campus Casa Central, mediante absorción atómica para determinar Cu y Fe. El contenido de cobre y hierro se evalúa mediante digestión ácida seguida de análisis por espectrofotometría de absorción atómica. La muestra es tratada con mezcla de ácidos y calentada en una placa a 220°C. para eliminar vapores nitrosos y descomponer la matriz mineral. Una vez secas, las muestras son disueltas en una solución de HCl 1:1 y agua desionizada, y posteriormente aforadas en un matraz de 250 mL. Finalmente, se ajusta la dilución según la concentración del analito y se analiza en el espectrofotómetro.

Por otro lado, el porcentaje de azufre se determina mediante un procedimiento que inicia con la oxidación de los sulfuros presentes en la muestra mediante una fusión básica. Posteriormente, los

productos sólidos son separados mediante filtración por gravedad. El sulfato generado se precipita usando cloruro de bario, seguido de una nueva filtración por gravedad. Finalmente, el precipitado se calcina a 800°C durante una hora para completar la determinación de azufre presente.

En la Tabla 2 se muestran las leyes de elementos presentes en el mineral de alimentación usado en ensayos de flotación.

Tabla 2. *Leyes de elementos presentes en el mineral de alimentación usado en ensayos de flotación.*

	Cu, %	Fe, %	S, %
Mineral alimentación	0,77	2,85	1,08

2.3 Análisis granulométrico

Una vez obtenidas las muestras bajo malla #70, se procedió a realizar el análisis granulométrico para determinar el P80, es decir, el tamaño de partícula por debajo del cual se encuentra el 80% del material, utilizando material de alimentación (ver Tabla 3). Para este análisis, se utilizó un tamiz vibratorio Ro-Tap (Labtech Hebro, serie 8612600-15) y un conjunto de mallas que incluían #70, #100, #140, #200, #270 y #400, además del fondo. El tamizado se realizó durante 15 minutos, y la masa retenida en cada malla fue medida en una balanza de precisión. Este procedimiento permitió determinar el P80 de 114,66 µm con el cual se trabajó en los experimentos de flotación.

Tabla 3. Determinación de P80 para ensayos de flotación a través de método Rosin-Rammler.

# Malla	Abertura, μm	Retenido, g	Retenido, %	Retenido acumulado, %	Pasante (P), %	$\ln \left[\ln \left(\frac{100}{100 - P} \right) \right]$	$\ln (d)$
70	212	0,03	0,01	0,01	99,99	2,18	5,36
100	150	35,70	17,14	17,16	82,84	0,57	5,01
140	106	35,10	16,86	34,02	65,98	0,08	4,66
200	75	32,60	15,66	49,67	50,33	-0,36	4,32
270	53	34,80	16,71	66,38	33,62	-0,89	3,97
400	38	38	18,25	84,63	15,37	-1,79	3,64
Fondo	-	32	15,37	100,00	0,00	-	-

2.4 Reactivos de flotación

Los reactivos utilizados en los ensayos incluyen un espumante (Aerofroth70® CYTEC, MIBC), un colector (xantato isopropílico de sodio, SIPX), y modificadores de pH, como ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH).

2.5 Microorganismos

Las bacterias usadas corresponden a *Acidithiobacillus ferrooxidans*, cultivadas a 30°C en medio basal estéril a pH 1,6. La composición del medio bacteriano se detalla en la Tabla 4. Además, la Figura 14 muestra la distribución porcentual de los reactivos en cada matraz de cultivo.

Tabla 4. Composición química del medio basal usado en el cultivo de *A. ferrooxidans*.

Reactivo	Formula química	Peso molecular	Concentración (g/L)
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	132,14	0,4
Sulfato de magnesio heptahidratado	$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	246,48	0,4
Hidrógeno fosfato de di-potasio trihidratado	$\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	228,23	0,056
Sulfato de hierro heptahidratado	$\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	278,02	14,85

El cultivo se inició a partir de un inóculo activo de *A. ferrooxidans*, utilizando sulfato de hierro heptahidratado como sustrato. Al tercer día de incubación, la solución adquirió un color anaranjado, lo que indica la oxidación del hierro por parte de las bacterias y evidencia actividad metabólica (ver Figura 13). Las bacterias fueron recolectadas entonces y filtradas inicialmente con papel filtro Whatman 42, y posteriormente con membranas Durapore 0,22 μm para obtener células libres de hierro y metabolitos. Las bacterias retenidas en el proceso de filtración se re-suspendieron en agua destilada, en una proporción de 1 mL por cada matraz de 400 mL de cultivo filtrado.



Figura 13. Cultivos de *A. ferrooxidans*. Esquina superior izquierda color típico que indica oxidación del hierro por parte de las bacterias y evidencia actividad metabólica.

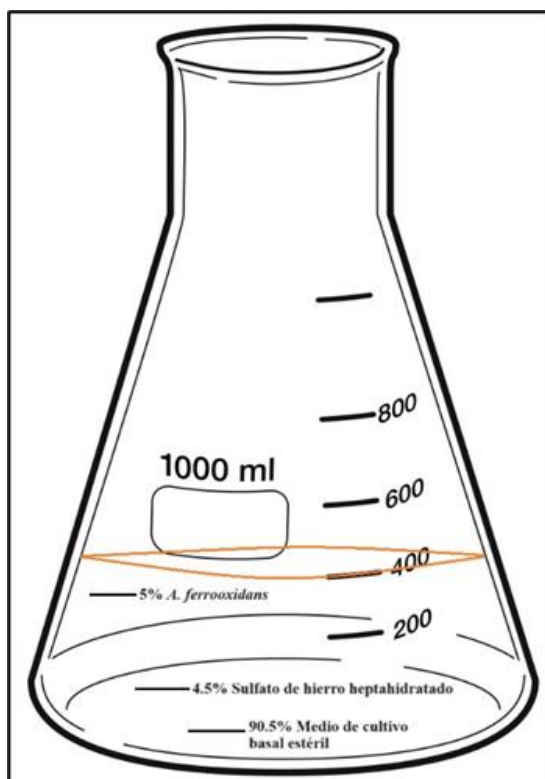


Figura 14. Distribución porcentual en matraz Erlenmeyer para el cultivo de *A. ferrooxidans* (400 mL de solución).

Para controlar la concentración bacteriana, se realizó un conteo directo utilizando una cámara de Neubauer y un microscopio con aumento de 40x. Se preparó una dilución 1:60 (20 μ L de solución bacteriana en 1180 μ L de agua destilada), y la mezcla fue agitada. Luego, se tomó una alícuota de 20 μ L y se colocó en la cámara de Neubauer (ver Figura 15). El conteo directo se realizó en 12 cuadros de la cámara, y la concentración bacteriana se calculó en células por mililitro. Finalmente, se añadieron 3 mL de la solución bacteriana en cada ensayo de flotación.



Figura 15. *Vista al microscopio para el recuento bacteriano.*

2.6 Agua de mar

En los experimentos, se utilizaron dos tipos de agua: agua fresca (destilada) y agua de mar (artificial). El agua de mar fue preparada siguiendo la metodología propuesta por Kester et al. (1967). Para evitar la precipitación de sales como carbonatos y sulfatos, se realizó una preparación cuidadosa en dos fases: una para sales volumétricas y otra para sales gravimétricas.

1. Preparación sales gravimétricas:

Se preparó 2/3 del volumen total de la solución, disolviendo las sales gravimétricas correspondientes en agua destilada. Las sales incluyen los principales componentes del agua de mar como cloruros y sulfatos.

2. Preparación sales volumétricas:

Paralelamente, se preparó 1/3 del volumen de la solución total con las sales volumétricas en un contenedor separado. Este paso fue crucial para evitar la precipitación de sales como CaCO_3 , CaSO_4 , SrCO_3 y SrSO_4 .

3. Mezcla y homogenización:

Una vez preparadas las soluciones separadas, ambas fueron mezcladas cuidadosamente y se sometieron a un proceso de agitación continua durante 12 horas. Esto permitió una correcta homogenización de las sales y la aireación de la solución.

4. Ajuste final:

Se midió el pH de la solución, asegurando que alcanzara el pH natural del agua de mar, que se encuentra en un rango entre 7,8 y 8,2. En las preparaciones realizadas, el pH final fue cercano a 8,2 en la mayoría de los casos, lo que indicaba que el agua de mar artificial estaba lista para su uso en los experimentos. La Tabla 5 muestra la composición de las sales utilizadas para preparar el agua de mar artificial.

Tabla 5. *Formulación para preparar 1 kg de agua de mar artificial con 35 g/L de salinidad (Kester et al. 1967).*

A. Sales gravimétricas (g/kg de solución)		B. Sales volumétricas (mol/kg de solución)	
NaCl	23,926	Mg·6 H ₂ O	0,05327
Na ₂ SO ₄	4,008	CaCl ₂ ·2 H ₂ O	0,01033
KCl	0,677	SrCl ₂ ·2 H ₂ O	0,00009
NaHCO ₃	0,196		
KBr	0,098		
H ₃ BO ₃	0,026		
NaF	0,003		

2.7 Flotación con agua fresca y agua de mar sin bacterias

Los ensayos de flotación se realizaron variando la dosis de colector (0, 25, 100 g/t) y el pH (6, 8, 10), utilizando 1282 mL de agua (fresca o de mar) y 550 g de mineral, lo que generó una pulpa con una concentración de sólidos del 30%. Al inicio de cada ensayo, se ajustó el pH de la pulpa al valor objetivo (6, 8 o 10) utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) o hidróxido de sodio (NaOH) según el caso, y el ajuste de pH se completó durante los primeros minutos del tiempo de acondicionamiento.

El tiempo de acondicionamiento total fue de 20 minutos. Durante los primeros 15 minutos, la pulpa se agitó sin añadir reactivos, solo manteniendo el pH deseado. Cinco minutos antes de la flotación, se añadieron los reactivos: 15 μ L de espumante (Aerofroth70®) y la dosis correspondiente de colector (xantato isopropílico de sodio, SIPX).

Posteriormente, se inició la aireación y el proceso de flotación, que se llevó a cabo durante 6 minutos. Durante la flotación, se mantuvo el pH ajustado y se añadió agua de reposición cuando fuese necesario (minutos 1, 3 y 4). Los concentrados obtenidos se filtraron y se secaron en horno a 85°C durante 24 horas. Finalmente, los resultados de los ensayos se basaron en el promedio de triplicados.

La Figura 16 muestra el diagrama de flujo de este procedimiento.

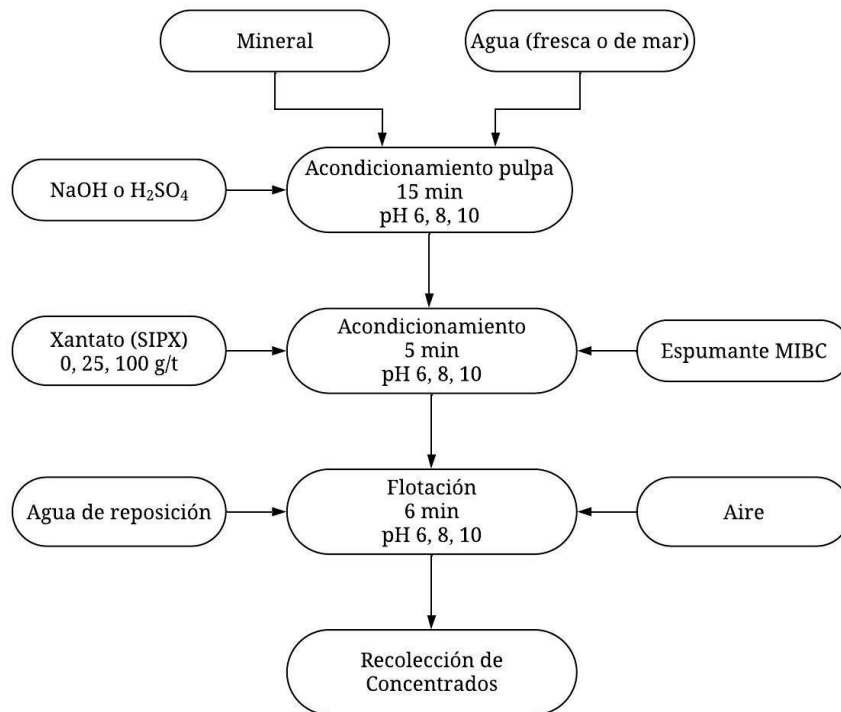


Figura 16. Diagrama de flujo proceso flotación en agua fresca y agua de mar.

2.8 Flotación con acondicionamiento bacteriano

Los ensayos de flotación con acondicionamiento bacteriano se realizaron de manera similar a los ensayos sin bacterias (ver Figura 17), utilizando 1282 mL de agua (fresca o de mar) y 550 g de mineral, manteniendo una concentración de sólidos del 30%. El pH fue ajustado al inicio del acondicionamiento (valores de 6, 8 o 10) mediante el uso de ácido sulfúrico (H_2SO_4) o hidróxido de sodio (NaOH), y se mantuvo constante durante todo el proceso.

La principal diferencia en este procedimiento fue la adición de 3 mL de una solución de *Acidithiobacillus ferrooxidans* al inicio del tiempo de bioacondicionamiento, aproximadamente en el minuto 1. Este bioacondicionamiento tuvo una duración de 15 minutos, tras lo cual se añadieron 15 μL de espumante MIBC (Aerofroth70®) y la dosis correspondiente de colector (xantato isopropílico de sodio, SIPX), continuando el acondicionamiento por 5 minutos adicionales.

Finalmente, se inició la aireación y el proceso de flotación durante 6 minutos, manteniendo el pH objetivo y añadiendo agua de reposición cuando fue necesario. Los concentrados obtenidos se

filtraron y secaron en horno a 85°C durante 24 horas. Al igual que en los ensayos sin bacterias, los resultados se basaron en el promedio de ensayos triplicados.

La Tabla 6 resume los parámetros operacionales usados en ensayos de flotación con y sin acondicionamiento bacteriano.

Tabla 6. *Parámetros operacionales usados en los ensayos de flotación de este trabajo.*

Parámetro operacional	Valor	Unidad
Mineral	550	g
Cp	30	%
Xantato Isopropílico de Sodio (SIPX)	0, 25, 100	g/t
Espumante MIBC	15	μL
pH flotación	6, 8, 10	-
Tiempo acondicionamiento	5	min
Tiempo bioacondicionamiento	15	min
Tiempo flotación	6	min
Concentración bacterias	$2,6 \times 10^7$	bacterias/mL

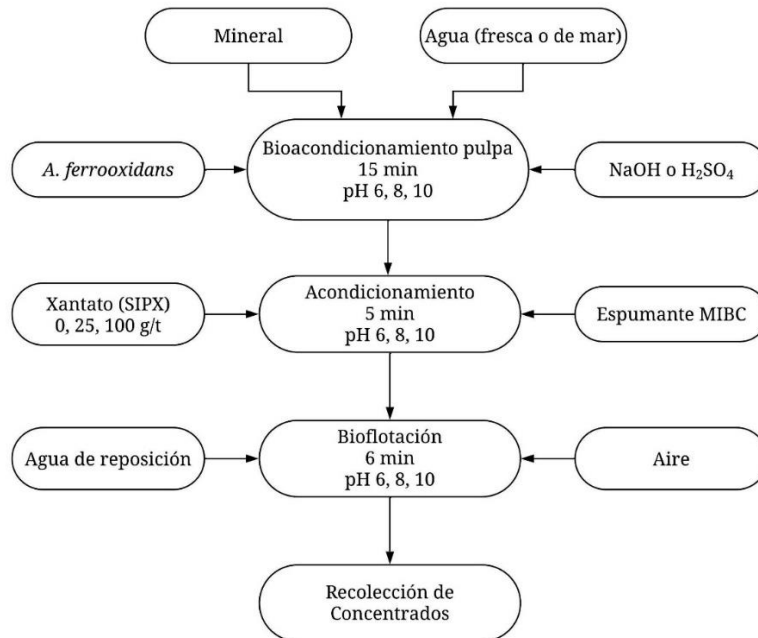


Figura 17. Diagrama de flujo proceso flotación en agua fresca y de mar con acondicionamiento bacteriano.

Los concentrados fueron analizados en el laboratorio de Análisis Químico del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Materiales (DIMM) de la Universidad Técnica Federico Santa María, sede Valparaíso. La medición se realizó utilizando un equipo de Absorción Atómica Perkin PinAAcle 900F Flame, operado con el software analítico WinLab32, el cual permitió obtener las leyes de los elementos presentes en las muestras de cabeza (alimentación) y en los concentrados de cada ensayo de flotación. En este análisis se determinaron las leyes de cobre (Cu), hierro (Fe) y azufre (S), datos fundamentales para evaluar el desempeño de la flotación y calcular las recuperaciones metalúrgicas de los minerales principales, como la calcopirita (CuFeS_2) y pirita (FeS_2). La descripción del método para determinar leyes cobre y hierro, así como de azufre, se mencionó anteriormente (sección 2.2).

3 Resultados y discusiones

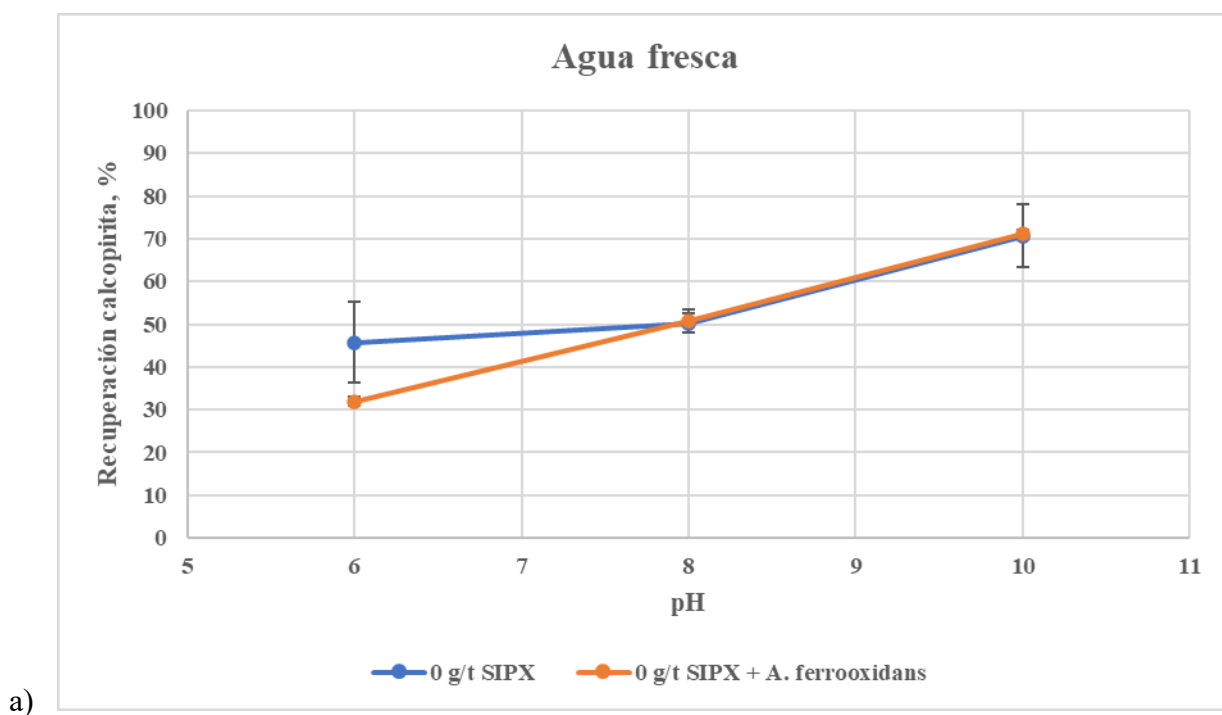
Esta sección presenta y analiza los resultados obtenidos en los ensayos de flotación de sulfuros de cobre mediante flotación, empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* como agente depresor de pirita en condiciones de agua fresca y agua de mar. Los experimentos fueron diseñados para evaluar el efecto de distintos parámetros, como la concentración de colector (0, 25 y 100 g/t), la dosis de bacterias ($2,6 \times 10^7$ bacterias/mL), el tipo de agua utilizada y el pH (6, 8 y 10), en la recuperación selectiva de minerales. Este análisis incluye las diferencias observadas en las recuperaciones cuando las bacterias estaban presentes o ausentes (ver Tabla 9 de los Anexos).

Aunque la muestra analizada contiene una mezcla de minerales, el análisis se ha simplificado para centrarse en los principales minerales sulfurados presentes: calcopirita y pirita. Esta decisión se fundamenta en un análisis mineralógico detallado realizado en 2022 del mineral proveniente del yacimiento Inca de Oro (Leiva, 2022), que mostró que los elementos de mayor relevancia para las leyes de cobre, hierro y azufre provienen de estos dos minerales. Las demás especies minerales están presentes en menores cantidades, lo cual permite enfocar el análisis en calcopirita y pirita sin comprometer la precisión de los resultados en términos de leyes de elementos clave. La composición mineralógica del mineral de Inca de Oro de Leiva (2022) se presenta en la Tabla 10 de los Anexos.

La concentración bacteriana utilizada en este trabajo ($2,6 \times 10^7$ bacterias/mL) fue menor que la reportada por San Martín et al. (2018) (3×10^8 bacterias/mL) y Chandraprabha et al. (2004) (4×10^8 bacterias/mL). Estas diferencias permiten explorar cómo la cantidad de bacterias afecta la depresión de pirita y la flotación selectiva en diferentes tipos de agua, especialmente en condiciones salinas. Asimismo, el trabajo de Leiva (2022) se destaca por el uso de una dosis de colector de 150 g/t, significativamente mayor que las evaluadas en este estudio, lo que proporciona una perspectiva comparativa sobre la eficiencia del colector SIPX y su impacto en la flotabilidad de los minerales.

3.1 Ensayos con y sin acondicionamiento bacteriano en agua fresca y de mar

En Figura 18 se observan los resultados de las flotaciones en agua fresca sin colector (0 g/t). Las recuperaciones reflejan flotabilidad natural de los minerales, lo que permite evaluar exclusivamente el efecto de las bacterias. En calcopirita (Figura 18 a), las recuperaciones en agua fresca oscilaron entre 45,8% y 70,7%, incrementándose con el pH debido a la alcalinidad creciente que favorece la flotación natural. Con la adición de bacterias *A. ferrooxidans* ($2,6 \times 10^7$ bacterias/mL) las recuperaciones variaron entre 31,9% y 71,2%, con una tendencia similar, sin un efecto significativo aparente en su flotabilidad. En agua fresca, la recuperación de pirita osciló entre 6,1% y 9,0% sin bacterias, disminuyendo ligeramente en presencia de bacterias. En todo el rango de pH estudiado las recuperaciones de pirita fueron muy bajas (Figura 18 b).



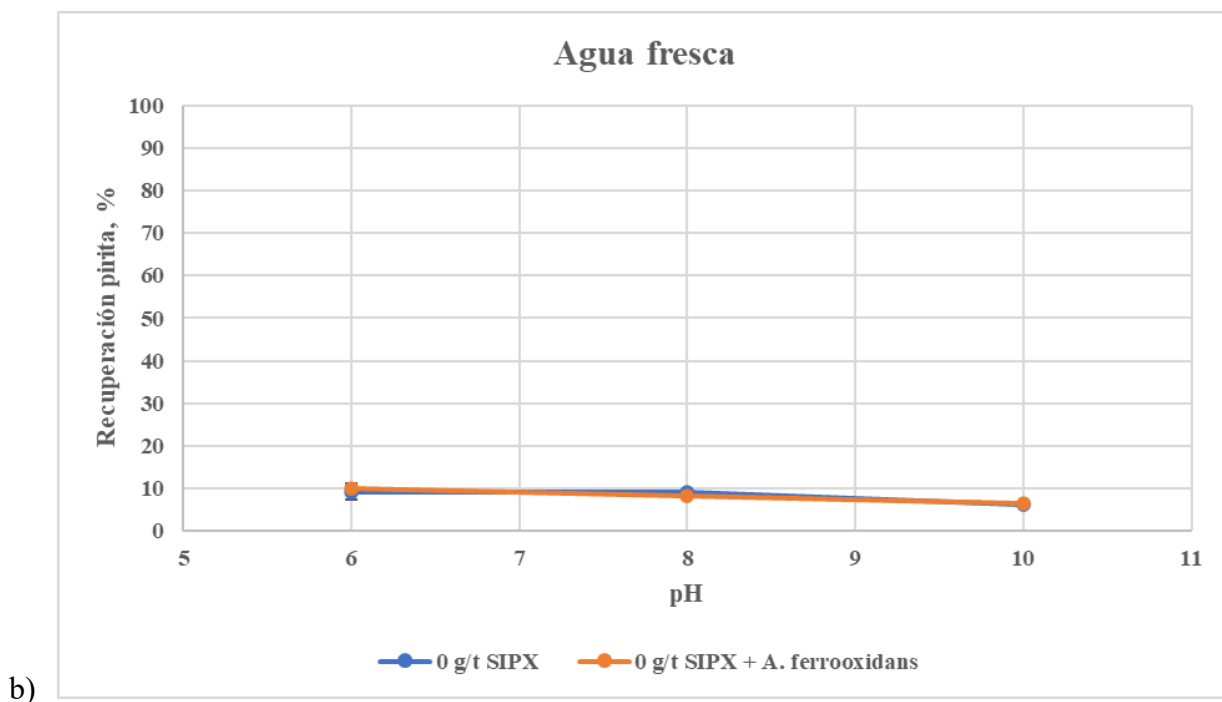
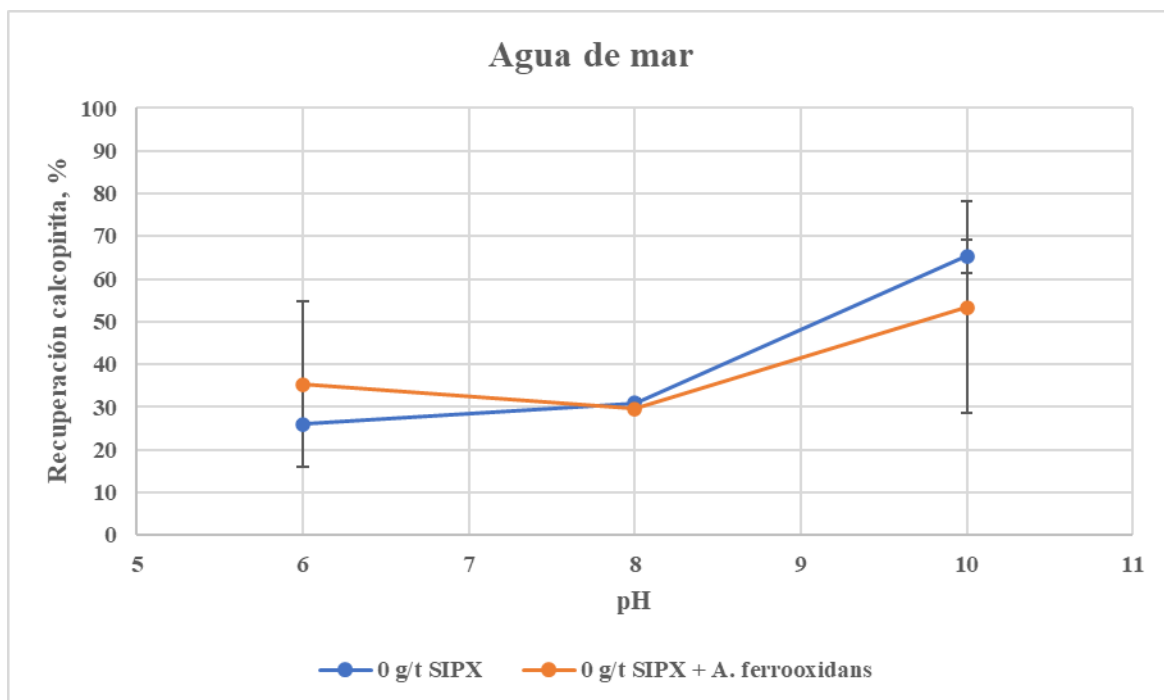


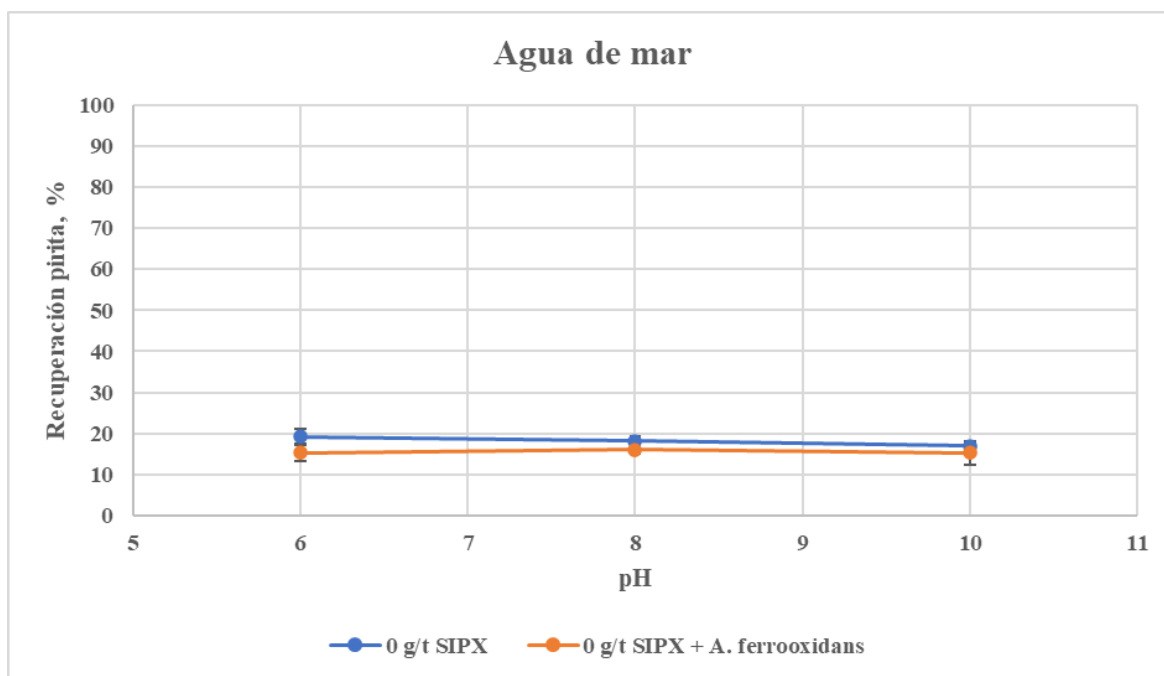
Figura 18. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca cuando dosis de colector SIPX es 0 g/t, con y sin bacterias (acondicionamiento con *A. ferrooxidans*).

En Figura 19 se observan los resultados de las flotaciones en agua de mar sin colector. En agua de mar, las recuperaciones de calcopirita (Figura 19 a), fueron menores, respecto al agua fresca, alcanzando un máximo de 65,3% a pH 10 sin bacterias, y disminuyeron a un rango 35,3% y 53,3% con bacterias, probablemente influenciadas por las sales presentes, como Ca^{2+} y Mg^{2+} , que interactúan químicamente con los minerales (Hirajima et al., 2016). En agua de mar, las recuperaciones de pirita (ver Figura 19 b) aumentaron a un rango de 15,3% y 19,2%, con reducciones marginales al incorporar bacterias. Por tanto, se observa una muy baja flotabilidad de la pirita en esta mezcla de minerales en ausencia de colector.

Aunque la dosis 0 g/t permite observar la flotabilidad natural, no es adecuada para aplicaciones industriales debido a las bajas recuperaciones de calcopirita y, para este caso de estudio, tampoco se evidencia flotación considerable de pirita en agua de mar. Sin embargo, sirve como referencia para evaluar el efecto del colector con las demás dosis.



a)



b)

Figura 19. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar cuando la dosis de colector SIPX es 0 g/t, con y sin bacterias (acondicionamiento con *A. ferrooxidans*).

En Figura 20 se observan los resultados de las flotaciones en agua fresca con una dosis de 25 g/t de colector SIPX. Se observó una mejora significativa en la recuperación de calcopirita con respecto a cuando no hay colector (Figura 20 a). En agua fresca, las recuperaciones de calcopirita sin bacterias oscilaron entre 74,4% y 83,4%, aumentando con bacterias a un rango 61,9% a 89,7%. En cuanto a la pirita (Figura 20 b), las recuperaciones en agua fresca fueron moderadas, entre 17,1% y 20,7% sin bacterias, reduciéndose a un rango de 16,8% a 19,2% con bacterias. Los estudios en los cuales se ha basado este trabajo indican que la pirita tiene muy alta flotabilidad en el rango de pH 4 a 10 con colector, por lo tanto, no concuerdan con los resultados obtenidos en este estudio (Chandraprabha et al. 2004; San Martin et al., 2018).

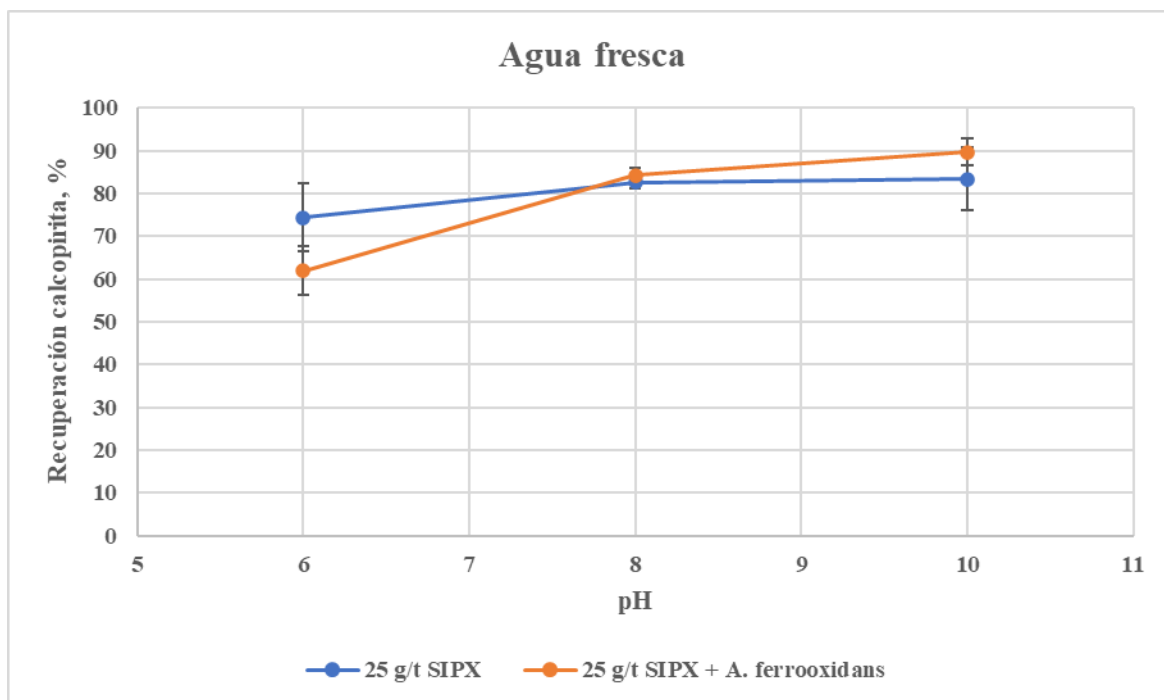
En Figura 21 se observan los resultados de las flotaciones en agua de mar con una dosis de 25 g/t de colector. Las recuperaciones de calcopirita (Figura 21 a) alcanzaron entre 88,6% y 90,4% sin bacterias, es decir, aumentaron con respecto a cuando no se utiliza colector, lo que sugiere que las sales disueltas no afectaron significativamente la interacción del colector con la superficie mineral. Cuando se agregaron bacterias las recuperaciones fueron entre 86,8% a 89,1% en todo el rango de pH estudiado, es decir las bacterias no hicieron ningún efecto en la recuperación de calcopirita. En agua de mar, las recuperaciones de pirita (Figura 21 b) fueron más altas que en agua fresca, variando entre 24,0% y 25,9% sin bacterias y disminuyendo ligeramente con bacterias, entre 22% (pH 10) y 25% (pH 6).

Es importante destacar que, en medios alcalinos, la pirita tiende a presentar baja flotabilidad debido a la formación de especies hidrofílicas en su superficie. Este comportamiento está bien documentado en la literatura y se debe principalmente a la formación de óxidos e hidróxidos de hierro que inhiben la adsorción del colector. En este estudio, el rango de pH evaluado fue de 6 a 10, lo que incluye solo un valor de pH ácido. Este hecho podría haber limitado el análisis del comportamiento de la pirita en condiciones más favorables para su flotación.

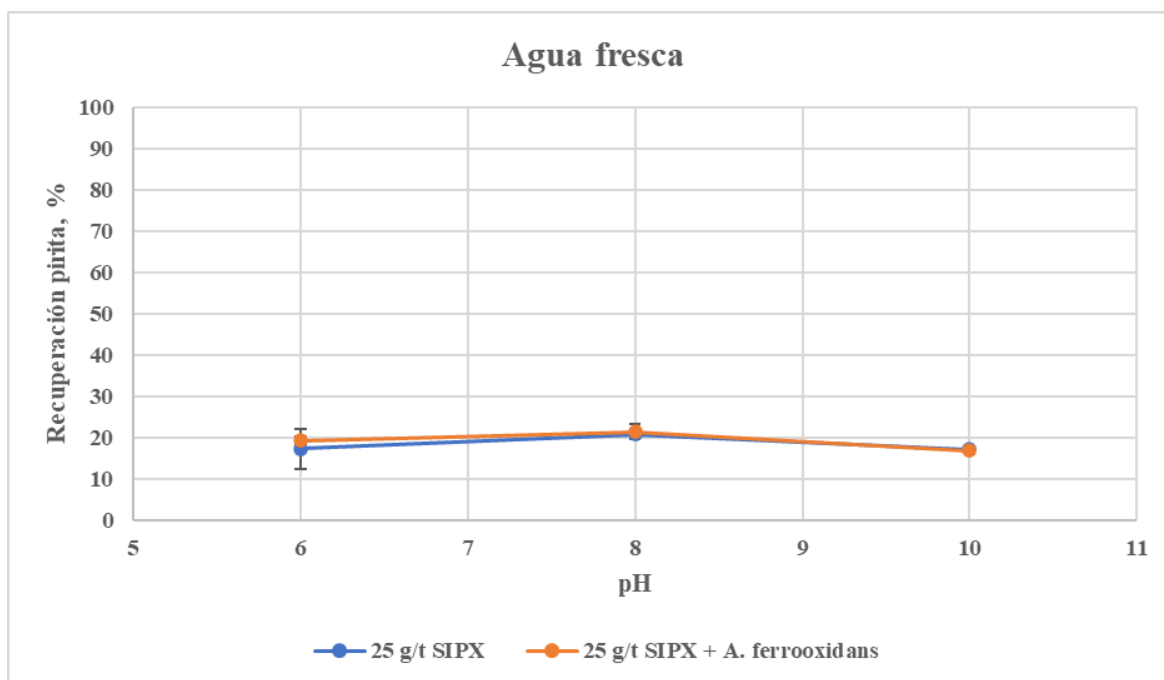
Adicionalmente, la interferencia de otros minerales presentes en la mezcla puede haber afectado la adsorción del colector en los sitios activos de la pirita, reduciendo aún más su flotabilidad. Esta interferencia podría estar relacionada con fenómenos como la competencia en la adsorción de colector o interacciones galvánicas entre los distintos minerales sulfurados presentes. Por el contrario, en estudios realizados con sistemas aislados de mineral puro, estas interacciones están ausentes, lo que facilita la adsorción del colector sobre la superficie de la pirita y, por ende, su

flotabilidad. Esto subraya la complejidad adicional que presentan los sistemas reales de mezcla de mineral respecto a los estudios de minerales puros. En ambos casos de recuperaciones de minerales, se observa un aumento mayor cuando se utiliza agua de mar. Este comportamiento podría atribuirse a la formación de una espuma más estable, característica que, en combinación con el espumante MIBC, genera una sinergia que favorece la formación y estabilidad de las burbujas durante el proceso de flotación, lo que fue observado directamente durante los ensayos.

En este caso, no es posible afirmar una concreta acción bacteriana sobre la pirita, a pesar de una disminución porcentual mínimo entre los ensayos con y sin presencia bacteriana. Sin embargo, esta dosis de colector eleva las recuperaciones de calcopirita.

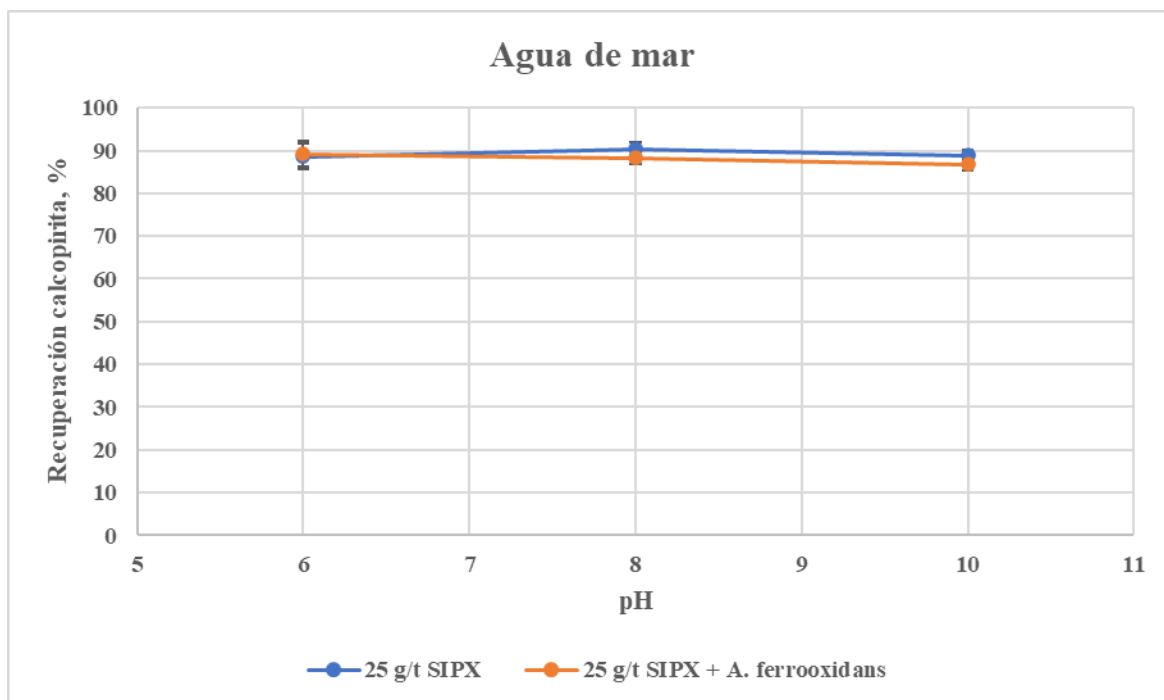


a)

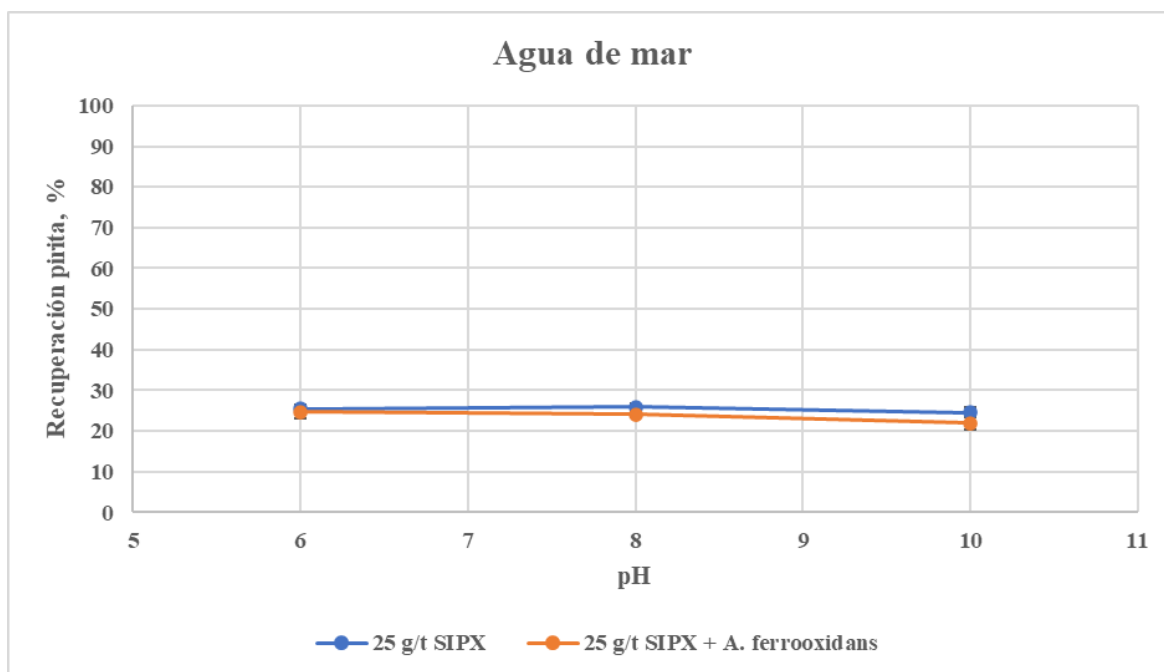


b)

Figura 20. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca cuando la dosis de colector SIPX es 25 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.



a)



b)

Figura 21. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar; cuando la dosis de colector SIPX es 25 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.

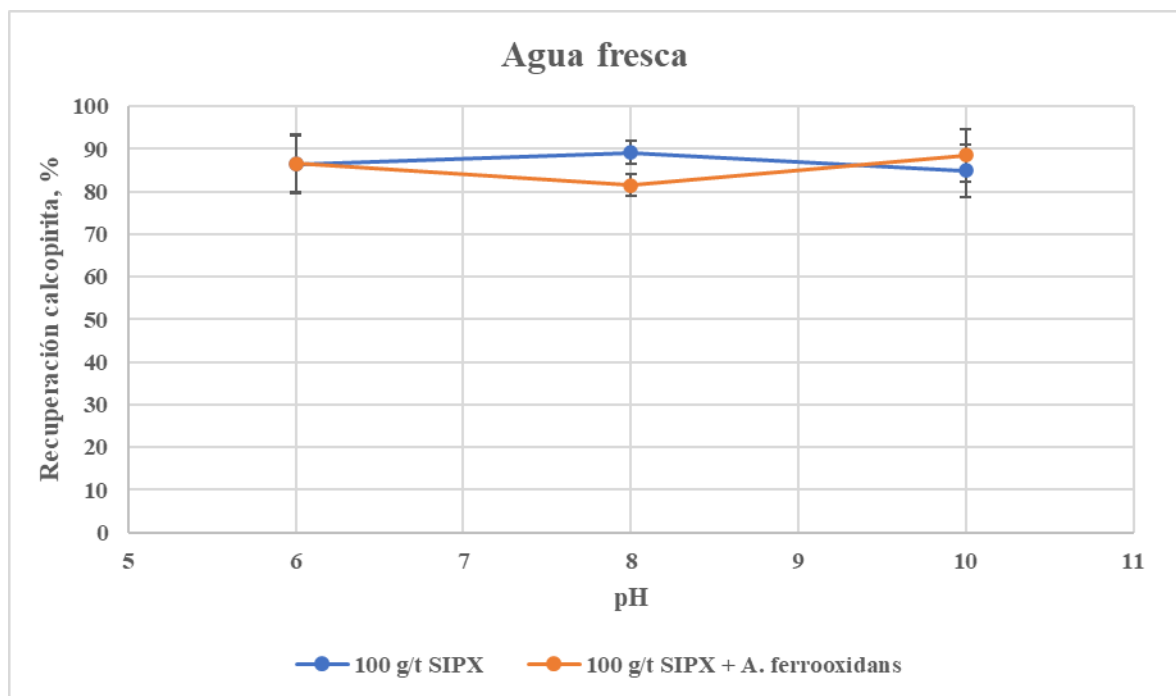
En Figura 22 se presentan los resultados de las flotaciones en agua fresca con 100 g/t de SIPX. Las recuperaciones de calcopirita (Figura 22 a) superaron el 85% en agua fresca, alcanzando valores cercanos al 90% en todo el rango de pH. La adición de bacterias no mostró un impacto significativo, con recuperaciones similares. En el caso de la pirita (Figura 22 b), las recuperaciones sin bacterias oscilaron entre 15,9% y 26,6% en agua fresca, disminuyendo levemente con bacterias al rango de 14,8% y 25,9%. Las tendencias son similares en ambas situaciones. Se destaca nuevamente la baja flotabilidad de la pirita en este sistema de minerales heterogéneo, aun cuando la dosis de colector aumento 3 veces más.

En Figura 23 se presentan los resultados de las flotaciones en agua de mar con 100 g/t de SIPX. Las recuperaciones de calcopirita con esta dosis SIPX mostraron valores altos y consistentes, alcanzando un rango entre 86,4% y 90,3% en el pH abarcado. Este comportamiento puede atribuirse al aumento en la dosis de colector, que saturó los sitios activos de la superficie mineral, promoviendo una mayor adsorción del SIPX. Adicionalmente, la presencia de sales inorgánicas como Ca^{2+} y Mg^{2+} , características del agua de mar, contribuyó a estabilizar la espuma formada durante el proceso de flotación, lo que facilitó la recuperación de calcopirita (ver Figura 23 a). Este fenómeno, documentado en la literatura (Hirajima et al., 2016; Castro, 2018), destaca la capacidad del agua de mar para mejorar la interacción entre colector y superficie mineral, aunque en sistemas complejos esta interacción puede ser influenciada por la coexistencia de otras especies minerales en la pulpa. En agua de mar (Figura 23 b), las recuperaciones de pirita fueron entre 27% y 29% sin bacterias y mostrando reducciones mínimas con bacterias al rango de 26% a 28%. Los resultados evidencian nuevamente poca flotabilidad de pirita. En mezclas heterogéneas, la cantidad de colector puede distribuirse entre varias especies minerales. Aunque la dosis de 100 g/t es alta, su adsorción preferencial en calcopirita, un mineral con mayor afinidad hacia los xantatos podría dejar a la pirita con una cantidad insuficiente de colector para inducir una flotabilidad significativa. Lo que también se refuerza por el hecho de que la recuperación de calcopirita en este mismo sistema fue alta. Por tanto, en esta dosis, se maximiza la recuperación de calcopirita.

A pesar de emplear una dosis más alta de colector, la flotabilidad de la pirita se mantiene baja en comparación con estudios previos realizados con minerales puros. En dichos estudios, las recuperaciones de pirita aumentan significativamente en condiciones ácidas y disminuyen gradualmente a medida que el pH de la pulpa se vuelve más alcalino. Estos comportamientos en

las recuperaciones de pirita no permiten afirmar una efectividad de *A. ferrooxidans* con 100 g/t SIPX.

El aumento en las recuperaciones observadas para ambos minerales en este estudio puede atribuirse al incremento en la dosis de colector SIPX. Sin embargo, desde la perspectiva económica, este incremento no resulta óptimo, considerando que dosis más bajas, como 25 g/t, también alcanzaron recuperaciones elevadas de calcopirita. Este balance sugiere que uso de dosis más altas no justifica el consumo adicional del colector, especialmente en un contexto industrial.



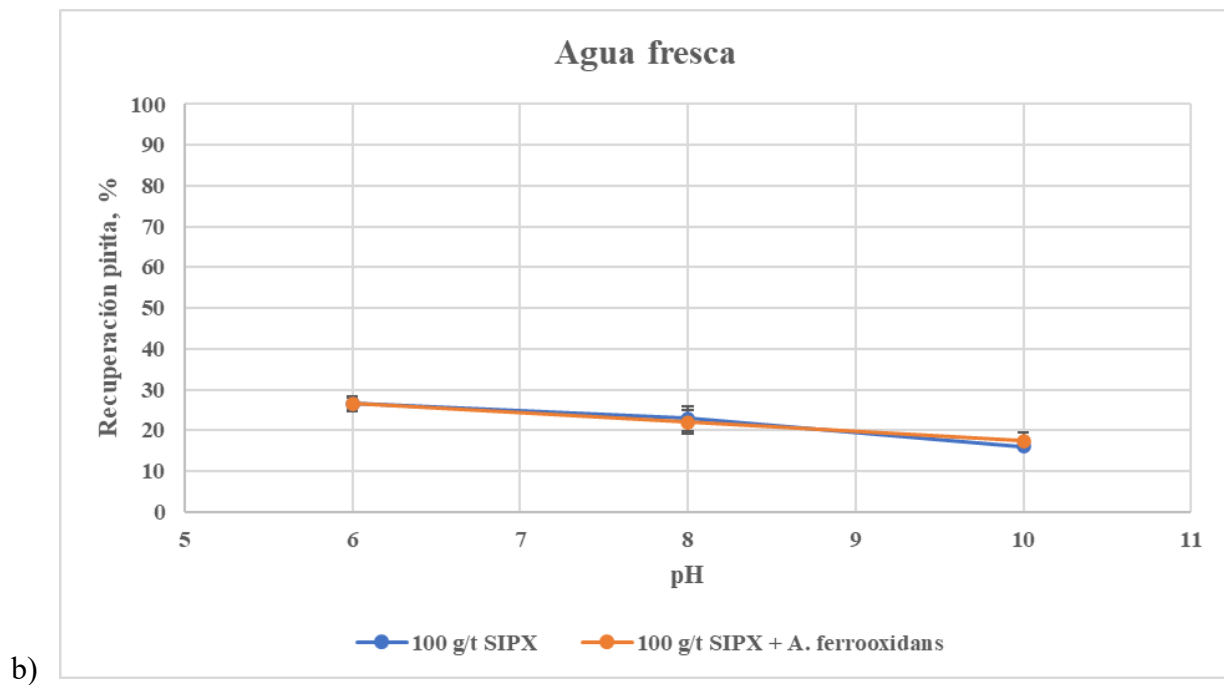
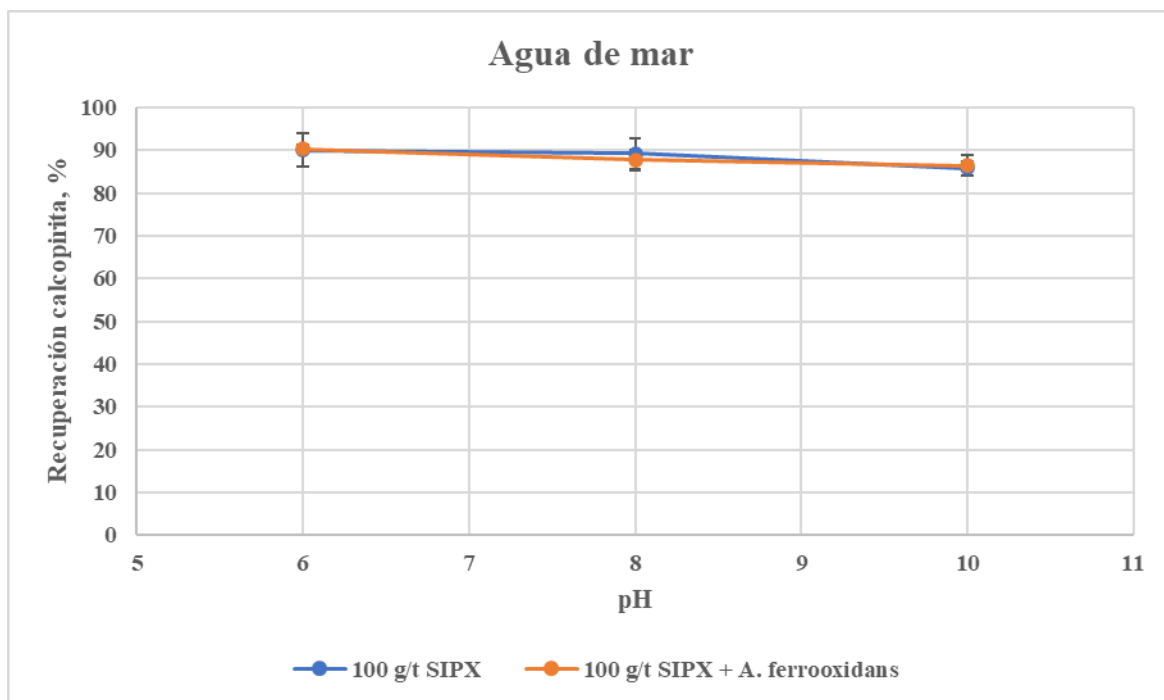
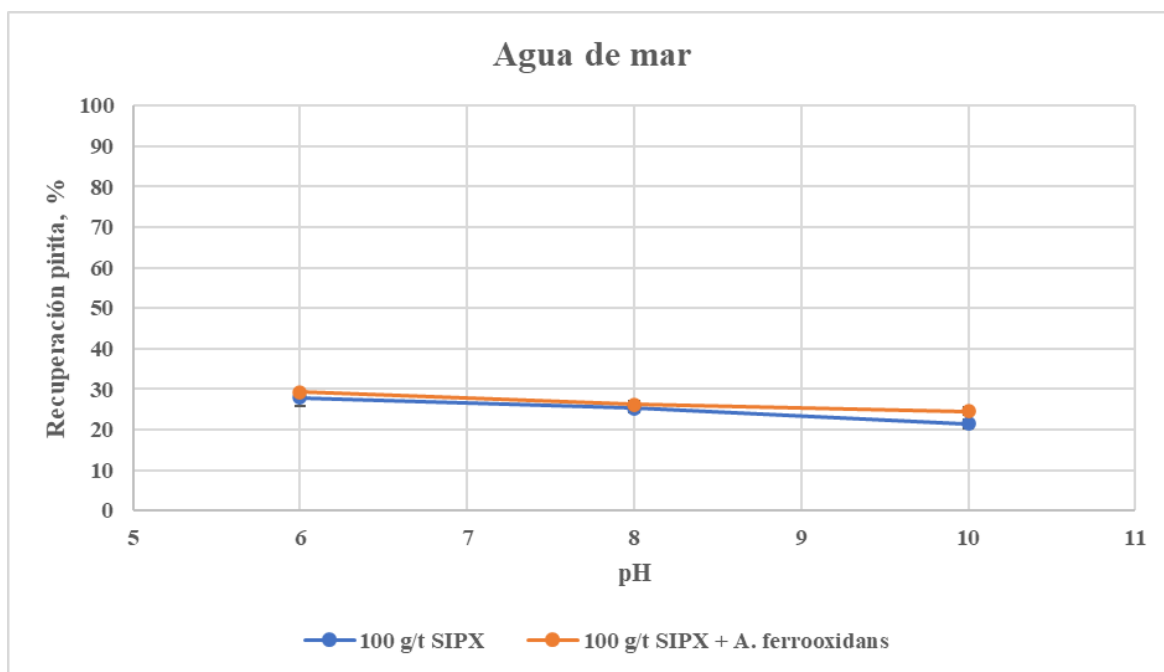


Figura 22. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua fresca, cuando la dosis de colector SIPX es 100 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.



a)



b)

Figura 23. Recuperación metalúrgica de calcopirita (a) y pirita (b) en agua de mar, cuando dosis de colector SIPX es 100 g/t, con y sin acondicionamiento bacteriano.

3.2 Concentración bacteriana

En este trabajo se empleó una concentración bacteriana de $2,6 \times 10^7$ bacterias/mL, superior a la utilizada en trabajos previos como el de Leiva (2022), donde se usaron $1,2 \times 10^6$ bacterias/mL. A pesar de este incremento y de haber verificado la metodología empleada, los resultados no evidenciaron una clara efectividad de las bacterias sobre los minerales analizados, particularmente en su capacidad para deprimir la flotación de la pirita. Este comportamiento refleja las limitaciones al expandir los estudios previos realizados en minerales puros a sistemas heterogéneos con mezclas reales de minerales, tal como se obtienen en un yacimiento minero antes de ingresar al procesamiento en planta.

Comparativamente, estudios como los de San Martín et al. (2018) y Chandrababha et al. (2004), que utilizaron concentraciones bacterianas superiores 3×10^8 y 4×10^8 bacterias/mL, respectivamente, mostraron una mayor efectividad en la depresión de pirita en sistemas controlados. En contraste, la concentración empleada por Leiva (2022) no mostró beneficios en la depresión de pirita, reforzando la relación entre densidad bacteriana y la efectividad del bioacondicionamiento. Sin embargo, cabe destacar que Leiva logró altas recuperaciones de calcopirita cuando usó 150 g/t. A pesar de esto, también comprometió la selectividad del proceso debido al incremento de la flotación de pirita.

El efecto depresor de las bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* sobre la pirita no pudo ser evidenciado, ya que el mineral presentó recuperaciones consistentemente bajas en todos los casos, incluso al agregar colector. En este sentido, no fue posible deprimir un mineral cuya flotabilidad ya se encontraba limitada.

3.3 Competencia de adherencia bacteriana en mezclas minerales

En sistemas heterogéneos como el estudiado, la interacción de *Acidithiobacillus ferrooxidans* con los minerales objetivos, especialmente la pirita, puede verse limitada por la presencia de otros minerales como cuarzo, illita y sericita. Estos minerales de ganga, que son comunes en sistemas polimetálicos sulfurados, actúan como “diluyentes” en el sistema, reduciendo la proporción de superficie reactiva disponible para la adherencia bacteriana. Estos minerales al tener carga superficial negativa en un rango de pH típico de flotación, generan repulsión electroestática con las bacterias, que también poseen carga negativa en estas condiciones (Donati & Sand, 2007).

En sistemas puros y aislados, como los trabajados por Chandraprabha et al. (2004) y San Martín et al. (2018), las bacterias interactúan exclusivamente con los minerales de interés, optimizando sus propiedades electroestáticas y químicas. Sin embargo, en una mezcla real, como la estudiada en este trabajo, la predominancia de ganga, como cuarzo e illita, no solo disminuye las probabilidades de interacción bacteriana con pirita, sino que también puede generar problemas de arrastre mecánico en la espuma, afectando la calidad del concentrado.

3.4 Comparativa ente agua fresca y agua de mar

En relación con calcopirita, las recuperaciones fueron más altas en agua de mar en comparación con agua fresca, destacándose a pH 10, donde se observó la mayor flotabilidad del mineral. Este comportamiento puede explicarse por la formación de espumas más estables en agua de mar, atribuible a la acción sinérgica entre el espumante MIBC y las sales presentes, como Ca^{2+} y Mg^{2+} , que prologan la vida de las burbujas y facilitan el transporte del mineral.

Por otro lado, la flotación de la pirita fue ligeramente mayor en agua de mar en comparación con agua fresca, posiblemente debido a la activación secundaria causada por iones Cu^{2+} liberados de la calcopirita u otros minerales sulfurados presentes en la mezcla (Mu & Peng, 2019) y también atribuible a la formación de espumas más estables provocando el mismo efecto que calcopirita. Aunque las recuperaciones fueron bajas, esta diferencia resalta el impacto del tipo de agua en el proceso.

3.5 Dosis óptima de colector

El análisis de las dosis de colector permitió identificar que 25 g/t de SIPX es una opción eficiente en términos de recuperación de calcopirita y consumo de reactivos. Los puntos clave de este análisis son:

- Recuperación de calcopirita, que en ambos tipos de agua superaron el 89% con una dosis de 25g/t.
- Selectividad, donde en agua fresca se observó una menor recuperación de pirita en comparación con agua de mar, aunque en este último caso también mostró una baja recuperación.

- Eficiencia económica, en comparación con dosis más altas, como 100 g/t, el uso de 25 g/t minimiza el consumo de reactivos, lo cual es crítico para mantener costos operativos bajos a escala industrial.

El último punto se entiende en un caso donde el precio de colector SIPX se encuentra en un rango de 2 y 5 USD/kg, dependiendo de las condiciones de mercado y el proveedor. Para este análisis se utiliza el promedio 3,5 USD/kg como referencia, permitiendo una evaluación representativa de impacto económico al incrementar la dosis de colector (ver Tabla 7).

Tabla 7. Consumo y costo de dosis de colector entre 25 y 100 g/t.

Dosis de colector, g/t	Consumo de colector, kg/t	Costo por tonelada, USD/t
25	0,025	0,0875
100	0,1	0,35
Diferencia	0,075	0,2625

Incrementar la dosis implica un costo adicional de 0,2625 USD/t de mineral procesado.

Ahora, considerando un precio de cobre actualizado (4,1 USD/lb) y en presencia de agua de mar (a pH natural), analizando las recuperaciones de calcopirita se obtiene un balance económico, como la que se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Balance económico en base a la producción adicional de Cu (34,63% contenido de cobre en calcopirita) a pH natural de agua de mar.

Dosis de colector (g/t)	Recuperación calcopirita (%)	Diferencia recuperación (%)	Producción adicional de Cu (kg/t)	Incremento de ingresos por Cu (USD/t)	Incremento en costo de colector (USD/t)	Balance económico (USD/t)
25	89	-	-	-	0,0875	-
100	90	1	0,0064	0,0579	0,2625	-0,2046

De acuerdo con los resultados experimentales, el aumento en la dosis de colector no genera una mejora significativa en la recuperación de calcopirita. La diferencia entre el incremento de ingresos por cobre y el costo adicional del colector muestra un balance negativo de -0,2046 USD/t, indicando que el aumento de colector no es económicamente viable para este caso de estudio.

Desde una perspectiva técnica y económica, mantener la dosis de 25 g/t es la opción más eficiente y rentable, ya que optimiza los costos y preserva selectividad del proceso.

En cuanto a la calcopirita, las altas recuperaciones obtenidas en ambas condiciones de agua reflejan la efectividad del colector SIPX, mientras que, para la pirita, la presencia de bacterias y las sales inorgánicas influyen en menor medida en su depresión. Una hidrólisis del xantato a dixantógeno puede afectar la eficiencia del colector en estas condiciones llevadas a cabo. Este fenómeno, descrito por Mu et al. (2016), ocurre porque el dixantógeno, principal responsable de inducir hidrofobicidad en minerales depende de las condiciones químicas del sistema, incluyendo el pH y la electroquímica de la superficie mineral. En condiciones de pH elevado o presencia de especies competidoras en la pulpa, la oxidación del xantato puede no ser suficiente para formar dixantógeno en cantidades adecuadas.

Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo se detallan a continuación.

- La bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* y su concentración de $2,6 \times 10^7$ bacterias/mL no mostraron un efecto depresor sobre la pirita en las condiciones experimentales utilizadas. Las recuperaciones de pirita fueron muy bajas, tanto en agua fresca como en agua de mar, incluso al agregar colector. Esto se debe a la formación de especies hidrofílicas en la superficie de la pirita, como hidróxidos y oxihidróxidos de hierro, que dificultan la adsorción de colector, especialmente en medios alcalinos. Además, la presencia de cationes divalente en agua de mar, como Ca^{2+} y Mg^{2+} , pudo reforzar estas capas hidrofílicas, afectando negativamente su flotabilidad. También influyó la presencia de minerales de ganga, como cuarzo e illita, que actuaron como “diluyentes” y limitaron esta interacción.
- En agua fresca, las recuperaciones de pirita fueron consistentemente bajas, reflejando una menor interferencia de activación secundaria. En agua de mar, las recuperaciones aumentaron debido a la formación de espuma más estable, característica de este medio salino.
- La calcopirita mostró altas recuperaciones (superior al 85%) en ambos tipos de agua, con un comportamiento más estable en agua de mar, posiblemente debido a la mayor estabilidad de la espuma generada por las sales presentes.
- La dosis de colector de 25 g/t se identificó como la más eficiente, desde los puntos de vista técnico y económico. Esta dosis permitió alcanzar altas recuperaciones de calcopirita (superior al 89%) mientras se mantenía recuperaciones marginales de pirita, entre 19% y 21%, lo que confirma la baja flotabilidad de este mineral bajo las condiciones estudiadas.,
- Desde una perspectiva económica, la dosis de 25 g/t también resulta más rentable, evitando un consumo excesivo de colector sin comprometer la calidad del concentrado. El análisis económico del colector demostró que, aumentar la dosis de colector a 100 g/t, genera un costo adicional de 0,2625 USD por tonelada de mineral procesado, sin una mejora significativa en la recuperación de cobre que justifique este incremento.
- La baja flotabilidad de la pirita, incluso al aumentar la dosis de colector, podría estar influenciada por interacciones galvánicas entre minerales presentes en la mezcla, así como

por la competencia en la adsorción de colector. Esto subraya la complejidad de trabajar con mezclas de minerales reales en lugar de sistemas de minerales puros.

Recomendaciones

Hacer un análisis mineralógico de la alimentación para saber que minerales hay y determinar con mayor precisión las recuperaciones de pirita y calcopirita, ya que se hizo la suposición de que solo había pirita y calcopirita.

Aumentar la dosis de colector para hacer que flote la pirita y así poder ver el efecto depresor de las bacterias *A. ferrooxidans*.

Para investigaciones futuras, se recomienda explorar concentraciones bacterianas superiores a las utilizadas en este estudio y evaluar cómo estas afectan la recuperación de pirita y calcopirita en sistemas heterogéneos. Además, sería valioso implementar tiempos de bioacondicionamiento más prolongados y probar la secuencia de adición de reactivos para optimizar la interacción *Acidithiobacillus ferrooxidans* con minerales objetivos.

Se sugiere el uso de métodos avanzados y complementarios para el recuento bacteriano, como técnicas basadas en densidad celular, para reducir el margen de error humano y mejorar la precisión de las concentraciones utilizadas en los experimentos. Esto permitiría una mejor correlación entre concentración efectiva de bacterias y su impacto en la flotabilidad de los minerales.

Finalmente, sería interesante extender estos estudios a escalas experimentales más cercanas a las condiciones industriales, evaluando cómo los parámetros óptimos identificados en laboratorio se traducen a sistemas más complejos y con mayor heterogeneidad. Esto incluye la posibilidad de integrar diseños factoriales para optimizar simultáneamente múltiples variables, como el pH, la dosis de colector y la concentración bacteriana, asegurando la transferencia de estos hallazgos a aplicaciones prácticas.

Bibliografía

- Bagdigian, R. M., & Myerson, A. S. (1986). The adsorption of *Thiobacillus ferrooxidans* on coal surfaces. *Biotechnology and Bioengineering*, 28(4), 467-479.
- Castro, S. (2012). Challenges in flotation of Cu-Mo sulfide ores in sea water. *Water in Mineral Processing-Proc. of the First International Symposium (J. Drelich, Ed.)*, SME, 29-40.
- Castro, S. (2018). Physico-chemical factors in flotation of Cu-Mo-Fe ores with seawater: A critical review. *Physicochemical Problems of Minerals Processing: ISSN 2084-4735*. doi:<https://doi.org/10.5277/ppmp18162>
- Castro, S., Miranda, C., Toledo, P., & Laskowski, J. S. (2013). Effect of frothers on bubble coalescence and foaming in electrolyte solutions and seawater. *International Journal of Mineral Processing*, 124, 8-14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.07.002>
- 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.
- COCHILCO. (2022). *Proyección de demanda de agua en la minería del cobre. Período 2022-2033*. Ministerio de Minería, Santiago, Chile.
- COCHILCO. (2023). *Agua en la minería del cobre, actualización al año 2022*. Ministería de Minería, Santiago, Chile. Retrieved from Comisión Chilena del Cobre.
- Donati, E. R., & Sand, W. (2007). *Microbial processing of metal sulfides*. Springer.
- Flemming, H. C., & Wingender, J. (2010). The biofilm matrix. *Nature Reviews Microbiology*, 8(9), 623-633. doi:<https://doi.org/10.1038/nrmicro2415>
- Hirajima, T., Suyantara, G. P., Ichikawa, O., Elmahdy, A., Miki, H., & Sasaki, K. (2016). Effect of Mg^{2+} and Ca^{2+} as divalent seawater cations on the flotability of molybdenite and chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 96-97, 83-93. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.023>

- Kester, D. R., Duedall, I. W., Connors, D. N., & Pytkowicz, R. M. (1967). Preparation of artificial seawater. *Limnology and Oceanography*, 1, 176-179.
- Leiva, F. (2022). Evaluación del uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en flotación de sulfuros de cobre con agua de mar. Santiago, Chile.
- Mu, Y., & Peng, Y. (2019). The effect of saline water on copper activation of pyrite in chalcopyrite flotation. *Minerals Engineering*, 131, 336-341. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.032>
- Mu, Y., Peng, Y., & Lauten, R. A. (2016). The depression of pyrite in selective flotation by different reagent systems – A Literature review. *Minerals Engineering*, 96-97, 143-156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.018>
- San Martín, F., Kracht, W., & Vargas, T. (2018). Biodepression of pyrite using *Acidithiobacillus ferrooxidans* in seawater. *Minerals Engineering*, 117, 127-131. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.005>
- 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. doi:<https://doi.org/10.3390/min11101039>
- Wang, B., & Peng, Y. (2014). The effect of saline water on mineral flotation – A critical review. *Minerals Engineering*, 66-68, 13-24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.04.017>
- Wills, B., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery (8th ed.)*. Butterworth-Heinemann.

Anexos

Tabla 9. *Resumen de resultados para recuperaciones (triplicados) en base a parámetros operacionales.*

Tipo agua	Concentración bacteriana (bacterias/mL)	Dosis colector, g/t	pH	Recuperación calcopirita, %	Recuperación pirita, %
Fresca	0	0	6	46	9
Fresca	0	0	8	50	9
Fresca	0	0	10	71	6
Fresca	0	25	6	74	17
Fresca	0	25	8	83	21
Fresca	0	25	10	83	17
Fresca	0	100	6	86	27
Fresca	0	100	8	89	23
Fresca	0	100	10	85	16
Mar	0	0	6	26	19
Mar	0	0	8	31	18
Mar	0	0	10	65	17
Mar	0	25	6	89	26
Mar	0	25	8	90	26
Mar	0	25	10	89	25
Mar	0	100	6	90	28
Mar	0	100	8	89	25
Mar	0	100	10	86	21
Fresca	2.6E+07	0	6	32	10
Fresca	2.6E+07	0	8	51	8
Fresca	2.6E+07	0	10	71	6
Fresca	2.6E+07	25	6	62	19
Fresca	2.6E+07	25	8	84	21
Fresca	2.6E+07	25	10	90	17
Fresca	2.6E+07	100	6	87	27
Fresca	2.6E+07	100	8	82	22
Fresca	2.6E+07	100	10	88	17

Mar	2.6E+07	0	6	35	15
Mar	2.6E+07	0	8	30	16
Mar	2.6E+07	0	10	53	15
Mar	2.6E+07	25	6	89	25
Mar	2.6E+07	25	8	88	24
Mar	2.6E+07	25	10	87	22
Mar	2.6E+07	100	6	90	29
Mar	2.6E+07	100	8	88	26
Mar	2.6E+07	100	10	86	86

Tabla 10. Composición mineralógica del mineral usado por Leiva (2022) proveniente del yacimiento Inca de Oro.

Mineral	Fórmula química	Muestra 1, %	Muestra 2, %
Calcopirita	CuFeS_2	7.403	4.16
Calcosina	Cu_2S	0.191	0.08
Covelina	CuS	0.007	0.0235
Bornita	Cu_5FeS_4	0.024	0.0261
Cu G	$\text{Cu}_{11}\text{Fe}^{2+}\text{As}_4\text{S}_{13}$	0.287	0.18
Enargita	Cu_3AsS_4	0.105	0.04
Atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	0.1	0.05
Copper Wad	Óxidos de Mn, Cu, Si	0.242	0.2
Pirita	FeS_2	4.794	2.43
Magnetita	Fe_3O_4	0.01	-
Hematita	Fe_2O_3	0.08	0.09
Limonita	$\text{FeO}(\text{OH})$	0.18	0.38
Rutilo	TiO_2	0.17	0.18
Arcilla	$\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_3$	4.1	4.12
Anhidrita	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	0.76	0.56
Illita	$\text{K}_{0.6}(\text{H}_3\text{O})_{0.4}\text{Al}_{1.3}\text{Mg}_{0.3}\text{Fe}_{0.1}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})$	20.25	18.51
Siderita	FeCO_3	2.08	1.8
Sericita	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_{1.8}\text{F}_{0.2}$	6.48	5.74
Cuarzo	SiO_2	38.34	42.94
Feldespató	$\text{NiAlSi}_3\text{O}_8$	4.1	11.81
Circón	ZrSiO_4	-	0.01
Turmalina	$\text{NaFe}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$	9.96	6.49