

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante

Dr. Leopoldo Gutiérrez

**“EFECTO DE LA PRESENCIA DE MICAS BIOTITA Y MUSCOVITA
SOBRE LA FLOTACIÓN DE CALCOPIRITA EN AGUAS CON DISTINTA
SALINIDAD”**



FLORENCIA VALENTINA MARTÍNEZ NAVARRETE

Informe de Memoria de Título

para optar al Título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Marzo 2018

AGRADECIMIENTOS

Termina esta larga etapa universitaria, etapa que a momentos parecía que nunca acabaría, sin duda fue un camino difícil pero lleno de aprendizaje y crecimiento. En este momento no me queda más que agradecer infinitamente a mi familia. A mi mamá por dar todo y más, por mí y mis hermanos, por todo su esfuerzo y sacrificio por nosotros, este logro es sin duda gracias a ella. A mis hermanos y “el tío”, por siempre apoyarme y estar presentes cuando los necesité. A mi abuela, quien me acompañó durante toda la vida y en gran parte de este proceso, estoy segura que hoy estaría orgullosa. A Gabriel por acompañarme a lo largo de casi toda esta etapa, por darme ánimo y contención cuando fue necesario, y por apoyarme en todo siempre.

Quisiera agradecer también a mis amigos de la universidad por todos los buenos momentos vividos en este proceso. A mi amiga Cami con quien nos acompañamos mutuamente en todos los procesos que nos tocó vivir, buenos y malos, y que solo nosotras sabemos todo lo que nos costó llegar aquí. A mis compañeros del laboratorio de flotación, de pregrado y postgrado, por los momentos de risas, las buenas conversaciones y por siempre estar dispuestos a ayudar y dar una palabra de aliento.

Agradezco también a mi profesor Patrocinante, Dr. Leopoldo Gutiérrez, por su constante apoyo y preocupación durante todo el periodo de realización de éste trabajo, por su paciencia y buena disposición, por las oportunidades de aprendizaje y crecimiento, además de la enseñanza entregada tanto en lo académico como en lo cotidiano.

“No eres lo que logras, eres lo que superas”

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo general estudiar el efecto que tiene la presencia de las micas biotita y muscovita en la flotación de calcopirita de alta pureza en diferentes medios acuosos y a distintos valores de pH, esto se realizó mediante pruebas de micro-flotación, pruebas de medición de turbidez, tiempo de inducción, pruebas de reología y pruebas de micro-flotación con control de potencial redox. Las pruebas de micro-flotación arrojaron como resultado que la presencia de las micas biotita y muscovita no tienen un efecto negativo significativo en la flotabilidad de calcopirita en solución 0.01 M NaCl y agua en presencia de iones en todo el rango de pH, mientras que en agua de mar el efecto fue similar hasta pH 10, donde sobre este pH se notó una disminución en la recuperación de calcopirita la cual se vio acrecentada por la presencia de micas. Las pruebas de medición de turbidez por su parte indicaron que no existe efecto slime coating entre las partículas de calcopirita y las partículas de micas en ningún medio acuoso estudiado, lo que se correlaciona con los obtenidos en micro-flotación, y reafirma la teoría de que no existe interacción entre mineral y mica. Los resultados de tiempo de inducción en agua de mar y agua destilada no se vieron alterados por la presencia de muscovita en la suspensión, obteniéndose tiempos de inducción bastante similares a los obtenidos para calcopirita. Mientras que la presencia de biotita provoca una disminución en el tiempo de inducción entre las partículas de calcopirita y las burbujas. Por otra parte, los resultados obtenidos en las pruebas de reología indicaron que las micas no tienen un comportamiento reológico dependiente del pH, además de no presentar efecto alguno la presencia de iones en solución sobre la viscosidad de la suspensión. Finalmente, las pruebas de micro-flotación con control de potencial redox realizadas en agua de mar mostraron que a potenciales oxidantes la disminución en la recuperación de calcopirita se ve acrecentada por la presencia de micas. Mientras que a potenciales reductores el efecto que se observa es un aumento en la recuperación de calcopirita en presencia de ambas micas.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivo general	2
1.2	Objetivos específicos	2
2.	ANTECEDENTES TEÓRICOS	3
2.1	Fundamentos de flotación	3
2.2	Filosilicatos	5
2.2.1	Grupo de las micas	6
2.3	Calcopirita	12
2.4	Influencia de partículas finas en el proceso de flotación	13
2.5	Agua de mar y sus complicaciones	16
2.5.1	Efecto buffer	17
2.5.2	Efecto depresante	18
2.6	Reología de suspensiones	20
2.6.1	Reología en flotación	22
2.7	Potencial redox	24
2.7.1	Control de potencial en flotación de calcopirita	25
3.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	27
3.1	Materiales y reactivos	27
3.1.1	Muestras minerales	27
3.1.2	Reactivos	29
3.2	Equipos y Procedimiento	30
3.2.1	Pruebas de micro-flotación	30
3.2.2	Pruebas de turbidez	32
3.2.3	Pruebas de tiempo de inducción	34

3.2.4	Pruebas de reología.....	36
3.2.5	Pruebas de micro-flotación con control de potencial redox.....	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
4.1	Micro-flotaciones	39
4.1.1	Agua destilada 0.01M NaCl.....	39
4.1.2	Agua de Mar.....	40
4.1.3	Iones	42
4.2	Turbidez	45
4.2.1	Biotita	45
4.2.2	Muscovita	47
4.3	Tiempo de inducción	49
4.4	Reología	52
4.5	Micro flotaciones con control de potencial redox.....	54
5.	CONCLUSIONES.....	58
6.	RECOMENDACIONES.....	60
7.	BIBLIOGRAFÍA	61
8.	ANEXOS	67
8.1	Micro flotaciones con variación de porcentaje de micas.....	67
8.2	Pruebas de turbidez en presencia de iones.....	71
8.3	Pruebas de reología.....	79
8.3.1	Reogramas para suspensión de biotita	79
8.3.2	Reogramas para suspensión de muscovita	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Interacción partícula burbuja [Gutiérrez, 2016].	3
Figura 2.	Adsorción de colector sobre una partícula mineral [Gutiérrez, 2016].	4
Figura 3.	Esquema de adsorción de espumantes [Gutiérrez, 2016].	4
Figura 4.	a) Estructura de la capa tetraédrica; b) Estructura de la capa octaédrica [Klein y Dutrow, 2008]	5
Figura 5.	Estructura cristalina de biotita y muscovita [Nelson, 2015]	6
Figura 6.	Esquema estructura cristalina de biotita [Biedermann et al., 2014].	7
Figura 7.	Medición de potencial zeta de biotita [Adaptado de Rao et al, 1995].	8
Figura 8.	Efecto del pH en la flotación de biotita en ausencia y presencia de goma guar [Rath et al., 1997].	9
Figura 9.	Estructura cristalina de la muscovita [Biedermann et al., 2014].	10
Figura 10.	Estimación potencial zeta de muscovita [Adaptado de Rao et al, 1995].	11
Figura 11.	Medición potencial zeta calcopirita [Mitchell et al., 2005].	12
Figura 12.	Recuperación de cobre en función del tamaño de partícula [Adaptado Bulatovic, 2007].	13
Figura 13.	Esquema efecto slime coating [Cortes, 2016].	14
Figura 14.	Consumo de cal en función del pH, para agua fresca y agua de mar [Castro, 2012].	18
Figura 15.	Diagrama de formación de especies para calcio [Liu et al., 2015].	19
Figura 16.	Diagrama de formación de especies para magnesio [Liu et al., 2015].	19
Figura 17.	Diagrama esquemático del esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para diferentes fluidos [Gutiérrez, 2016].	21
Figura 18.	Esquema ilustrativo del efecto del pH sobre la tensión de fluencia de Bingham respecto a la asociación de partículas en un mineral de arcilla en capas [Adaptado de Rand y Melton, 1977].	22

Figura 19.	Diagrama de Pourbaix de cobre.....	24
Figura 20.	Flotabilidad de calcopirita en función del potencial de pulpa a pH 10 [Guo et al., 2003].	25
Figura 21.	Medición de ángulo de contacto de calcopirita a pH 10 y pH 7 [Guo et al., 2003].	26
Figura 22.	Muestra de calcopirita.....	27
Figura 23.	a) Muestra de biotita; b) Muestra de muscovita.	28
Figura 24.	Etapa de acondicionamiento para micro-flotación.	30
Figura 25.	Equipo de micro-flotación.	32
Figura 26.	Esquema para evaluar efecto slime coating.....	33
Figura 27.	Turbidímetro HACH 2100N.	34
Figura 28.	Esquema de medición de tiempo de inducción.....	35
Figura 29.	Gráfica ejemplificativa de cómo obtener el tiempo de inducción.	35
Figura 30.	Viscosímetro Haake RV-20.....	37
Figura 31.	Etapa de acondicionamiento con control de potencial redox.	38
Figura 32.	Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua destilada 0.01M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	40
Figura 33.	Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.	41
Figura 34.	Efecto de la presencia de biotita en la recuperación de calcopirita en soluciones que contienen 10700 ppm Na ⁺ ; 400 ppm K ⁺ ; 400 ppm Ca ⁺² ; 1300 ppm Mg ⁺² ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.	43
Figura 35.	Efecto de la presencia de muscovita en la recuperación de calcopirita en soluciones que contienen 10700 ppm Na ⁺ ; 400 ppm K ⁺ ; 400 ppm Ca ⁺² ; 1300 ppm Mg ⁺² ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.	44

Figura 36. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en agua destilada 0.01M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	45
Figura 37. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	46
Figura 38. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	47
Figura 39. Turbidez de la suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	48
Figura 40. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en el tiempo de inducción en agua destilada 0.01M NaCl; 0.1 ppm PAX.....	49
Figura 41. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en el tiempo de inducción en agua de mar; 0.1 ppm PAX.....	50
Figura 42. Esfuerzo de cedencia en función del pH para una suspensión de 57% p/p de biotita en distintos medios acuosos; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	52
Figura 43. Esfuerzo de cedencia en función del pH para una suspensión de 57% p/p de muscovita en distintos medios acuosos; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.....	53
Figura 44. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar en función del potencial de la pulpa; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.	55
Figura 45. Efecto de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar en función del potencial de la pulpa; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.	56
Figura 46. a) Colchón de espuma de calcopirita en presencia de biotita; b) Colchón de espuma en presencia de muscovita; c) Colchón de espuma de calcopirita en ausencia de micas.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Distribución iónica del agua de mar [Castro y Huber, 2003].	16
Tabla 2.	Composición química y mineralógica de la muestra de calcopirita.	28



NOMENCLATURA

ms: milisegundos.

M: Molaridad.

NTU: Unidad nefelométrica de turbidez.

% p/p: Porcentaje peso-peso.

Pa: Pascales.

mV: miliVolts.

SHE: Electrodo estándar de hidrógeno.

SCE: Electrodo estándar de calomel.



1. INTRODUCCIÓN

En Chile uno de los principales sustentos económicos es la industria minera, la cual a lo largo de los años se ha ido enfrentando a variadas problemáticas relacionadas al agotamiento de los recursos hídricos y minerales principalmente. El agotamiento del recurso hídrico se debe a que en Chile la industria minera se ubica principalmente en la zona norte del país, donde por la geografía y el clima árido que lo caracteriza es una zona mayormente seca. Además es sabido que la industria minera utiliza grandes cantidades de agua en sus procesos, es por esto que se ha estudiado utilizar agua de mar en lugar de agua potable, ya sea natural o desalinizada. La utilización de agua de mar trae consigo problemáticas debido a la concentración de electrolitos libres que ésta posee. Adicionalmente, en relación al proceso de flotación, el uso de agua de mar requiere de estudios que indiquen las condiciones de operación más favorables y el tipo de reactivos óptimos para obtener recuperaciones iguales o superiores a las obtenidas actualmente con utilización de agua dulce.

Por otra parte, debido al agotamiento de los recursos minerales, la industria minera se ha visto obligada a tratar menas de menor ley, con una mineralogía más compleja y un alto porcentaje de ganga, en la cual se encuentran comúnmente filosilicatos. La presencia de estos minerales que en general se encuentran asociados a especies valiosas trae consigo una serie de problemáticas en algunas etapas del proceso, como son molienda-clasificación, flotación, espesamiento y filtración. La naturaleza blanda de los filosilicatos conduce a producir altos niveles de partículas finas durante la etapa de molienda, las cuales afectan de manera directa los procesos consecutivos.

Debido a todo lo descrito anteriormente se han realizado numerosos estudios sobre el uso de agua de mar y el efecto que tienen los minerales de arcilla, los cuales son un subgrupo de los filosilicatos, en el proceso de flotación y sobre las formas de tratamiento para reducir su impacto negativo en el proceso. El grupo de los filosilicatos se divide en varios subgrupos donde además del grupo de las arcillas se encuentra el grupo de las micas. Es por esto que en este estudio se ha propuesto estudiar el efecto de las micas, específicamente biotita y muscovita, en el proceso de flotación de calcopirita en distintos medios acuosos.

1.1 Objetivo general

Este trabajo tuvo como objetivo general estudiar el efecto que tienen las micas biotita y muscovita en la flotación de calcopirita de alta pureza a distintos valores de pH, en agua con distintas concentraciones iónicas, utilizando como colector PAX (amil xantato de potasio) y como espumante MIBC (metil isobutil carbinol).

1.2 Objetivos específicos

- Estudiar mediante pruebas de micro-flotación el efecto que tiene la presencia de micas en la recuperación de calcopirita de alta pureza en un rango determinado de pH y agua con distintas concentraciones iónicas.
- Estudiar, si existe, el efecto de slime coating mediante pruebas de turbidez en agua con distintas concentraciones iónicas y en un rango determinado de pH.
- Estudiar a través de pruebas de tiempo de inducción el efecto de la presencia de micas en la adhesión partícula-burbuja en agua con distinta concentración iónica en un rango determinado de pH.
- Estudiar la influencia que tiene la presencia de micas en la viscosidad de la pulpa, mediante pruebas de reología a distintos pH y en agua con distinta salinidad.
- Estudiar el efecto que tiene la variación del potencial de la pulpa en la recuperación de calcopirita, en agua de mar a distintos pH.

2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1 Fundamentos de flotación

El proceso de flotación constituye uno de los principales métodos de concentración de minerales utilizados actualmente. Éste se basa en la diferencia de las propiedades físico-químicas en la superficie de las partículas, y consiste en adherir de forma selectiva burbujas de gas a partículas minerales (Figura 1), esto con el fin de separar estas partículas de la ganga, formando así un concentrado rico en el mineral de interés. Las partículas que no son colectadas en el concentrado se eliminan en una corriente denominada cola de flotación.

El proceso de flotación se basa en la hidrofobicidad de las partículas minerales, característica que permite que las partículas repelan el agua de su superficie y por consiguiente reduce su mojabilidad. En la naturaleza existen minerales que presentan hidrofobicidad natural y por lo tanto una buena flotabilidad debido a que forman agregados partícula-burbuja estables. Los minerales que no presentan esta característica se denominan hidrofílicos y corresponden a aquellos que sus partículas tienen una alta interacción con moléculas de agua, es decir, se mojan con facilidad. En el caso de estos minerales es necesario modificar sus propiedades superficiales mediante la adición de reactivos.

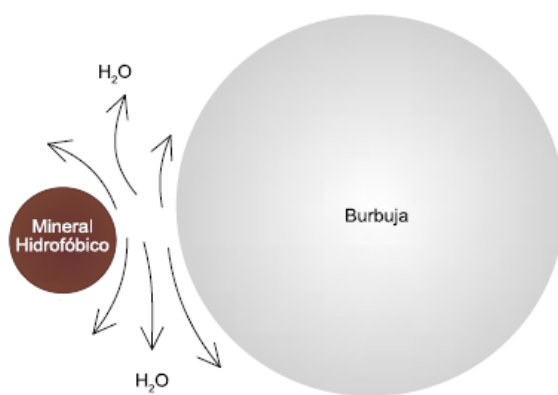


Figura 1. Interacción partícula burbuja [Gutiérrez, 2016].

Para que ocurra la flotación, es necesario que las partículas se adhieran a las burbujas y logren formar un agregado estable que sea capaz de llegar a la superficie. Existen reactivos que se pueden adicionar al proceso de flotación y que crean condiciones favorables para que el proceso sea efectivo. Estos reactivos pueden ser colectores (Figura 2), los que proporcionan propiedades hidrófobas a la superficie del mineral de interés; espumantes (Figura 3), que se encargan de estabilizar la espuma, reducir el tiempo de inducción y generar burbujas pequeñas proporcionando así una mayor área de contacto partícula-burbuja; y modificadores, que tienen como función modificar las propiedades fisicoquímicas del sistema para así optimizar el proceso de flotación.

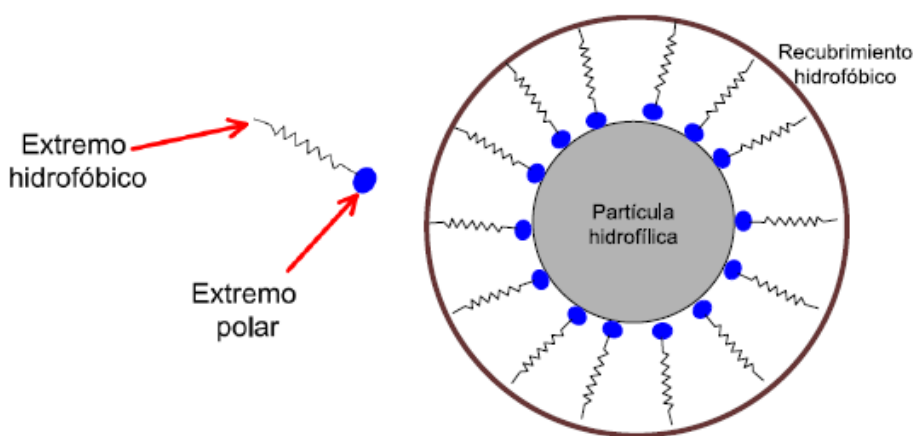


Figura 2. Adsorción de colector sobre una partícula mineral [Gutiérrez, 2016].

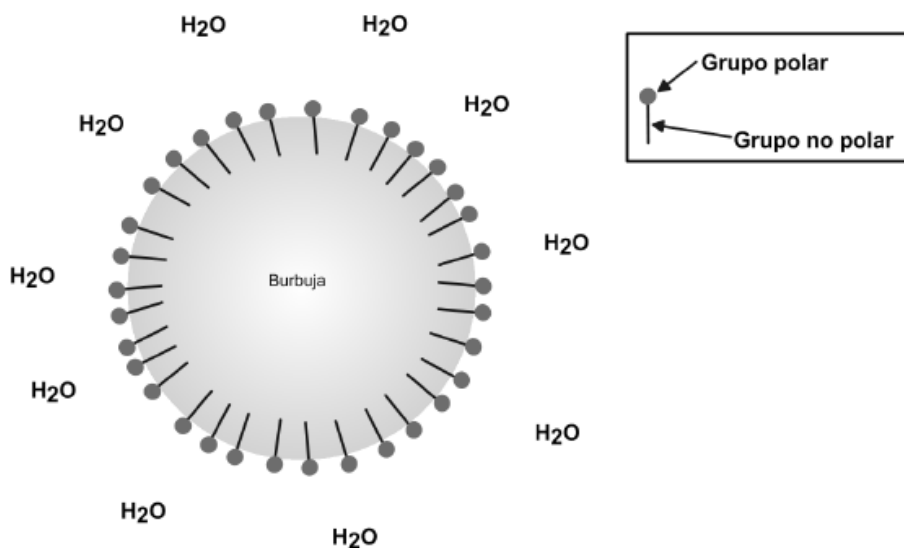


Figura 3. Esquema de adsorción de espumantes [Gutiérrez, 2016].

2.2 Filosilicatos

Los filosilicatos son una subclase de los silicatos, caracterizados principalmente por su hábito hojoso o escamoso derivado de su exfoliación basal perfecta. Los minerales de filosilicatos comprenden capas tetraédricas "T" y octaédricas "O" que son los componentes clásicos de este grupo. La capa tetraédrica consiste de tetraedros de sílice (SiO_4)⁻⁴ enlazados por tres de sus cuatros oxígenos, la unión de los tetraedros determina la formación de una capa tetraédrica que presenta 4 cargas negativas (Figura 4a). Por otra parte, la capa octaédrica está formada por grupos (OH^-) que compensan sus cargas con aluminio o magnesio (Figura 4b). Mediante un mecanismo de expulsión de grupos (OH^-) esta capa se une con la capa tetraédrica para neutralizar las cargas libres.

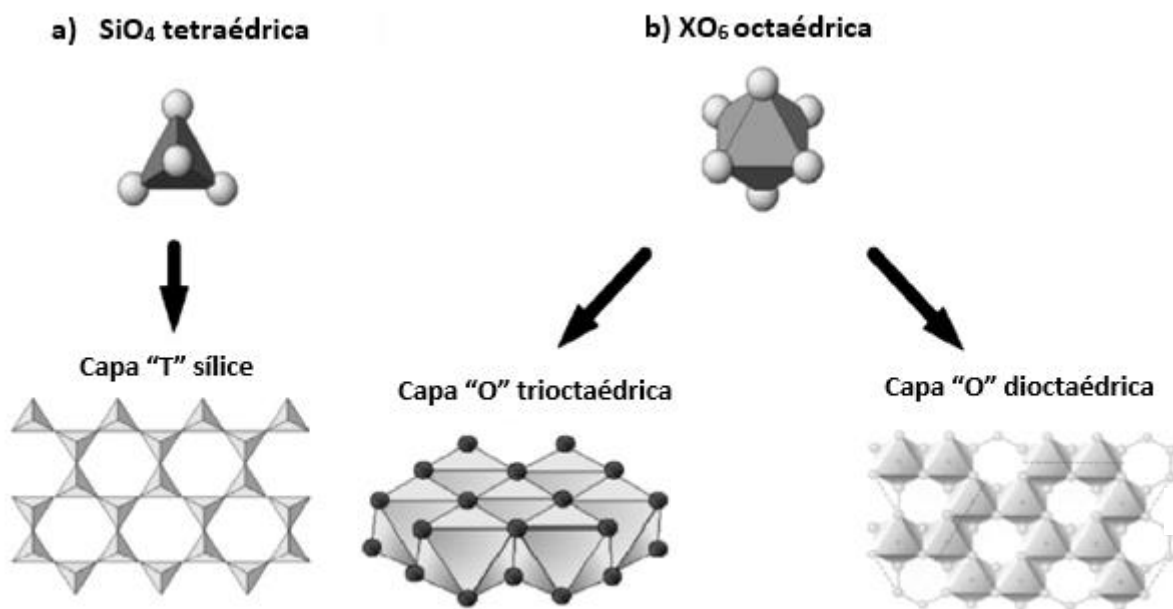


Figura 4. a) Estructura de la capa tetraédrica; b) Estructura de la capa octaédrica [Klein y Dutrow, 2008]

Las variaciones de las configuración de las capa "T" y "O" producen minerales de estructura similar, pero con diferentes propiedades físicas y químicas. En consecuencia, ha habido muchas clasificaciones del grupo de los filosilicatos. La clasificación del grupo de los filosilicatos utilizada en este trabajo corresponde a la hecha por Klein & Hurlbut (1993), en la que se reconocen cuatro grupos; grupo de la serpentina, grupo de la clorita, grupo de las arcillas y grupo de las micas, de estos el grupo de las arcillas es el más común en minerales de cobre, bitumen, oro y carbón entre otros minerales valiosos [Kelm et al., 2013].

2.2.1 Grupo de las micas

Los minerales del grupo de las micas se caracterizan por estar formados por láminas T-O-T y cationes interlaminares. Cristalizan en el sistema monoclinico en cristales tabulares con planos basales bien desarrollados. Todos los cristales presentan exfoliación basal perfecta y dureza 2-3 en la escala de Mohs. Estructuralmente este grupo se forma cuando de un filosilicato 2:1, uno de cada cuatro silicios de la capa tetraédrica es sustituido por un aluminio, creándose así, una carga negativa que se compensa por la entrada de un catión en el espacio interlaminar. Cuando el catión que entra a compensar la carga es el K^+ se forman la biotita y la muscovita con Mg^{+2} o Al^{+3} respectivamente. Las micas más importantes por su abundancia en las rocas son la muscovita y la biotita (Figura 5).

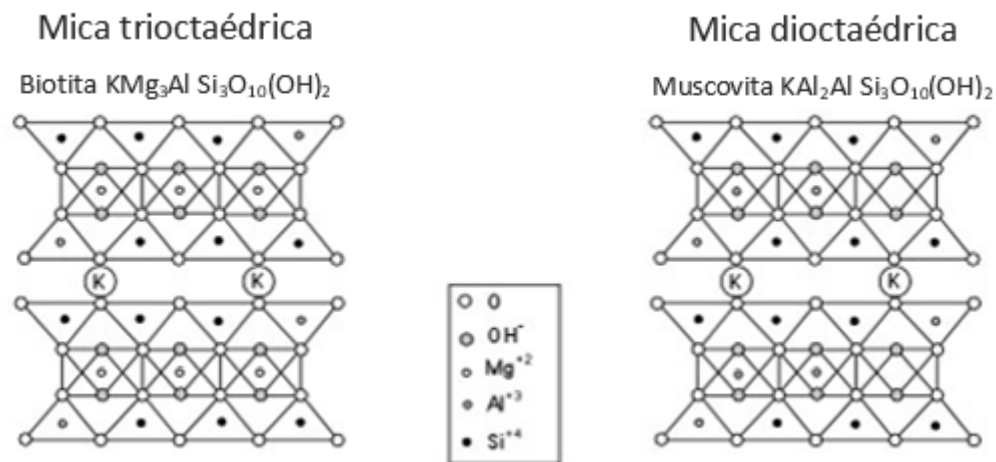


Figura 5. Estructura cristalina de biotita y muscovita [Nelson, 2015]

2.2.1.1 Biotita

La biotita se clasifica como un filosilicato 2:1 y en su estructura se distinguen tres capas (T-O-T). Es una mica trioctaédrica, que tiene una estructura formada por dos bloques básicos; capas tetraédricas, formada por tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$, y capas octaédricas, que comparten aristas (Figura 6). En la capa tetraédrica cada tetraedro comparte tres vértices con los tetraedros vecinos, los vértices no compartidos apuntan hacia el mismo lado. La capa octaédrica está compuesta por una serie de octaedros que comparten aristas con grupos $(\text{OH})^-$ o con átomos de oxígeno en los vértices. Los tetraedros están ocupados principalmente por silicio y aluminio, dando una deficiencia de carga a los tetraedros y una carga negativa a la capa. Los octaedros por su parte son ocupados principalmente por cationes divalentes. Para la biotita los principales cationes en el octaedro son Mg^{+2} y Fe^{+2} y la intercalación es potasio (K^+).

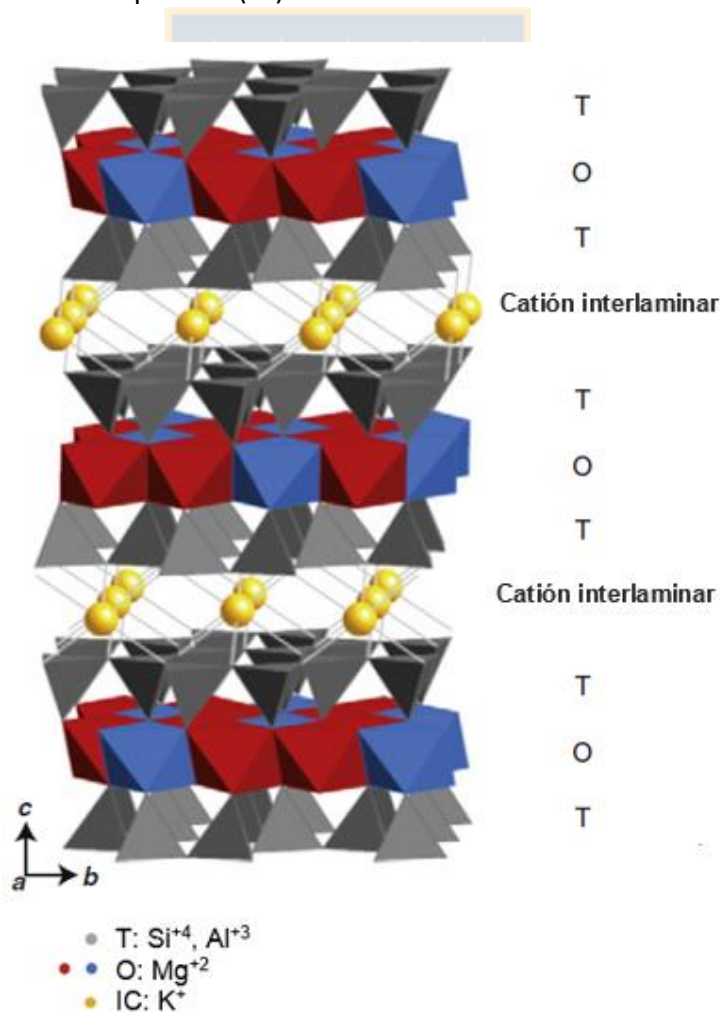


Figura 6. Esquema estructura cristalina de biotita [Biedermann et al., 2014].

Estudios realizados sobre potencial zeta de biotita en agua han indicado que ésta presenta carga superficial negativa en todo el rango de pH básico. El punto isoeléctrico de la biotita es cercano a pH 3 (Figura 7). Este mismo estudio reveló que el potencial zeta de la biotita se ve afectado por la presencia de colectores en solución, en el caso estudiado colectores tipo amina producían un aumento en el potencial zeta de biotita mientras que cuando se utilizaba oleato éste producía una disminución en el potencial zeta de biotita.

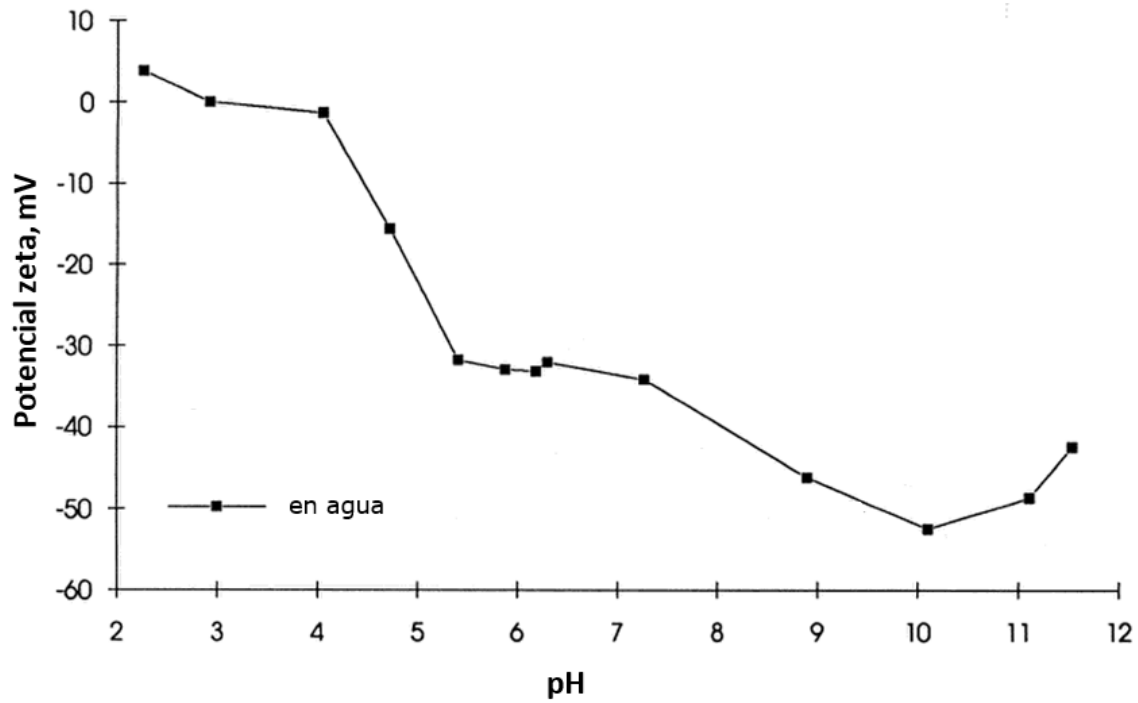


Figura 7. Medición de potencial zeta de biotita [Adaptado de Rao et al, 1995].

En la literatura se ha establecido que la flotación de biotita depende del grado de alteración de ésta. La flotación de biotita tiene dos máximos, flota en condiciones muy ácidas o bajo un pH ligeramente alcalino cuando se usa dodecilamina. Se ha sugerido que la flotación de biotita depende de la intemperie en que ha ocurrido, así que cuando se utilizan colectores catiónicos el material altamente degradado flota a pH 1 y la parte no meteorizada a pH 7. Mientras que un estudio realizado por Rath y Subramanian sobre el uso de goma guar como depresante en la flotación de biotita indica que la biotita tiene una buena flotabilidad natural y ésta no depende del pH (Figura 8).

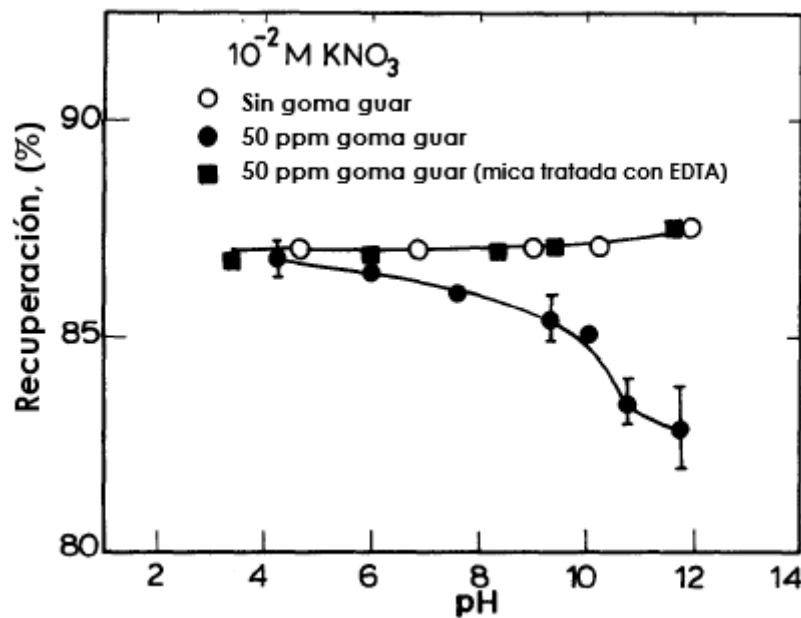


Figura 8. Efecto del pH en la flotación de biotita en ausencia y presencia de goma guar [Rath et al., 1997].

2.2.1.2 Muscovita

La muscovita es una de las micas más comunes y sus propiedades físicas la hacen útil en un amplio rango de aplicaciones, tales como aisladores, plásticos, productos cosméticos y pinturas. Esta mica se produce en una amplia variedad de entornos geológicos. La muscovita se puede clasificar como una mica dioctaédrica, es decir, los octaedros contienen iones trivalentes como Al^{+3} y sólo 2/3 de los octaedros son ocupados, y tienen una configuración 2:1, en su estructura se distinguen tres capas (T-O-T), una octaédrica y dos tetraédricas las que están unidas por K^+ por enlaces débiles (Figura 9). En la muscovita una cuarta parte de los sitios tetraédricos están ocupados aleatoriamente por aluminio y tres cuartas partes por silicio.

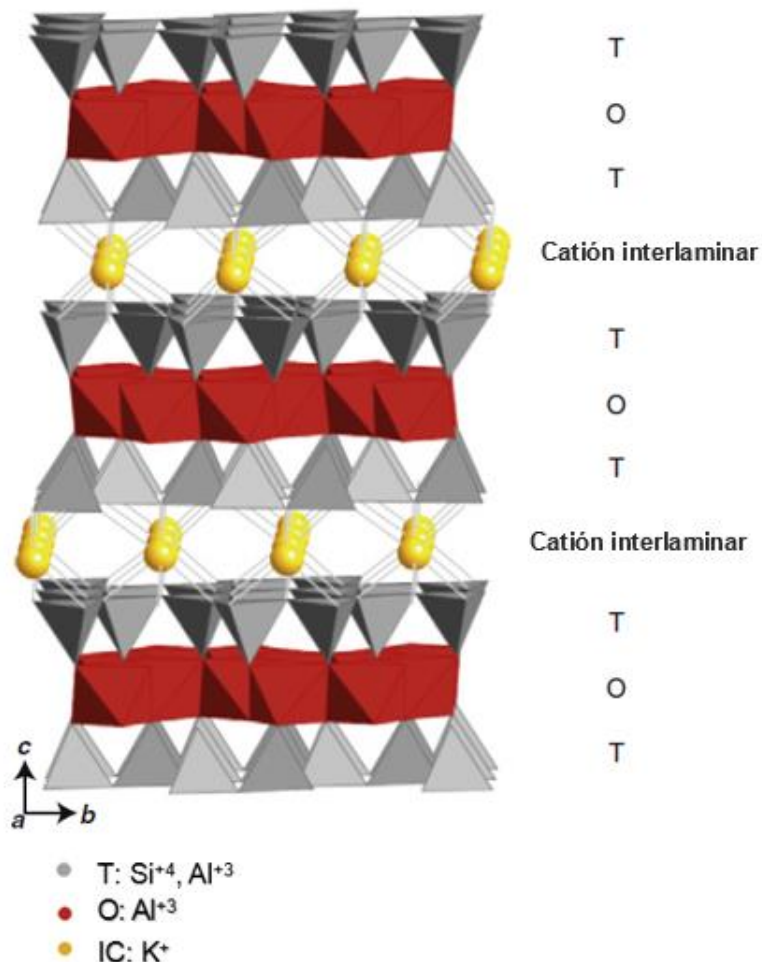


Figura 9. Estructura cristalina de la muscovita [Biedermann et al., 2014].

Dentro de la estructura de la muscovita pueden ocurrir remplazos isomórficos de iones presentes en su estructura por iones que se encuentran en solución. Dentro de los principales reemplazos isomórficos que ocurren se encuentran los siguientes:

- Para K: Na, Rb, Cs, Ca, Ba
- Para Al octaédrico: Mg, Fe^{+2} , Fe^{+3} , Mn, Li, Cr, Ti, V
- Para (OH): F

La muscovita ha demostrado tener permanente carga superficial negativa en sus planos basales o caras, mientras que sus bordes presentan distinta carga superficial dependiente del pH. La superficie de la cara presenta una carga superficial negativa desde pH 2 en adelante, similar a la carga superficial que presenta la sílice (Figura 10). Mientras que los bordes, que representan el 5-10% de la carga superficial total tienen un IEP en el rango de pH 5 a 7.5. Esto resulta en un mineral que tiene un punto de cero carga comúnmente a pH cercano a 4.

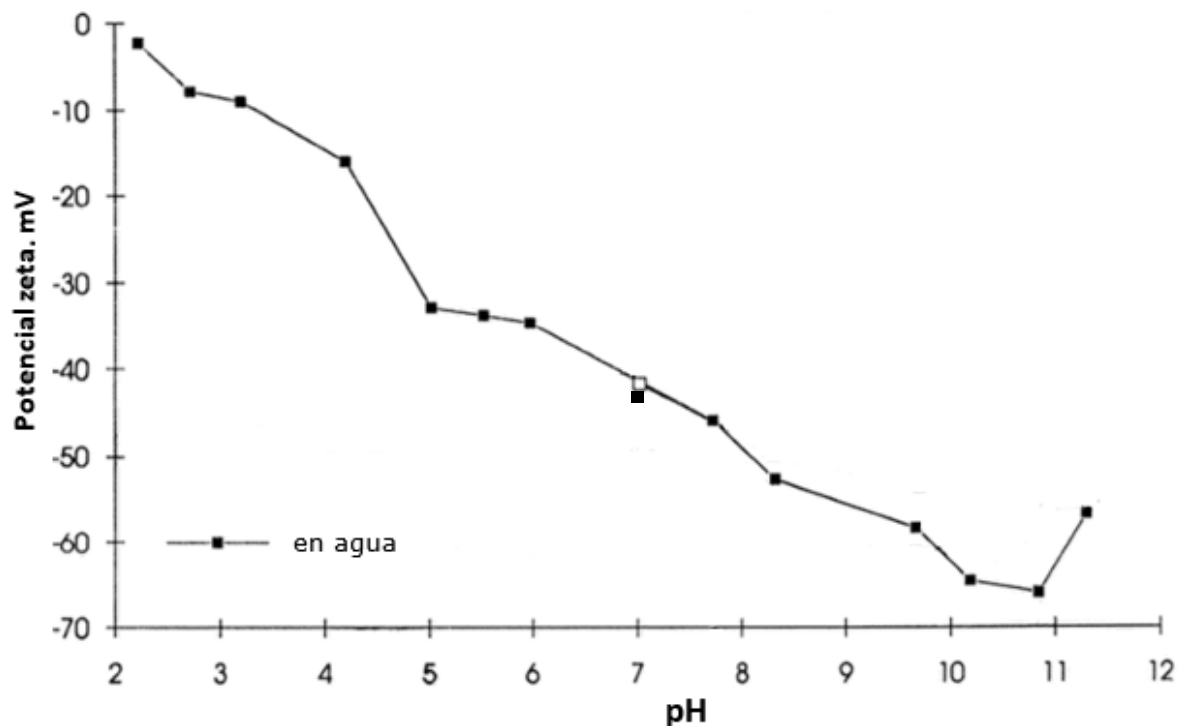


Figura 10. Estimación potencial zeta de muscovita [Adaptado de Rao et al, 1995].

Estudios realizados sobre el potencial zeta de la muscovita, han revelado que una muestra de mica muy fina aumentaría la dependencia del pH del potencial zeta debido al aumento de las relaciones borde/cara [Rao et al, 1995].

2.3 Calcopirita

La calcopirita es un mineral que se presenta en la naturaleza como sulfuro de cobre, éste es uno de los principales constituyentes de los yacimientos de cobre. La fórmula química de la calcopirita es CuFeS_2 , con una composición de 35.5% Cu, 30.5% Fe y 35% S. La calcopirita tiene una densidad de 4.2 g/cm^3 y según la escala de Mohs presenta una dureza de 3-3.5.

En la Figura 11 se muestra la curva de potencial zeta de la calcopirita en función del pH, aquí se puede observar que la calcopirita tiene carga superficial positiva a pH bajo 5.5, mientras que en todo rango de pH básico posee carga superficial negativa ($\text{pH} > 5.5$), esto indica que el IEP de la calcopirita se encuentra a pH 5.5 [Mitchell et al., 2005].

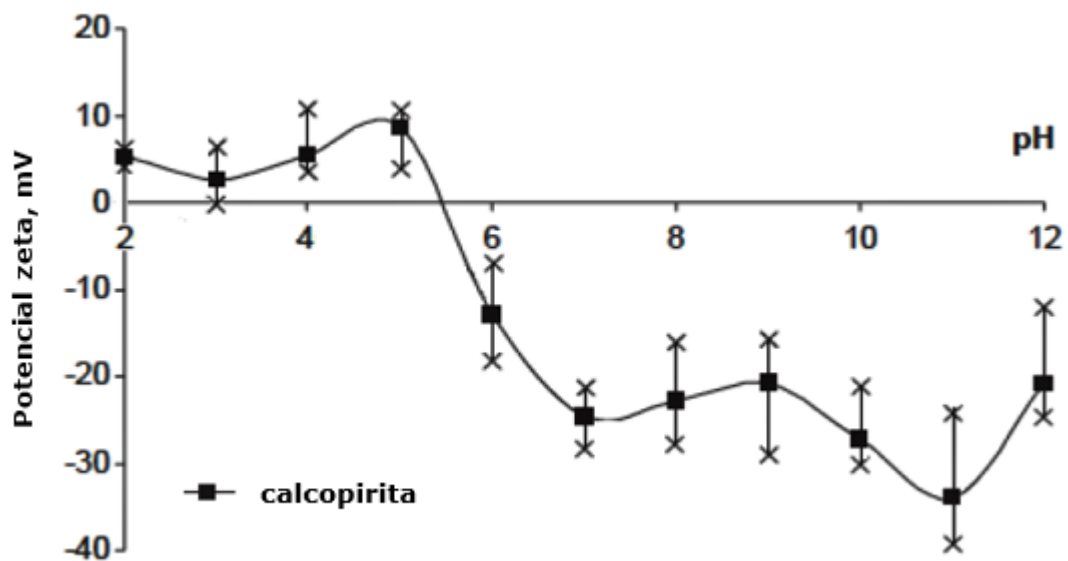


Figura 11. Medición potencial zeta calcopirita [Mitchell et al., 2005].

2.4 Influencia de partículas finas en el proceso de flotación

El tamaño de partícula del mineral es un parámetro importante en el proceso de flotación. Wyslouzil et al. (2009) indican que la eficiencia del proceso se ve impactada negativamente cuando se opera en los extremos, es decir, con partículas finas (<10 micrones) o partículas gruesas (>250 micrones). Bulatovic (2007) presenta un estudio realizado en tres plantas concentradoras de América del Sur, en este estudio se muestra la influencia del tamaño de partícula en la recuperación de cobre (Figura 12).

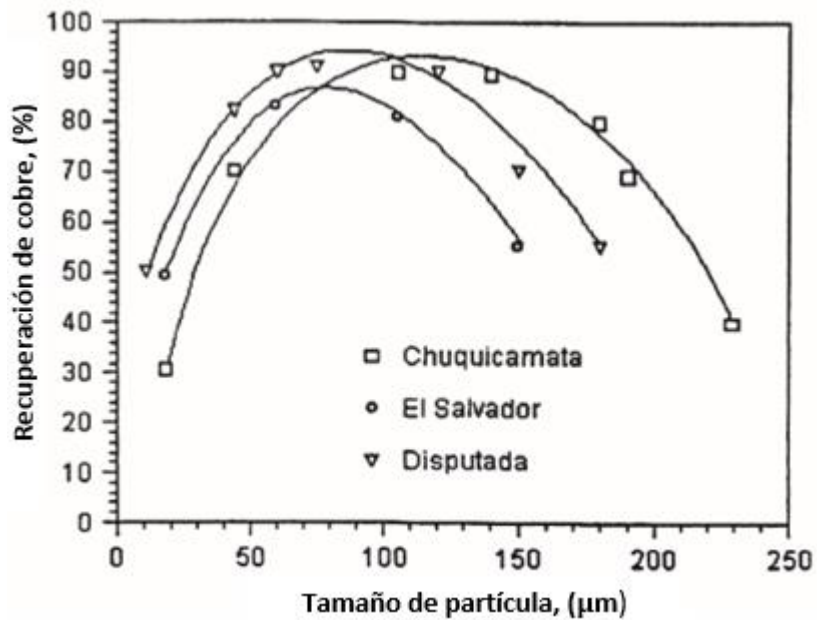


Figura 12. Recuperación de cobre en función del tamaño de partícula [Adaptado Bulatovic, 2007].

Se observa que en las fracciones de partículas finas (<20 μm) la recuperación cae a valores inferiores al 50%, mientras que en el extremo opuesto para partículas gruesas (> 150 μm) la recuperación de cobre también es menor al 50%.

El tamaño de partícula afecta los procesos físicos de colisión, adhesión, y desadhesión entre las partículas y las burbujas. La presencia de partículas finas en la pulpa mineral genera diversos efectos perjudiciales en el proceso de flotación. Según estudios realizados, se ha demostrado que los principales problemas son: el recubrimiento de partículas valiosas (slime coating), aumento en el consumo de reactivos, generan cambios en la reología de la pulpa, generan un recubrimiento en las

burbujas y desestabilizan la espuma [Arnold & Aplan, 1986; Forbes et al., 2014; Wang et al., 2015; Yu et al., 2015].

❖ Slime coating

El slime coating se relaciona con el recubrimiento hidrofílico, fenómeno que se caracteriza por generar un efecto negativo en la flotación de minerales. Este efecto se produce cuando partículas muy finas se adhieren a la superficie de partículas de mayor tamaño recubriéndolas parcial o totalmente (Figura 13). Este recubrimiento provoca que las propiedades superficiales de la partícula que fue recubierta se vean inhibidas, esto impide la acción de los reactivos sobre las partículas valiosas. En estudios realizados sobre la flotación de calcopirita en presencia de minerales de arcilla [Cortes, 2016; Melipichún, 2014] se ha demostrado que las partículas de arcillas se adhieren a la superficie de las partículas de calcopirita formando un recubrimiento hidrofílico impidiendo la acción del colector y la adhesión de burbujas a las partículas valiosas, trayendo esto consecuencias directas en la recuperación del mineral. Este efecto está asociado a la carga superficial de las especies y a las fuerzas de atracción o repulsión que se generan en la suspensión.

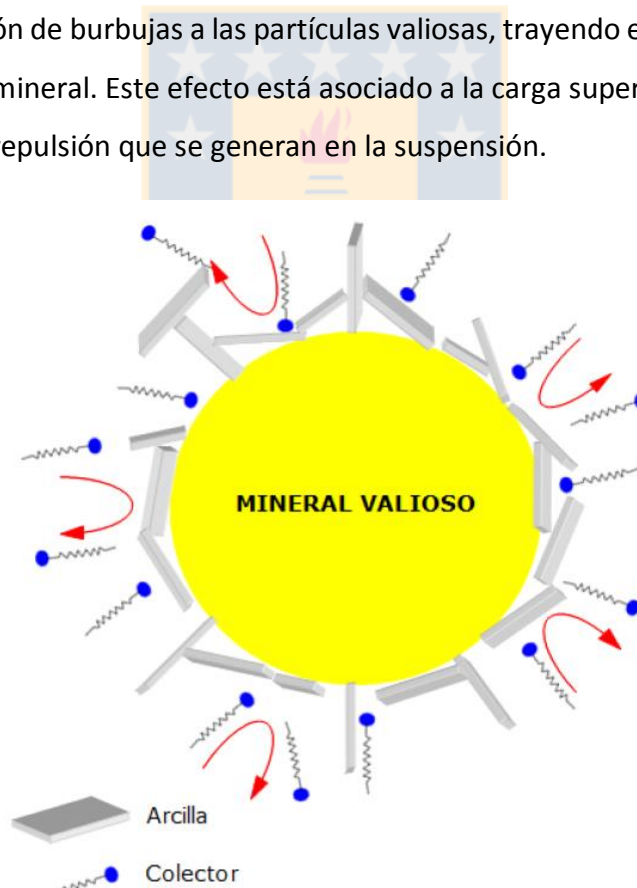


Figura 13. Esquema efecto slime coating [Cortes, 2016].

❖ Aumento del consumo de reactivos

Cuando las partículas finas se encuentran como partículas individuales en la pulpa adsorben gran cantidad de reactivos debido a que generan un aumento en el área superficial. Es por esto que la cantidad de reactivo disponible para actuar sobre el mineral de interés y sobre las burbujas se ve altamente disminuido provocando esto una disminución en la recuperación y una desestabilización de la espuma [Connelly, 2011].

❖ Cambios en la reología de la pulpa

La presencia de partículas finas impacta en la reología de la pulpa provocando efectos negativos en la etapa de flotación. Los cambios que estas partículas provocan son principalmente en la viscosidad de la pulpa debido a la floculación de partículas finas, el aumento de la viscosidad inhibe la posibilidad de colisión entre las burbujas y las partículas valiosas, debido a que el film líquido que los separa es más difícil de desplazar [Forbes et al., 2014].

Además de lo mencionado anteriormente, el aumento de la viscosidad de la pulpa provoca que la movilidad de los agregados partícula-burbuja hacia la superficie de la celda se vea disminuida, lo que afecta directamente en la recuperación. Estudios realizados por Forbes et al. (2014) indican que la disminución en la recuperación de mineral valioso a causa de aumento de la viscosidad tendría magnitudes similares a la disminución generada por el efecto slime coating.

2.5 Agua de mar y sus complicaciones

La zona minera en Chile se concentra principalmente en el norte del país, zona que por condiciones naturales posee recursos hídricos limitados, esto hace que la industria minera busque distintas alternativas de abastecimiento y es así como se ha llegado al uso de agua de mar en minería siendo esta utilizada en forma natural o desalinizada.

La química del agua de mar es muy diferente a la del agua convencional. La salinidad total del agua convencional consiste principalmente de sulfatos, nitratos, magnesio, calcio y sodio y el pH típico es de 6.7 a 7.5. Por otra parte, el agua de mar es un sistema más complejo que posee una alta concentración de iones y un pH entre 7.5 y 8.5. El agua de mar está compuesta de agua pura en un 96.4% aproximadamente y de minerales disueltos en un 3.6%. En la Tabla 1, se puede ver la concentración de los iones presentes en agua de mar.

Tabla 1. Distribución iónica del agua de mar [Castro y Huber, 2003].

Iones presentes en agua de mar	Concentración (ppm)
Cloruro (Cl^-)	19345
Sodio (Na^+)	10752
Sulfato (SO_4^{2-})	2701
Magnesio (Mg^{+2})	1295
Calcio (Ca^{+2})	416
Potasio (K^+)	390
Bicarbonato (HCO_3^-)	145
Bromuro (Br^-)	66
Borato (BO_3^{-3})	27
Estroncio (Sr^{+2})	13
Fluoruro (F^-)	1
Otro	<1

La flotabilidad de minerales naturalmente hidrofóbicos es mejorada significativamente en soluciones concentradas de electrolitos. Por lo tanto, la salinidad no es un obstáculo sino un aspecto positivo para la adhesión partícula-burbuja en la flotación [Castro y Laskowski, 2008; Castro y

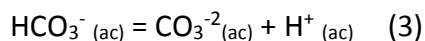
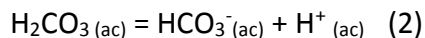
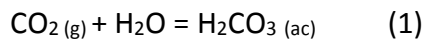
Laskowski, 2011]. Adicionalmente, los electrolitos previenen la coalescencia de burbujas como lo hacen los espumantes y mejoran la espumabilidad de soluciones espumantes, siendo ambos factores positivos para la flotación.

Pero, por otra parte, el uso de agua de mar trae consigo una serie de complicaciones en el proceso de flotación debido a la alta concentración de iones que ésta posee, dentro de las principales complicaciones se encuentran el efecto buffer, depresión de minerales por efecto de la precipitación de ciertos iones y adsorción de sales en la superficie de partículas minerales de carga opuesta, lo que afecta la adsorción del colector en el mineral de interés o puede inducir heterocoagulación entre partículas de mineral valioso y partículas finas de mineral arcilloso.

2.5.1 Efecto buffer

Dentro de los principales problemas que presenta la utilización de agua de mar en el proceso de flotación se encuentra el ajuste de pH, ya que el agua de mar actúa como buffer o tampón, generando un aumento significativo del uso de regulador de pH para lograr alcanzar pH usados comúnmente en el proceso de flotación de sulfuros (Figura 14).

El agua de mar se comporta como buffer debido a las sales de ácidos débiles que contienen carbono, boro, fósforo, arsénico y silicio. Los ácidos carbónico y bórico presentes en el agua de mar son suficiente para afectar la alcalinidad del medio. El efecto buffer está relacionado directamente con el par bicarbonato (HCO_3^-)/carbonato (CO_3^{2-}) proveniente del dióxido de carbono disuelto ($\text{CO}_{2(\text{ac})}$). Las reacciones químicas asociadas a este efecto se describen en las ecuaciones 1,2 y 3.



Si la relación bicarbonato/carbonato disminuye, aumentará el pH y si esta relación aumenta, el pH disminuirá. Esto es, ya que si aumenta la concentración de H^+ este ion será neutralizado por el carbonato, desplazándose el equilibrio de la ecuación 3 hacia la izquierda y por el contrario si se reduce la concentración de H^+ se producirá la disociación del bicarbonato desplazándose el equilibrio de la ecuación 3 hacia la derecha formando carbonato, produciéndose así ligeras variaciones de pH.

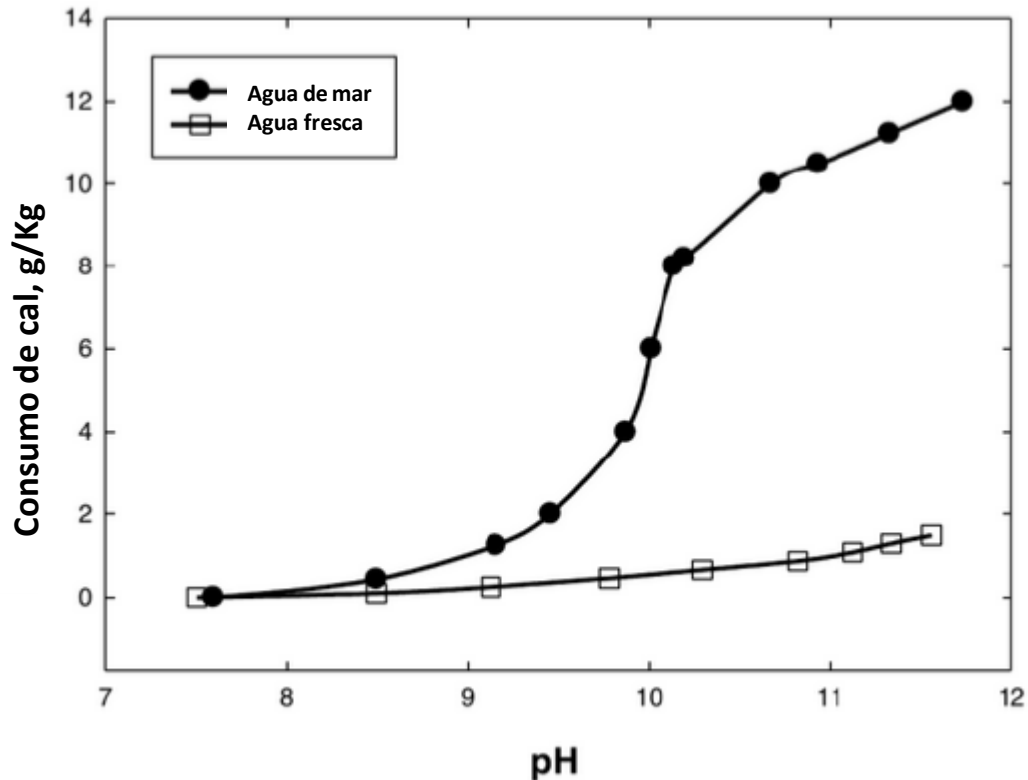


Figura 14. Consumo de cal en función del pH, para agua fresca y agua de mar [Castro, 2012].

2.5.2 Efecto depresante

El efecto depresante del agua de mar sobre ciertos minerales como son la calcopirita y molibdenita se presenta fuertemente a pH superiores a 9.5, afectando directamente la recuperación de estos minerales. Este efecto se da principalmente por la presencia de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} en el agua de mar, ya que a pH altos estos iones forman complejos de $\text{Ca}(\text{OH})^+$ y $\text{Mg}(\text{OH})^+$ los que luego precipitan formando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y $\text{Mg}(\text{OH})_2$ respectivamente (Figuras 15 y 16), y que según la teoría se adsorberán sobre la superficie de las partículas minerales y burbujas, provocando que la superficie de las partículas se vuelva hidrofílica. Además, se debe tener en cuenta que el agua de mar presenta un menor espesor en la capa de espuma creada al flotar, produciendo una espuma de menor calidad, dado por la adsorción de precipitados en la superficie de las burbujas impactando negativamente en la recuperación y concentración de las partículas valiosas [Eigeles and Volvenkova, 1963; Eigeles and Volova, 1964; Han et al., 2004; Laskowski et al., 2013].

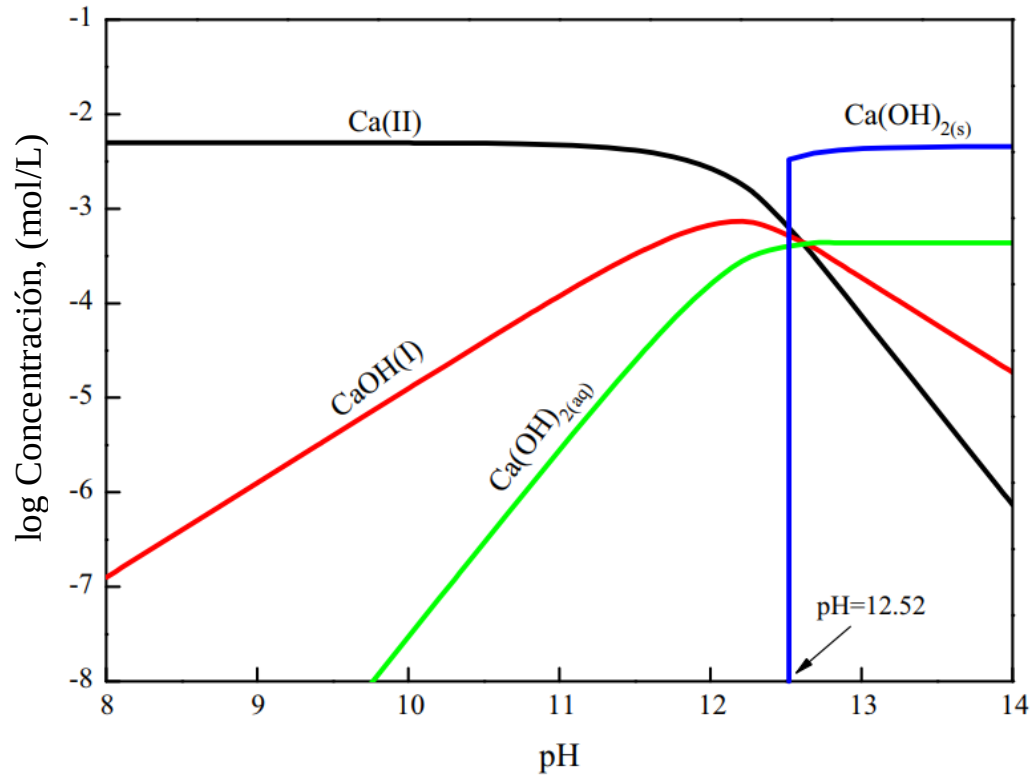


Figura 15. Diagrama de formación de especies para calcio [Liu et al., 2015].

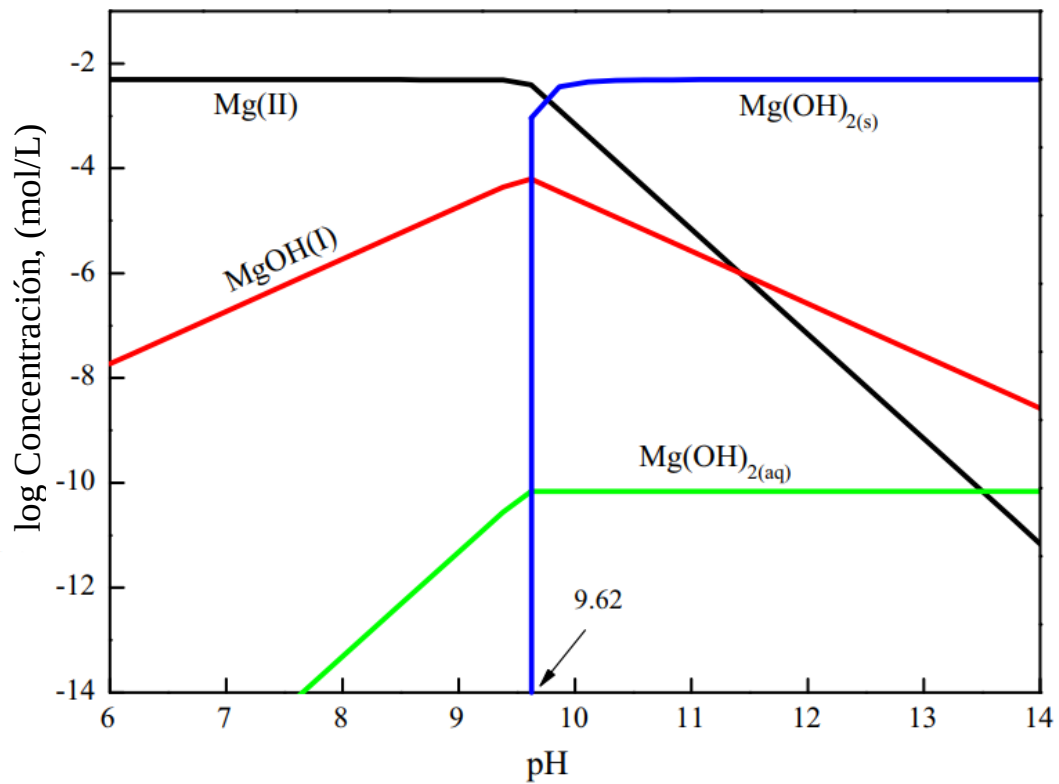


Figura 16. Diagrama de formación de especies para magnesio [Liu et al., 2015].

2.6 Reología de suspensiones

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia. Cada vez que un material se somete a un esfuerzo, se deformará y fluirá de acuerdo con algún patrón reológico que se caracteriza por una relación entre la tensión aplicada y el grado de deformación resultante de la aplicación del estrés. Según las características de deformación se pueden distinguir dos tipos de materiales, los materiales sólidos y los fluidos.

Un material sólido se puede definir como aquel que no presenta una deformación medible u observable luego de haberse aplicado un esfuerzo sobre él, mientras que un fluido es aquel que muestra una magnitud medible de la deformación luego de haberse retirado la tensión aplicada sobre el cuerpo.

Una manera ampliamente utilizada para representar el comportamiento reológico de fluidos, es mediante un reograma (Figura 17) en el cual se grafica el esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle [Whorlow, 1980; Krieger y Maron, 1951]. En la figura 17 se observan los comportamientos reológicos típicos para suspensiones minerales. Estas suspensiones se pueden clasificar en dos grupos principales, uno es aquel en que las suspensiones presentan un esfuerzo de corte inicial o esfuerzo de cedencia (yield stress) el cual tiene que ser superado para producir deformación, y el otro grupo es aquel en que las suspensiones no presentan un esfuerzo de cedencia. Dos términos importantes que a menudo están asociados a la reología son: el yield stress, que corresponde a la intersección de la curva con el eje de esfuerzo de cizalle a una velocidad de cizalle igual a cero; y la viscosidad, que es la pendiente de la curva. Según estudios realizados se sabe que a medida que aumenta la cantidad de sólidos en suspensión el comportamiento reológico cambia de newtoniano a no newtoniano con la aparición de un yield stress y con el aumento exponencial de la viscosidad.

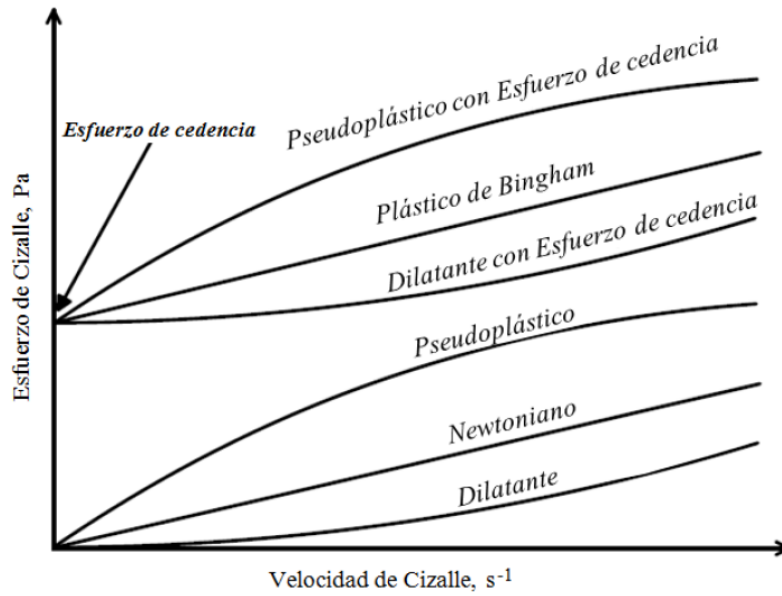


Figura 17. Diagrama esquemático del esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para diferentes fluidos [Gutiérrez, 2016].

Se pueden observar varios tipos de comportamientos, tal como se muestra en la Figura 17, en general las suspensiones pueden presentar comportamiento newtoniano o no newtoniano, y dentro de este último se pueden encontrar comportamientos plásticos, pseudoplásticos, bingham, etc. Un fluido newtoniano exhibe un aumento lineal del esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle, mientras que para un fluido no newtoniano este comportamiento no es lineal. Un ejemplo de fluido no Newtoniano son los fluidos pseudoplásticos, para los que se observa una disminución en la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de cizallamiento. Estos fluidos, son los ejemplos más comunes de suspensiones sólido-líquido que presentan un comportamiento no Newtoniano y este comportamiento se encuentran en una amplia variedad de suspensiones minerales. Otro caso menos común son los fluidos con un comportamiento dilatante, los cuales se caracterizan por un aumento de viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de cizalle. En el caso de las suspensiones que muestran un comportamiento en el cual existe esfuerzo de cedencia, uno de los casos más típicos es el comportamiento del tipo Bingham. Este comportamiento se caracteriza por la aparición de una curva de flujo lineal observada después del esfuerzo de cedencia. En contraste, aquellos fluidos que muestran una curva de flujo no lineal después que el límite elástico se supera se llaman pseudoplásticos con esfuerzo de cedencia [Van Wazer et al., 1963].

2.6.1 Reología en flotación

La reología cumple un importante rol en los procesos de flotación, se ha demostrado que un proceso de flotación de partículas finas resulta más efectivo cuando sus partículas se encuentran totalmente dispersas, lo que conlleva a una baja viscosidad. Esto depende del modo de asociación de las partículas minerales en suspensión. Basados en estudios de Lukham y Rossi (1999), hay tres modos principales de asociación de partículas que puede ocurrir para los minerales, estos son, cara-cara (FF), cara-borde (EF) y borde-borde (EE) (Figura 18). La asociación FF conduce a la formación de agregados con estructura laminar y con un bajo yield stress, mientras que las asociaciones EF y EE conducen a estructuras tridimensionales voluminosas que son más complejas reológicamente y más difíciles de manejar.

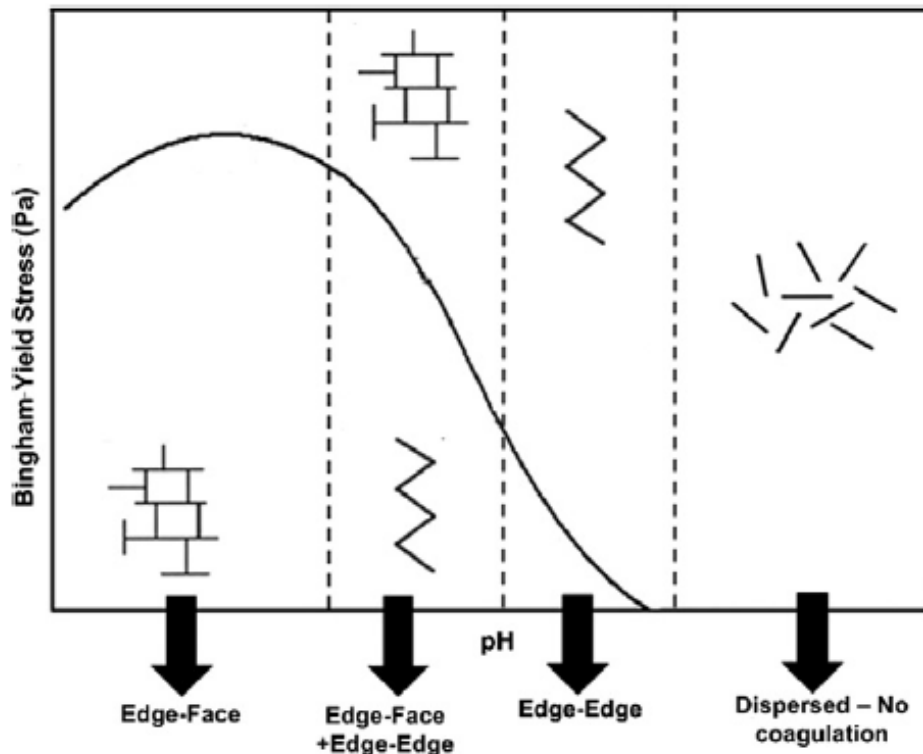


Figura 18. Esquema ilustrativo del efecto del pH sobre la tensión de fluencia de Bingham respecto a la asociación de partículas en un mineral de arcilla en capas [Adaptado de Rand y Melton, 1977].

La viscosidad de la pulpa en un proceso de flotación puede afectar la recuperación. Se ha estudiado también que la estabilidad de los agregados partícula burbuja es mayor cuando la viscosidad del medio aumenta [Xu et al., 2011]. Otra variable que se ve afectada por la reología de la pulpa es la espuma, más específicamente la estabilidad y movilidad de la espuma, la estabilidad de la espuma hace referencia a los procesos que ocurren dentro de la espuma mientras esta fluye, incluyendo explosión de burbujas, desprendimiento de las partículas y drenaje de agua y sólidos de la espuma, mientras que la movilidad se refiere al movimiento vertical de los agregados partícula-burbuja y el movimiento horizontal por la canaleta de colección de concentrado.

Recientes estudios mostraron que los filosilicatos se comportan de diferente manera cuando se añade calcopirita, y en todos los casos disminuyó la recuperación por flotación de ésta. En el proceso de flotación, la alta viscosidad inhibe la colisión entre las burbujas y las partículas, además de disminuir la movilidad de los agregados partícula-burbuja, reduciendo la cantidad de espuma generada en la parte superior de la celda de flotación, lo que resulta en una menor recuperación de cobre [Wang et al., 2015].



2.7 Potencial redox

El control del potencial redox puede jugar un papel importante durante la flotación de minerales sulfurados al influir en las reacciones que ocurren en la superficie de los minerales. En un sistema mineral mixto, el potencial de interfaz mineral/solución representa el potencial mixto que es crítico para el proceso de flotación [Chander, 2003; Hu et al., 2009; Woods, 2003]. Esto es debido a que si se pueden controlar las condiciones reductoras y oxidantes durante la flotación de minerales, es posible mejorar las recuperaciones y leyes.

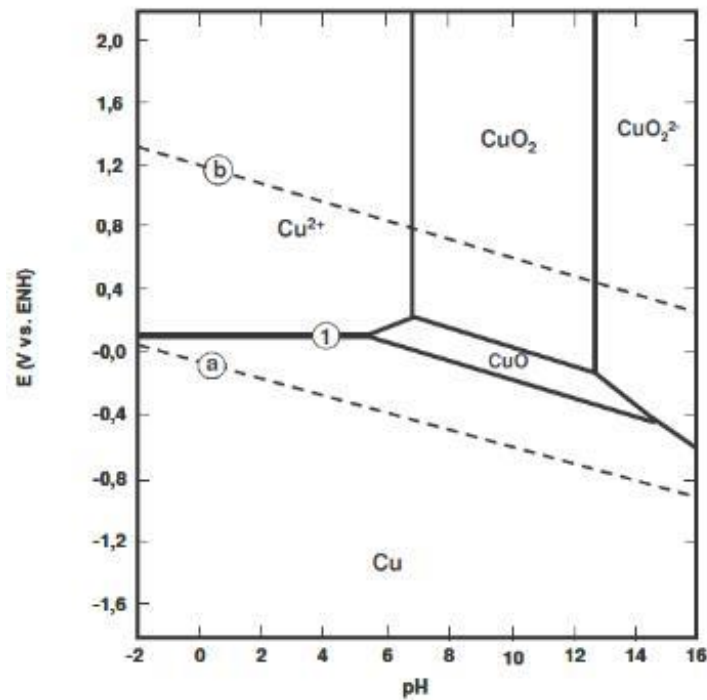


Figura 19. Diagrama de Pourbaix de cobre.

Los diagramas de Pourbaix (Figura 19) son útiles en la determinación de parámetros utilizados comúnmente en el procesamiento de minerales, como lo son el pH y el potencial de pulpa, ya que en base a estos diagramas se pueden establecer las condiciones de trabajo más óptimas según las especies que se requieran en solución. En el caso de flotación, en que se trabaja con minerales sulfurados el control del potencial de pulpa es una variable importante, ya que la formación de una capa oxidada en la superficie de los minerales conlleva a una disminución en la recuperación.

2.7.1 Control de potencial en flotación de calcopirita

La calcopirita es el sulfuro de cobre más común, los concentrados de calcopirita a menudo están contaminados con sulfuros que contienen arsénico, como arsenopirita, enargita y tenantita. El arsénico en el concentrado de calcopirita causa problemas ambientales y también causa problemas en el proceso pirometalúrgico. Por lo tanto, la eliminación del arsénico del concentrado de cobre se ha hecho necesaria. Yen & Tajadod (2000) y Menacho et. al (1993) investigaron la separación de enargita y calcopirita mediante control de potencial de la pulpa. Además, se ha utilizado la depresión electroquímica de calcopirita en la flotación selectiva de molibdenita con calcopirita. Potenciales reductores y oxidantes se han utilizado para depresar calcopirita mientras que la molibdenita era flotada selectivamente [Hu, 1982; Jiang et al., 1999].

El rango de flotabilidad de calcopirita alcanza su máximo a potenciales entre -0.2 V y 0.15 V (SCE), tal como se puede ver en la figura 20. A potenciales oxidantes la recuperación de calcopirita disminuye, como también lo hace a potenciales reductores.

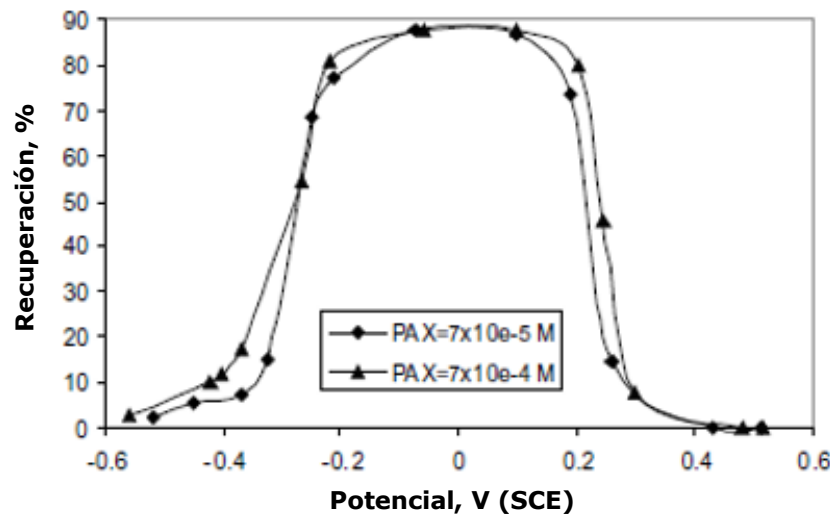


Figura 20. Flotabilidad de calcopirita en función del potencial de pulpa a pH 10 [Guo et al., 2003].

La figura 21 muestra la variación del ángulo de contacto en función del potencial. En esta se puede apreciar que la calcopirita tiene un mayor ángulo de contacto entre los potenciales -0.15 V y 0.1 V (SCE), lo que se correlaciona con lo observado en la figura 20. El film hidrofóbico en la superficie de la calcopirita es identificado como dixantógeno por muchos autores [Allison et al., 1972; Leppinen et al., 1988; Quiroz and Pagliero, 1988]. La disminución en el ángulo de contacto en la superficie de la calcopirita a potenciales sobre 0.0 V se debe a la formación de una capa oxidada en la superficie del mineral [Yin et al., 2000]. Esta capa oxidada aumenta la hidrofiliidad de la superficie de calcopirita y además evita que el dixantógeno se adsorba en la superficie mineral disminuyendo así el ángulo de contacto. El aumento en el ángulo de contacto a potenciales sobre 0.2 V se debe a la tasa de formación de dixantógeno en la superficie de la calcopirita, siendo éste suficiente para aumentar el ángulo de contacto del mineral.

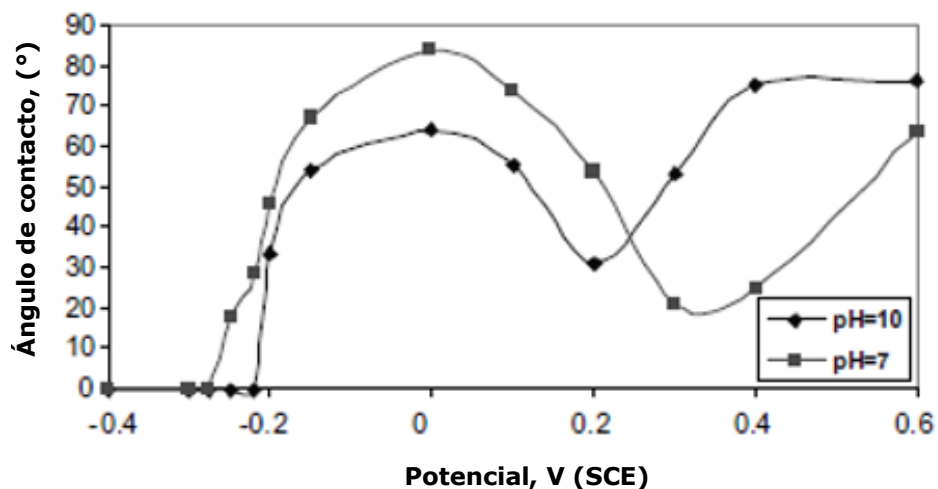


Figura 21. Medición de ángulo de contacto de calcopirita a pH 10 y pH 7 [Guo et al., 2003].

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Materiales y reactivos

3.1.1 Muestras minerales

La muestra de calcopirita de alta pureza utilizada en este estudio fue proporcionada por Ward's Natural Science Establishment. Las muestras minerales de calcopirita se encontraban en forma de rocas, por lo que en primer lugar se hizo una selección manual de las rocas de mayor pureza, luego éstas rocas fueron trituradas en un mortero de acero y seguido de esto molidas en un mortero de porcelana. Luego de alcanzado un tamaño lo suficientemente pequeño se realizó un tamizaje en una fracción de tamaño de - #100/+ #200 de la serie de Tyler, correspondiente a un tamaño de partícula entre 150 μm y 75 μm .



Figura 22. Muestra de calcopirita.

Adicionalmente, se realizó una purificación del mineral mediante separación magnética en un equipo de separación de alta intensidad (Carp CO), eliminando así la mayor cantidad de partículas magnéticas, luego se realizó un deslamado con agua destilada para eliminar partículas finas y finalmente se realizó una flotación cleaner en celda de laboratorio para así eliminar la mayor cantidad de impurezas presentes. Posterior a esta flotación cleaner, la cola y el concentrado obtenidos fueron lavados con sulfhidrato de sodio (NaSH) para remover los reactivos de la flotación y finalmente se dispuso la muestra en una bandeja y se vertió sobre ésta acetona de alta pureza la cual luego se volatilizó.

La Tabla 2 muestra la composición química de la muestra de calcopirita obtenida mediante análisis químico, y la composición mineralógica calculada a partir de éstos datos.

Tabla 2. Composición química y mineralógica de la muestra de calcopirita.

Composición Química			Composición Mineralógica		
Cu	%	34%	CuFeS ₂	%	98.26
Fe	%	30.8%	FeS ₂	%	1.04
S	%	34.5%	SiO ₂	%	0.7

Las micas (Figura 23) utilizadas para desarrollar este trabajo fueron proporcionadas por Wards Natural Science. Estas muestras fueron trituradas de forma manual y luego pulverizadas para obtener una muestra con un tamaño lo suficientemente pequeño para ser tamizada en malla #400. La muestra final de mica utilizada fue la obtenida del bajo tamaño.

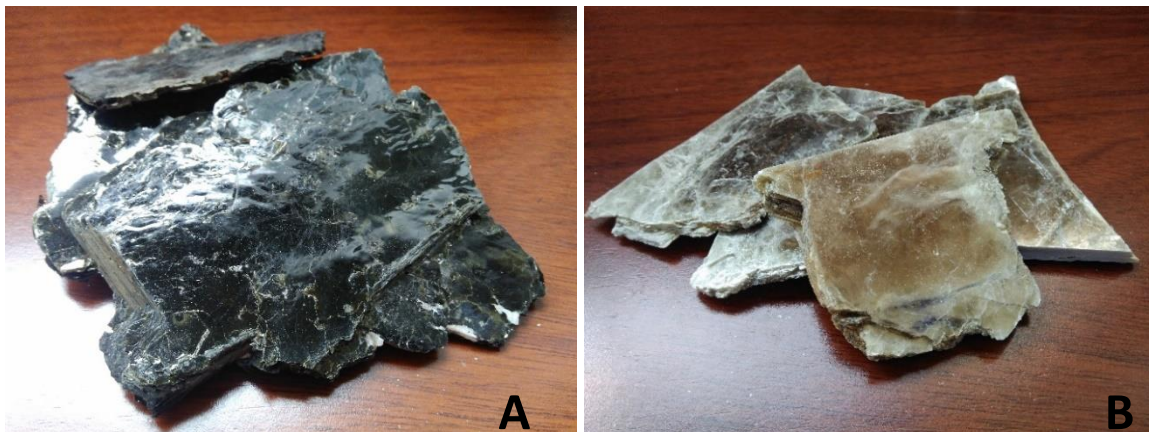


Figura 23. a) Muestra de biotita; b) Muestra de muscovita.

3.1.2 Reactivos

Los reactivos utilizados para el desarrollo de este estudio fueron amil xantato de potasio (PAX) a una concentración de 25 ppm, como colector y metil isobutil carbinol (MIBC) a una concentración de 20 ppm, como espumante. Cabe señalar que el colector fue previamente purificado utilizando el método de Rao, el que consiste en la disolución con acetona y posterior cristalización del xantato con éter etílico tal como se describe a continuación.

3.1.2.1 Purificación de PAX

La purificación de amilxantato de potasio (PAX) se realizó siguiendo el método propuesto por Rao (1971), el cual consiste en la disolución con acetona y re-cristalización del xantato usando éter etílico.

El procedimiento de purificación del PAX consiste en montar un tubo refrigerante sobre una placa calefactora, el cual cumple la función de condensar los vapores emanados del proceso, en este caso acetona. Una vez montado el tubo refrigerante se adicionan 100 mL de acetona y un agitador magnético en un matraz esférico, éste matraz se posa sobre la placa calefactora con agitación magnética y luego de esto se ensambla al tubo refrigerante. Se lleva la acetona a una temperatura de 55 °C, mientras esto ocurre se muelen 5 g de PAX en un mortero de porcelana.

Una vez que la acetona alcanza la temperatura de 55°C y comienza a burbujear, se añade el xantato al matraz y se comienza a agitar la solución manteniendo la temperatura constante durante 20 min.

En paralelo a esto, se monta el equipo de filtrado, el cual consiste en un matraz de kitasato con un embudo de porcelana sobre el cual se coloca un papel filtro, y este equipo se conecta a una bomba de vacío.

Luego de pasados los 20 min, se filtra la solución en caliente y luego se deja enfriar hasta temperatura ambiente. Una vez fría se procede a recrystalizar, para esto se utilizó 600 mL de éter etílico donde se observa la precipitación del xantato. Este precipitado se filtra y se lava con éter etílico nuevamente para remover todo residuo de acetona presente. Finalmente se envasa y se guarda refrigerado.

3.2 Equipos y Procedimiento

3.2.1 Pruebas de micro-flotación

Las pruebas de micro-flotación tuvieron como finalidad evaluar el efecto que produce la presencia de micas en la flotabilidad de calcopirita. Estas pruebas se realizaron en un rango de pH de 8 a 11.5, utilizando distintos medios acuosos tales como agua destilada 0.01M NaCl, agua de mar y agua en presencia de los principales iones presentes en agua de mar (K^+ , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}). Previo a la micro-flotación se realiza un proceso de acondicionamiento, el cual consiste en adicionar el mineral, las micas y los reactivos necesarios para realizar las pruebas en las condiciones requeridas (Figura 24).



Figura 24. Etapa de acondicionamiento para micro-flotación.

El proceso de acondicionamiento comienza adicionando 150 mL de solución acuosa a un vaso precipitado de 250 mL, el cual se mantiene en constante agitación sobre un agitador magnético, además se introduce un electrodo para así controlar el pH. Durante los primeros 2 minutos se ajusta el pH con gotas de ácido (HCl) o base (NaOH) según se requiera, luego se adiciona 1 g de mineral y se acondiciona durante 3 minutos siempre manteniendo el pH ajustado. Seguido de esto y dependiendo el caso, se agregan 0,15 g de mica ya sea biotita o muscovita, la cual se acondiciona durante 5 minutos. Transcurrido este tiempo, se adiciona una alícuota de 5 mL de PAX la cual

corresponde a una concentración de 25 ppm en la solución y luego una alícuota de 10 mL de MIBC logrando una concentración de 20 ppm en la solución, esto se acondiciona durante 2 minutos. El tiempo de acondicionamiento total es de 12 minutos. Es necesario mencionar que durante todo el tiempo de acondicionamiento se mantiene regulado el pH.

Terminado el proceso de acondicionamiento se traspasa la pulpa a la celda de micro-flotación, celda Partridge-Smith (Figura 25), la cual se instaló sobre un agitador magnético. En primer lugar se enciende el agitador para luego dar paso al flujo de gas (N_2), el que se ajusta a un caudal de 87 cm^3/min . Una vez dado el paso de gas comienza la micro-flotación la cual dura 3 minutos, con un paleteo cada 10 segundos. Durante el proceso de micro-flotación se adiciona, si es necesario, agua de solución con el fin de mantener el volumen de la celda constante. Una vez finalizada la prueba de micro-flotación el concentrado y cola fueron colectados y tamizados en malla #400 para así eliminar las partículas de mica y obtener la recuperación real de calcopirita. Luego de tamizadas, las colas y concentrados fueron filtrados y secados en horno durante aproximadamente 20 minutos, para finalmente ser masados y calcular la recuperación de calcopirita mediante la ecuación 4.

$$\%R = \frac{m_c}{m_c + m_t} * 100 \quad (4)$$

Donde R es la recuperación, m_c es la masa de concentrado y m_t es la masa de cola.

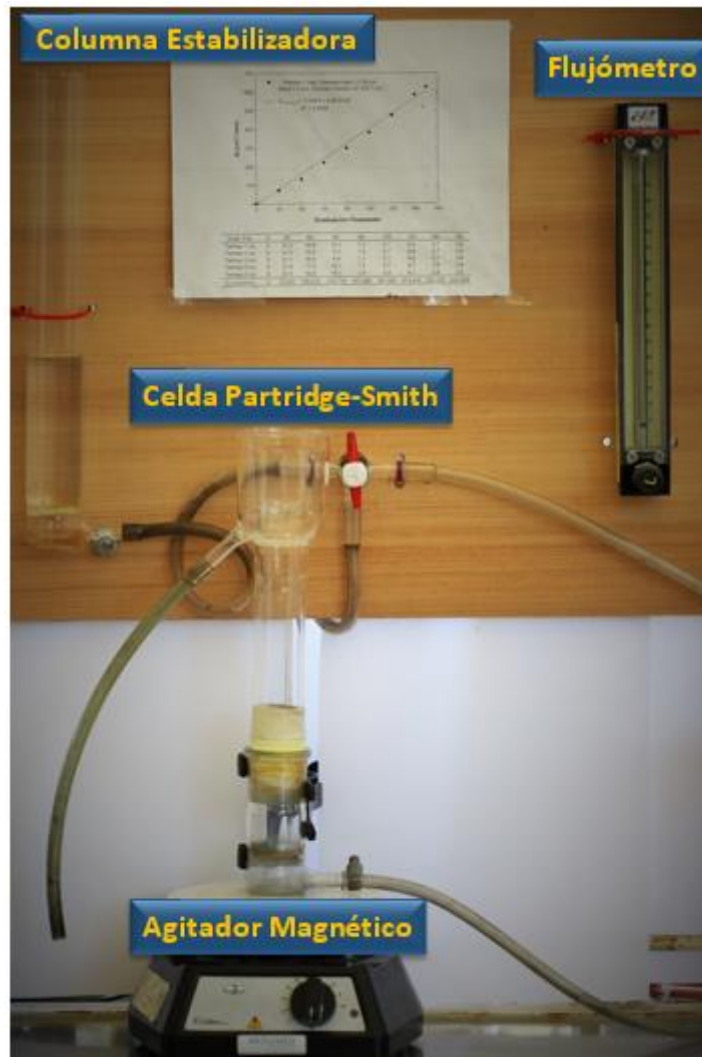


Figura 25. Equipo de micro-flotación.

3.2.2 Pruebas de turbidez

Las pruebas de turbidez se realizaron con el fin de estudiar el efecto slime coating entre las partículas de calcopirita y las partículas de mica en diferentes medios acuosos. Según la teoría, si existe efecto de heterocoagulación entre el mineral y la mica, y la suspensión se deja reposar por un tiempo determinado, las partículas de calcopirita sedimentarán llevándose consigo las partículas de mica que estén adheridas en su superficie disminuyendo así la turbidez de la suspensión, tal como se muestra en la Figura 26. Por lo tanto, si la turbidez $T_2 < T_1$ existe heterocoagulación, es decir, las partículas de mica si se adhieren en la superficie de la calcopirita. Por el contrario si $T_1 \sim T_2$, esto quiere decir que no hubo adhesión de partículas.

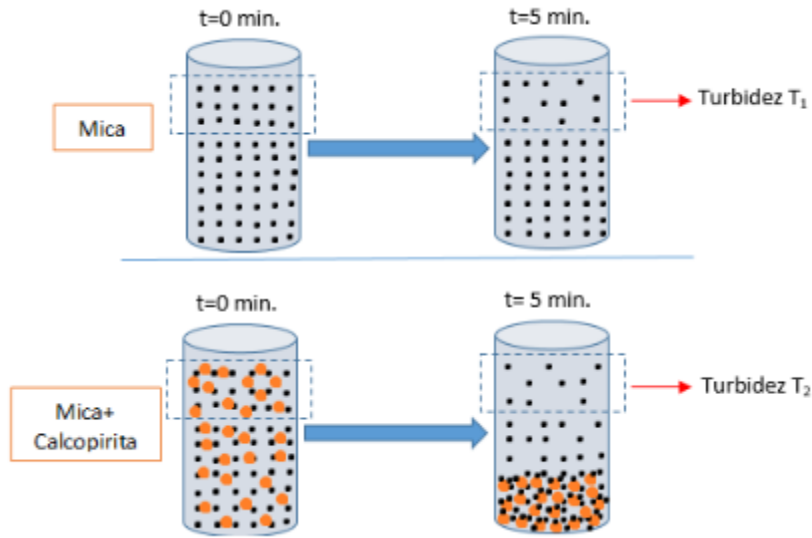


Figura 26. Esquema para evaluar efecto slime coating.

Para la realización de estas pruebas se utilizó un turbidímetro HACH 2100N el cual tiene como límite de medición 4000 NTU (Figura 27). El proceso llevado a cabo para realizar las pruebas de turbidez consistió en un acondicionamiento igual al descrito para las pruebas de micro-flotación. Una vez terminado el acondicionamiento la pulpa fue traspasada a una probeta de 150 mL y se dejó en reposo por un periodo de 5 minutos. Pasado este tiempo, se toma con una jeringa una muestra de aproximadamente 30 mL del sobrenadante y ésta muestra es vertida en un frasco de muestreo, el frasco se limpia para así eliminar los residuos en su superficie y evitar que éstos afecten la medición. El frasco se agita y luego se introduce en el turbidímetro realizándose la medición. Este procedimiento se repitió tres veces para cada muestra, y los valores obtenidos fueron promediados para el análisis.



Figura 27. Turbidímetro HACH 2100N.

3.2.3 Pruebas de tiempo de inducción

Las mediciones de tiempo de inducción se realizaron con el fin de evaluar el efecto que tiene la adición de micas en el proceso de adhesión partícula-burbuja de la calcopirita. Estas pruebas fueron realizadas en agua destilada 0.01M NaCl y agua de mar a pH 8 y pH 10 manteniendo la proporción de micas.

El tiempo de inducción se determinó utilizando la idea desarrollada por Glembotsky (1953), la cual consistía en generar una burbuja fresca en un tubo capilar, la que es empujada contra un lecho de partículas contenido en una celda de 15 cm³ (Figura 28). El contacto burbuja-lecho se mantiene por un tiempo medido y controlado (t_c) y posteriormente, la burbuja se separa del lecho de partículas y a través de la cámara de alta resolución del equipo se observa si hubo adhesión entre las partículas del lecho y la burbuja. Este procedimiento se realiza 10 veces en diferentes posiciones del lecho de partículas para un mismo t_c , luego se repite el procedimiento para los distintos t_c .

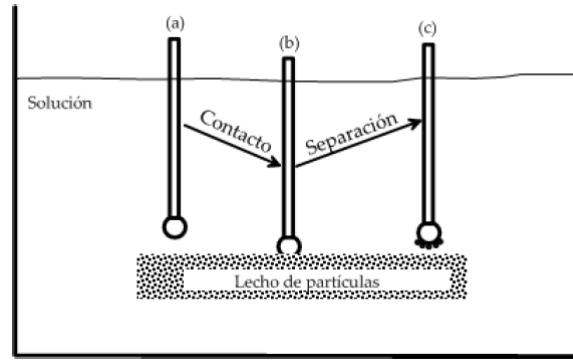


Figura 28. Esquema de medición de tiempo de inducción.

El tiempo de inducción corresponde al tiempo de contacto en el cual el 50% de los contactos fueron efectivos (Figura 29). Los datos experimentales obtenidos fueron ajustados mediante la ecuación 5.

$$N_{sc} = k_1 * (1 - \exp(-k_2 * t_c^{k_3})) \quad (5)$$

Donde,

N_{sc} = Numero de contactos efectivos.

t_c = Tiempo de contacto.

k_1, k_2, k_3 = Variables.

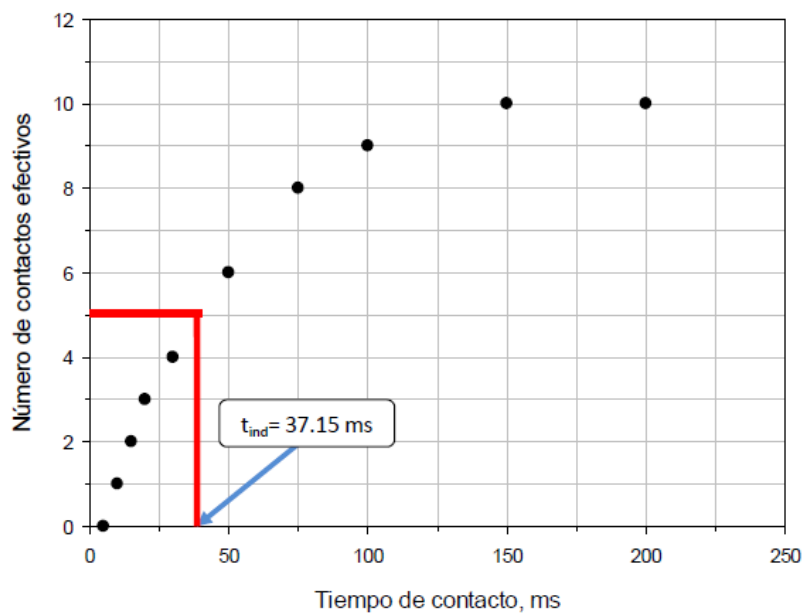


Figura 29. Gráfica ejemplificativa de cómo obtener el tiempo de inducción.

La realización de estas pruebas consistió de una etapa de acondicionamiento igual a la descrita anteriormente para las pruebas de micro-flotación con la diferencia que en este caso se trabajó con distintas condiciones. Se utilizó 2 g de mineral y 0.3 g de mica, se trabajó a una concentración de 0.01 ppm de PAX y en ausencia de espumante. Una vez terminado el acondicionamiento se traspasa la pulpa a la celda de 15 cm³ perteneciente al equipo de tiempo de inducción, intentando dejar el lecho de partículas lo más parejo posible para luego dar paso a la realización de mediciones.

3.2.4 Pruebas de reología

Las pruebas de reología se realizaron utilizando un viscosímetro Haake RV-20 conectado a un sensor MV1-P (Figura 30). El sensor consta de dos cilindro concéntricos rugosos, el cilindro exterior de un diámetro de 41.04 mm y el cilindro interior de diámetro 40.08 mm (gap 0.96 mm). Estos cilindros tienen superficies rugosas para así disminuir el fenómeno de deslizamiento.

Las mediciones se realizaron a las muestras de biotita y muscovita, ambas con distribución granulométrica fina. Estas pruebas se realizaron considerando un 57% de sólidos en peso. Los reogramas se obtuvieron aumentando la velocidad de cizalle entre 0 y 500 s⁻¹ en 30 s. Al realizar las mediciones se tuvo especial cuidado en que la pulpa no sedimentara, para así evitar errores en la medición. Al momento de realizar la medición, se agita la pulpa contenida en el sensor para así tener una muestra homogénea y luego se instala en el equipo realizando la medición en el menor tiempo posible. Estas pruebas se realizaron en distintos medios acuosos los que corresponden a agua destilada 0.01M NaCl, agua de mar y agua con iones (Mg⁺², Ca⁺², Na⁺ y K⁺) en un rango de pH de 8 a 11.5. Además es importante mencionar que estas mediciones fueron realizadas tres veces para cada suspensión y fueron seleccionadas las dos curvas que presentaban la menor desviación entre sí, para obtener de éstas una curva promedio.



Figura 30. Viscosímetro Haake RV-20

3.2.5 Pruebas de micro-flotación con control de potencial redox.

Las pruebas de micro-flotación con control del potencial redox fueron realizadas para estudiar el efecto que tiene la oxidación y reducción de la pulpa en la recuperación de calcopirita en presencia de micas.

La etapa de acondicionamiento (Figura 31) de estas pruebas a diferencia de la descrita en puntos anteriores consistió en adicionar en un vaso precipitado 150 mL de solución en conjunto con el mineral, esto se mantuvo en agitación durante 30 min y se controló el potencial redox durante todo el periodo. Para controlar el potencial se utilizó como agente reductor sulfito de sodio (Na_2SO_3) y como agente oxidante peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 40% v/v, para la medición de potencial se utilizó un electrodo de Ag/AgCl. Una vez pasados los 30 min se adicionaron los reactivos (PAX y MIBC) y se ajustó el pH, dándole a esto un tiempo de acondicionamiento de 5 min. Finalmente se realiza la flotación de la manera habitual. Es necesario mencionar que en el caso de flotación de calcopirita en presencia de micas éstas se adicionan al comienzo del acondicionamiento junto al mineral.



Figura 31. Etapa de acondicionamiento con control de potencial redox.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Micro-flotaciones

4.1.1 Agua destilada 0.01M NaCl

Los resultados presentados a continuación corresponden a valores promedio de las recuperaciones de calcopirita obtenidas, ya que las pruebas fueron realizadas en duplicado.

En la Figura 32 se puede observar que en todo el rango de pH estudiado la calcopirita en solución de agua destilada 0.01M NaCl presenta una buena flotabilidad, resultado que concuerda con estudios anteriores realizados en presencia de colectores tipo xantato. Se sabe que la calcopirita debido a su superficie naturalmente hidrofílica no tiene una buena flotabilidad, por lo tanto la acción de colectores tipo xantatos mejorarían la recuperación de calcopirita mediante la formación de un recubrimiento hidrofóbico de dixantógeno sobre las partículas del mineral.

Por otra parte, es posible notar que la flotabilidad de calcopirita en presencia de micas no tiene una variabilidad respecto a los resultados obtenidos en ausencia de éstas. Tomando en cuenta estudios realizados previamente sobre la acción de filosilicatos tipo arcillas en la flotabilidad de calcopirita, los cuales indicaban que las arcillas tenían un efecto depresante sobre las partículas de calcopirita a pH 8-9 y éste efecto disminuía a medida que aumentaba el pH [Cortes, 2016; Rojas, 2017]. Esto se puede explicar debido a la carga eléctrica superficial que poseen ambos minerales. La calcopirita por su parte tiene carga superficial negativa en todo el rango de pH en estudio, mientras que la caolinita presenta distinta carga eléctrica en sus caras y bordes. El IEP de los bordes de las partículas de caolinita es cercano a pH 8 lo que generaría fuerza de atracción entre las partículas de arcilla y las de mineral favoreciendo esto el efecto slime coating. Dado lo anterior y según lo mostrado en la Figura 32, es posible asumir que en el caso de las micas no ocurre efecto slime coating, permitiendo esto la libre acción del colector sobre las partículas de mineral. Además es necesario mencionar que ambas micas tanto biotita como muscovita presentan carga superficial negativa en todo el rango de pH estudiado, lo que confirma la teoría de no adhesión de las partículas de micas a la superficie de calcopirita, ya que entre ambas partículas se generarían fuerzas de repulsión inhibiendo así cualquier tipo de interacción entre ellas.

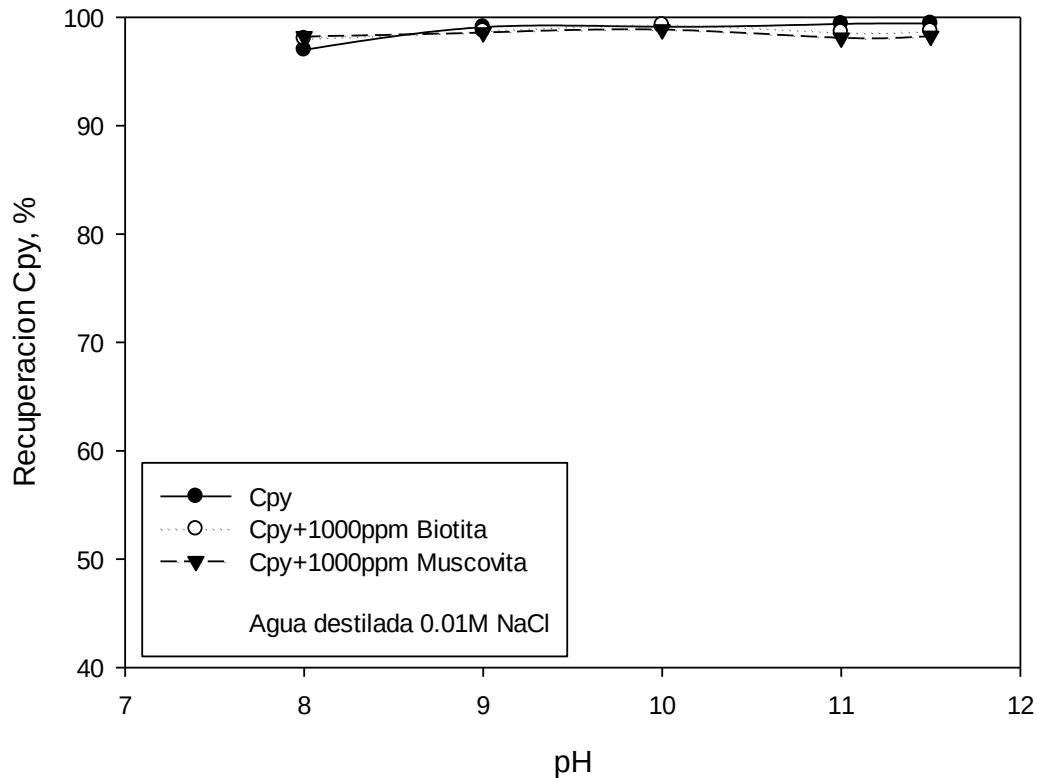


Figura 32. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua destilada 0.01M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.1.2 Agua de Mar

En la Figura 33 es posible ver que en la flotación de calcopirita en agua de mar las recuperaciones no se ven afectadas a pH 8-10, mientras que a pH 10.5 se observa una clara disminución en la recuperación. Las micas por su parte, entre pH 8-10 provocan el mismo efecto que tienen en agua destilada, esto es, la repulsión de las partículas de mica y mineral inhibiendo así su interacción. Mientras que a pH 10.5 si bien la curva de recuperación de calcopirita en presencia de micas sigue la tendencia de la curva de recuperación de calcopirita en ausencia de estas, se observa claramente un efecto depresante de las micas sobre la calcopirita.

En la presencia de fuertes soluciones salinas (agua de mar) el espesor de la doble capa eléctrica disminuye drásticamente, permitiendo así una disminución entre las distancias de las partículas, por lo cual las interacciones entre diferentes especies se vuelve posible [Warkentin, 1961; Yukselen-Aksoy et al., 2008]. Si se tiene en cuenta las figuras de formación de complejos de Ca^{+2} y Mg^{+2} , se puede notar que a pH 8 comienzan a aparecer los primeros hidróxidos de calcio y se puede notar

también que estos aumentan a medida que aumenta el pH. Por otra parte de la Figura 16 se puede observar que en el caso del ion Mg^{+2} la formación de $Mg(OH)^+$ alcanza su máxima concentración a pH 9-10, mientras que a pH 10 se forman precipitados de $Mg(OH)_{2(s)}$. En ausencia de micas, la formación de estos precipitados serían los responsables de la disminución en la recuperación de calcopirita a pH > 10 debido a que su presencia en solución dificultaría la acción del colector sobre las partículas minerales. Mientras que el efecto depresor que se da en presencia de micas, es atribuible además a la presencia de $Ca(OH)^+$ y $Mg(OH)^+$, ya que como la calcopirita y las micas (biotita y muscovita) tienen una carga superficial negativa, estos complejos actuarían como un puente entre las partículas de calcopirita y las partículas de mica aumentando la interacción entre estas y dificultando aún más la acción del colector. Además, es importante mencionar que la presencia de estos compuestos dificultan la adhesión partícula-burbuja debido a que se adsorben en la superficie de las burbujas disminuyendo la probabilidad de que las partículas floten [Li & Somasundaran, 1991].

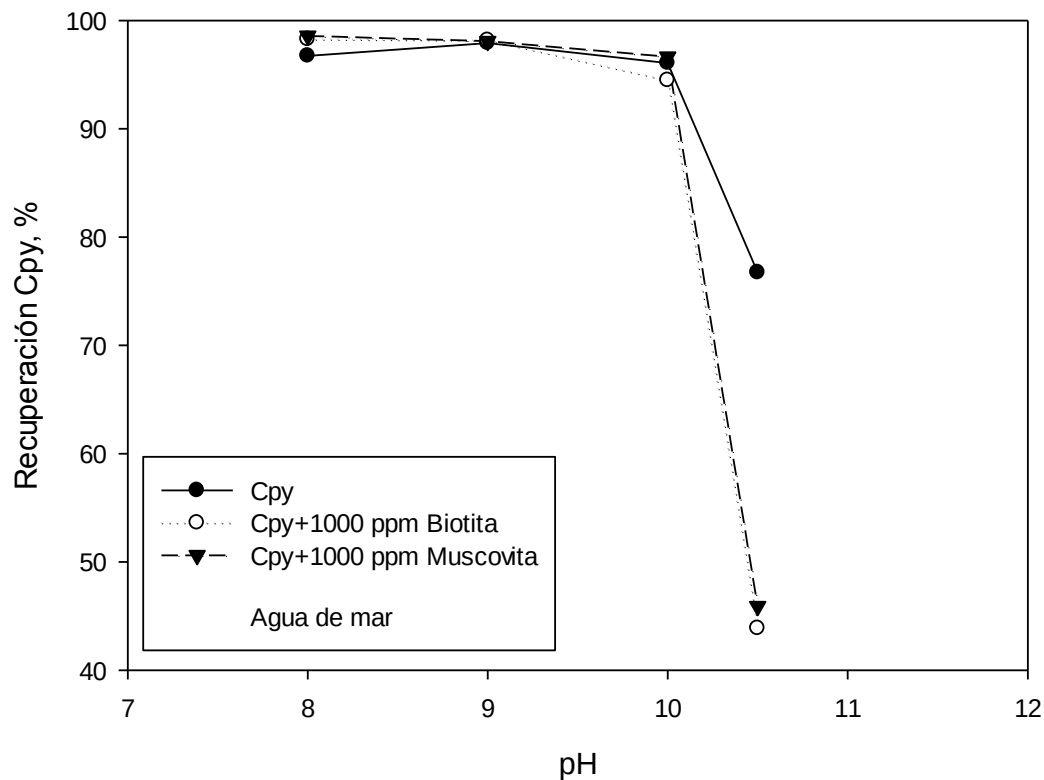


Figura 33. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.1.3 Iones

Adicional a las pruebas de micro flotación en agua destilada 0.01M NaCl y agua de mar, se realizaron pruebas de micro flotación en presencia de los principales iones presentes en el agua de mar (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2}) con el fin evaluar cuál de estos es el que presenta más complicaciones en la flotación de calcopirita en presencia y ausencia de micas.

La Figura 34 muestra el efecto que tiene la mica biotita en la flotabilidad de calcopirita en soluciones que contienen 10700 ppm Na^+ , 400 ppm K^+ , 400 ppm Ca^{+2} y 1300 ppm Mg^{+2} concentraciones que corresponden al promedio de estos iones contenidas en agua de mar. Se puede observar que la recuperación de calcopirita en agua destilada no se ve afectada por la presencia de iones en solución, así como tampoco por la presencia de biotita. Esta no interacción, como se mencionó anteriormente, se puede atribuir a las fuerzas electroestáticas de repulsión que se generan entre las partículas de calcopirita y biotita debido a su potencial superficial negativo. Se puede observar también que a pH=10 la recuperación de calcopirita comienza disminuir levemente en la solución que contiene 1300 ppm de Mg^{+2} , esto se debe a que las especies $\text{Mg}(\text{OH})^+$ alcanzan su máxima concentración a este pH y estarían actuando como puente entre las partículas de biotita y calcopirita.

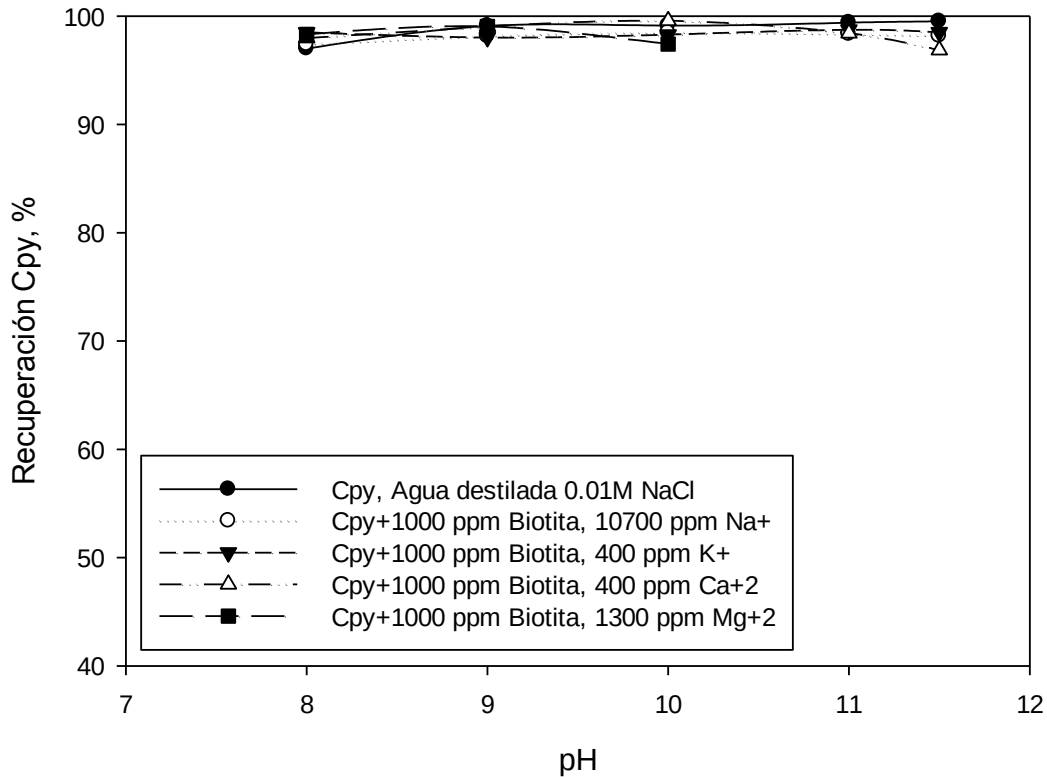


Figura 34. Efecto de la presencia de biotita en la recuperación de calcopirita en soluciones que contienen 10700 ppm Na^+ ; 400 ppm K^+ ; 400 ppm Ca^{+2} ; 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

Ahora, en la Figura 35 se muestra el efecto que tiene la presencia de muscovita en la flotabilidad de calcopirita en soluciones que contienen los principales iones presentes en agua de mar (10700 ppm Na^+ , 400 ppm K^+ , 400 ppm Ca^{+2} y 1300 ppm Mg^{+2}). En este caso, al igual que en el anterior se puede notar que la recuperación de calcopirita no disminuye en presencia de muscovita y además no se ve afectada por la presencia de iones en solución. Por otra parte, se observa que en el caso en que existen iones Mg^{+2} en solución la recuperación de calcopirita disminuye 4 puntos porcentuales, esto es debido a que como se mencionó anteriormente a pH 9-10 se tiene la máxima concentración de $\text{Mg}(\text{OH})^+$ y además a pH 10 se comienzan a formar los precipitados de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, siendo estos quienes provocan que sobre las partículas de calcopirita se genere un recubrimiento, ya sea de muscovita debido a la acción de $\text{Mg}(\text{OH})^+$ como puente entre ambos minerales o de los precipitados que se estarían formando e impidiendo o dificultando la acción del colector.

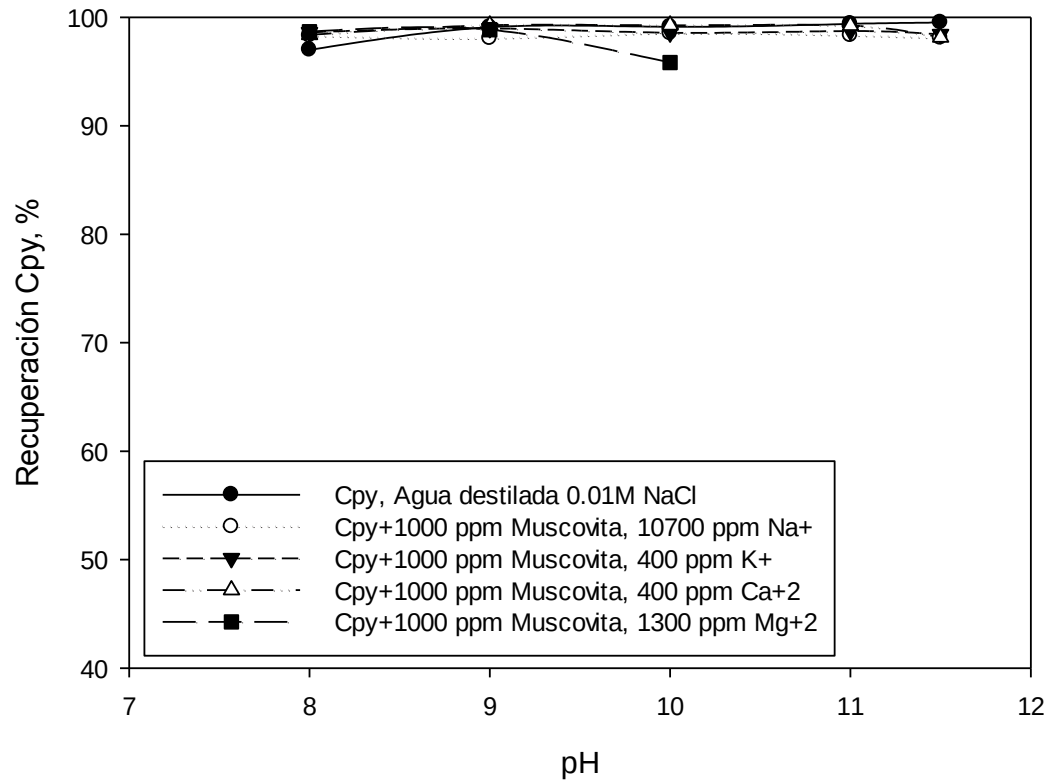


Figura 35. Efecto de la presencia de muscovita en la recuperación de calcopirita en soluciones que contienen 10700 ppm Na^+ ; 400 ppm K^+ ; 400 ppm Ca^{+2} ; 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.2 Turbidez

4.2.1 Biotita

Las pruebas de turbidez de las suspensiones de biotita se realizaron en ausencia y presencia de calcopirita en distintos medios acuosos.

Los resultados obtenidos en agua destilada 0.01M NaCl se muestran en la Figura 36. En esta figura se puede notar que la turbidez de la suspensión en presencia de calcopirita no varía con respecto a la turbidez de la suspensión de biotita en ausencia de calcopirita en todo el rango de pH en estudio, este resultado afirma que no existe atracción de ningún tipo entre las partículas de biotita y las de calcopirita que pudiese generar el efecto slime coating, o bien, se puede plantear que las fuerzas de repulsión que se generan entre las partículas de mica y mineral, debido a la carga superficial negativa de ambas, serían más fuertes que cualquier otra fuerza presente entre ellas (Van der Waals, Puentes de hidrogeno, etc.).

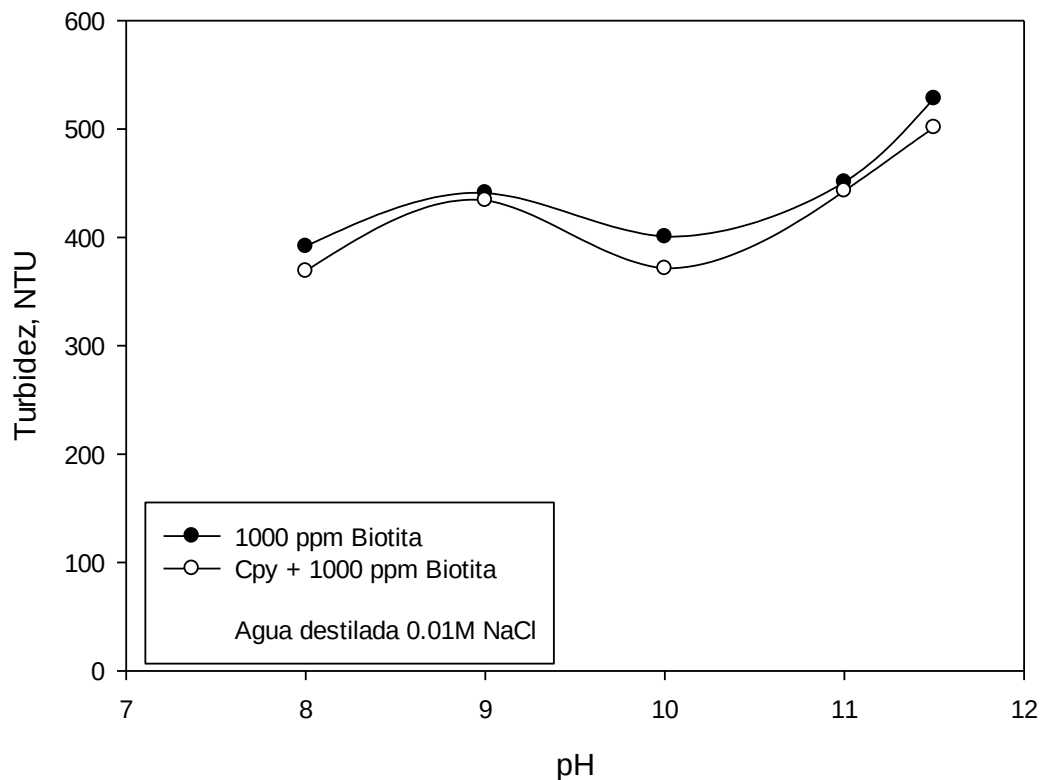


Figura 36. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en agua destilada 0.01M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

En la Figura 37, se observan los resultados de turbidez obtenidos en agua de mar. Aquí se puede notar que a pH 8 y 9 hay una disminución de la turbidez en presencia de calcopirita, esto indica que el efecto slime coating podría estar presente entre algunas partículas de biotita y calcopirita, mientras que a pH 10 y 11 la turbidez de la suspensión no presenta variación en presencia de calcopirita, es decir, en este rango de pH no existe agregación de partículas. Además se puede observar una notoria disminución de la turbidez a pH 11, esto se debe a la precipitación de los iones Mg^{+2} y Ca^{+2} presentes en el agua de mar. Al formarse estos precipitados, se forma una especie de gel viscoso que impide o dificulta que las partículas se mantengan en suspensión, provocándose así en ambos casos esta disminución en la turbidez de la suspensión.

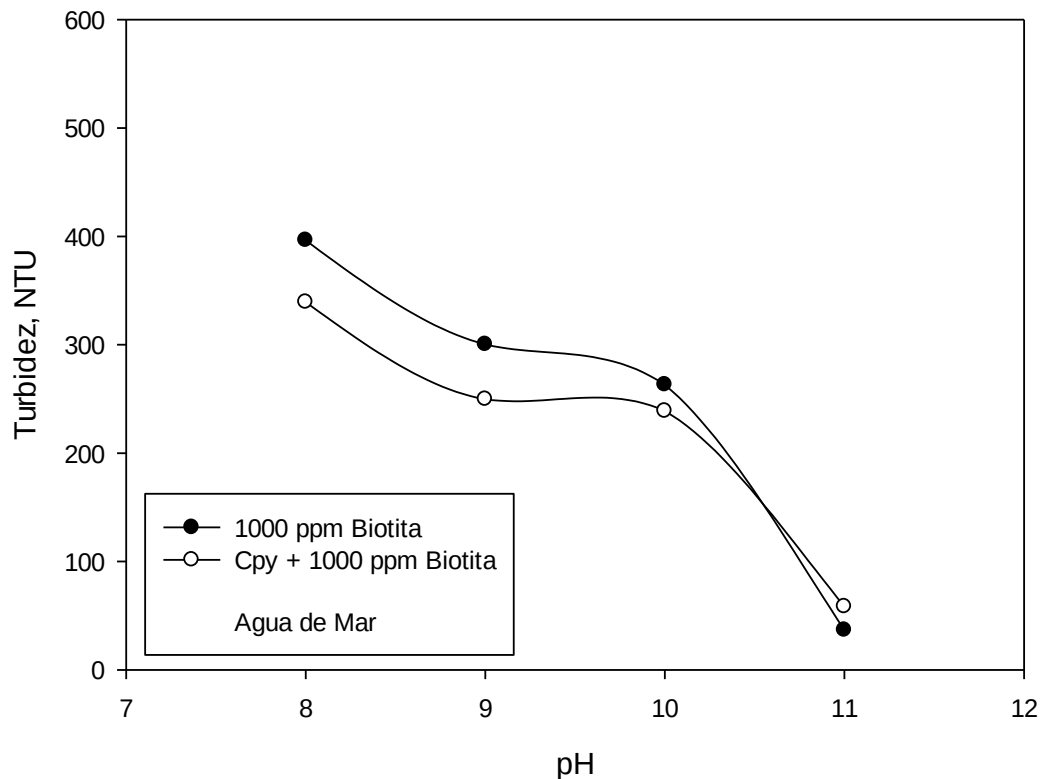


Figura 37. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.2.2 Muscovita

Las pruebas de turbidez de muscovita al igual que las de biotita se realizaron en ausencia y presencia de calcopirita en distintos medios acuosos.

En la Figura 38 se presentan los resultados de turbidez obtenidos para muscovita en suspensión de agua destilada 0.01M NaCl, en esta figura se puede observar que la turbidez de muscovita en presencia de calcopirita es bastante similar a la turbidez en ausencia de calcopirita para todo el rango de pH, esto indicaría que existe una repulsión entre las partículas de muscovita y calcopirita que no permitiría la adhesión de partículas finas de mica a la superficie de partículas de calcopirita. Se observa de la figura que a pH 9 existe una mayor diferencia en la turbidez de la suspensión en presencia de calcopirita, este punto se aleja de la tendencia general y puede atribuirse a error experimental al momento de tomar la medida.

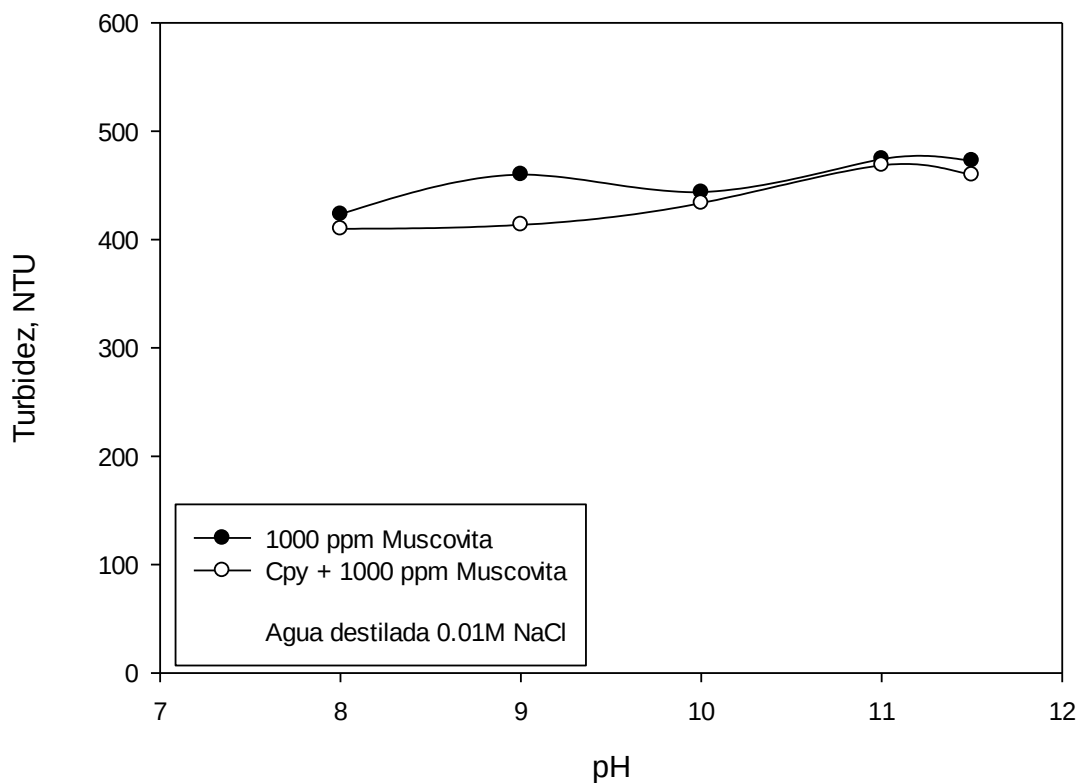


Figura 38. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

La Figura 39 muestra la turbidez de muscovita en presencia y ausencia de calcopirita en agua de mar. Esta figura muestra que la turbidez en presencia de calcopirita es igual a la turbidez de ausencia de ésta en todo el rango de pH estudiado, este resultado se correlaciona con los resultados obtenidos en micro-flotación en las mismas condiciones y confirmaría la hipótesis planteada de que no existe slime coating entre las partículas de mica y calcopirita, siendo esta la razón de que no exista un efecto depresante de la muscovita sobre la calcopirita. De la Figura 39 es posible notar además que a pH 11 existe una disminución significativa en la turbidez de la suspensión en los dos casos presentados, esta disminución se puede atribuir a la formación de hidróxidos de Ca y precipitados de Mg que estarían formados a este pH. Como se muestra en las Figuras 15 y 16 los precipitados de magnesio ($Mg(OH)_2$) ya estarían formados a pH 11 y podrían adsorberse en la superficie de las partículas de calcopirita facilitando la heterocoagulación entre las partículas de mica y mineral, además de favorecer la sedimentación de la pulpa debido al gel viscoso que se forma. Mientras que en el caso del calcio existiría en suspensión como $Ca(OH)^+$ y este complejo podría actuar como puente entre ambas partículas.

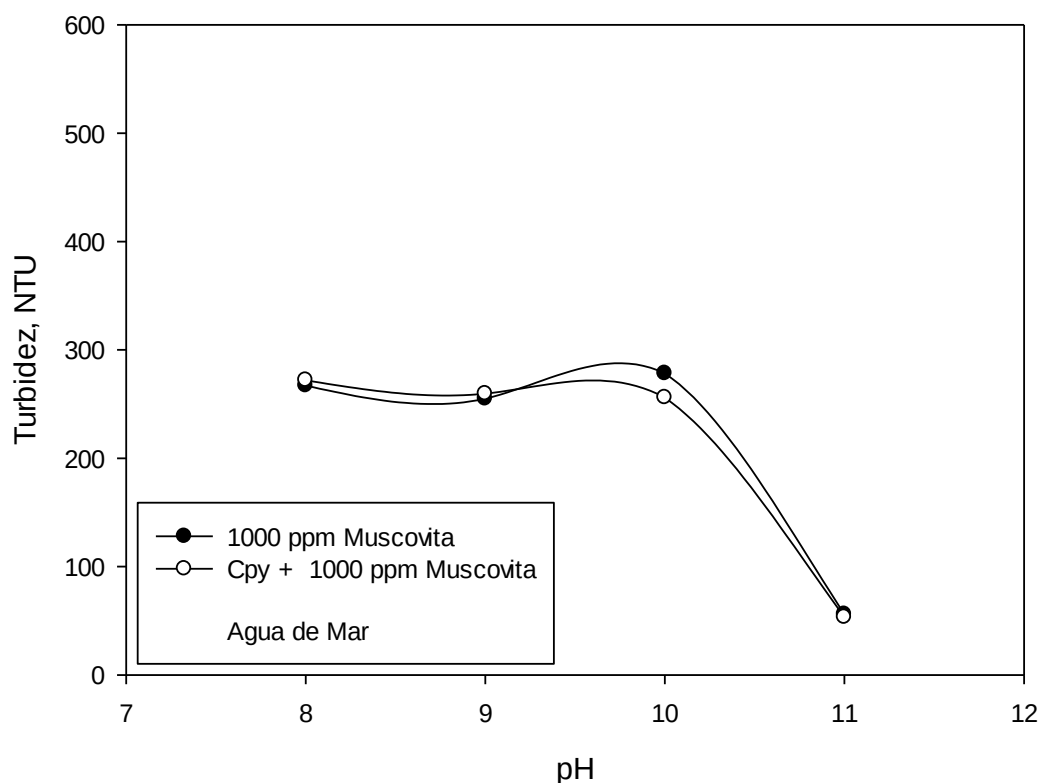


Figura 39. Turbidez de la suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.3 Tiempo de inducción

El tiempo de inducción corresponde al tiempo mínimo necesario para romper el film líquido existente entre la burbuja y la partícula, hasta que se produzca adhesión de éstas. Éste es un parámetro importante en flotación ya que según este parámetro se puede predecir la flotabilidad de minerales.

En la Figura 40 se muestra el efecto que tiene la presencia de biotita y muscovita en el tiempo de inducción, esto en agua destilada 0.01M NaCl. Aquí se puede ver que en el caso de la muscovita el tiempo de inducción no se ve alterado, correlacionándose este resultado con los obtenidos en las pruebas de micro-flotación y turbidez.

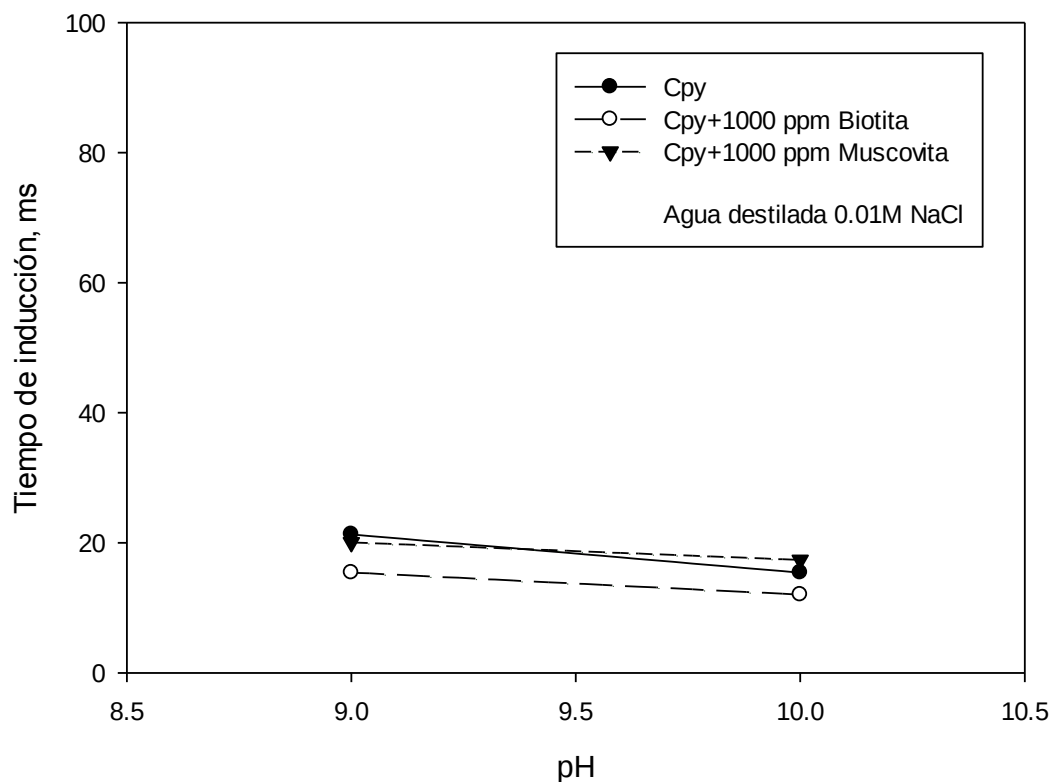


Figura 40. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en el tiempo de inducción en agua destilada 0.01M NaCl; 0.1 ppm PAX.

En el caso de la biotita por el contrario, se puede notar que el tiempo de inducción disminuyó para ambos pH, siendo esta disminución de 6 ms y 3 ms a pH 9 y 10 respectivamente. Esto puede estar relacionado al error experimental más que a un resultado significativo.

Ahora, en la Figura 41 se presenta la variación que tiene el tiempo de inducción de calcopirita en función del pH en ausencia y presencia micas, utilizándose como medio acuoso agua de mar.

Si se compara la Figura 40 con la Figura 41 en donde la única diferencia existente entre ambas es el medio acuoso utilizado en cada medición, se puede notar que el tiempo de inducción en agua destilada 0.01 M NaCl disminuye a medida que aumenta el pH, contrario a lo que ocurre en agua de mar en donde el tiempo de inducción aumenta con el aumento del pH. Este es el comportamiento esperado del tiempo de inducción en agua de mar, ya que como se ha mencionado anteriormente, el agua de mar posee una alta concentración iónica y en este caso sería la formación de especies como $Mg(OH)^+$ y $Ca(OH)^+$ las que estarían provocando el aumento en el tiempo de inducción, debido a que estas especies se adsorben en la superficie de las partículas de calcopirita dificultando así la adhesión partícula-burbuja. Este resultado es acorde con los obtenidos en micro-flotación, en donde a $pH > 10$ la recuperación de calcopirita comienza a disminuir (Figura 33).

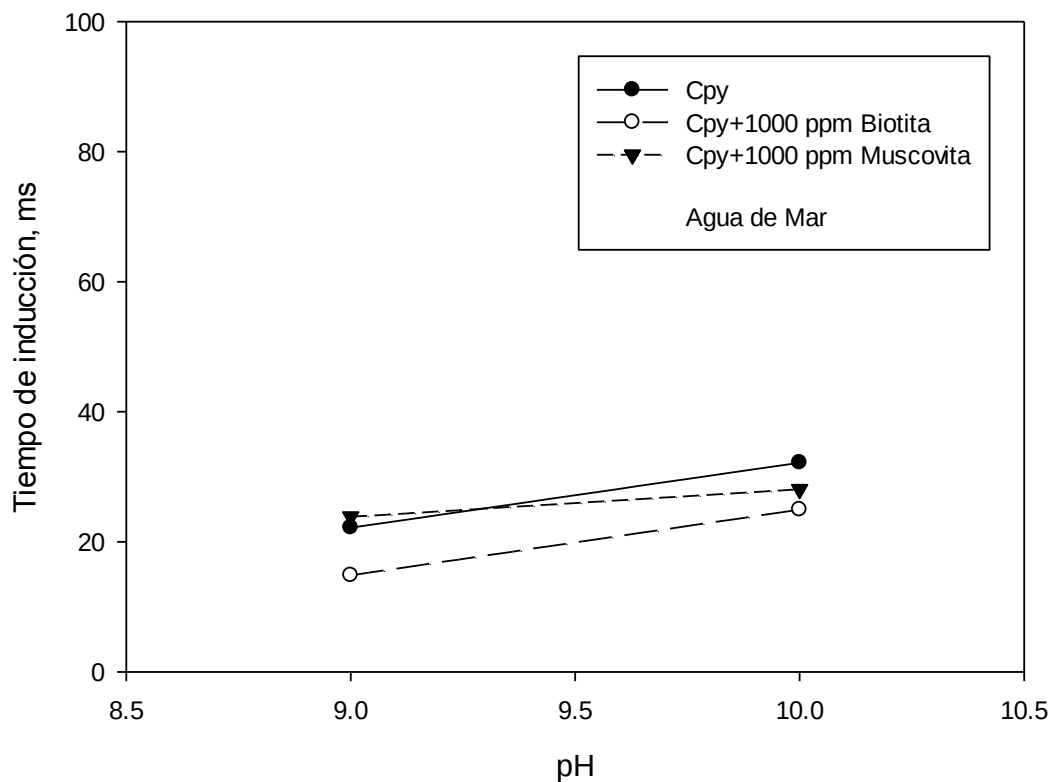
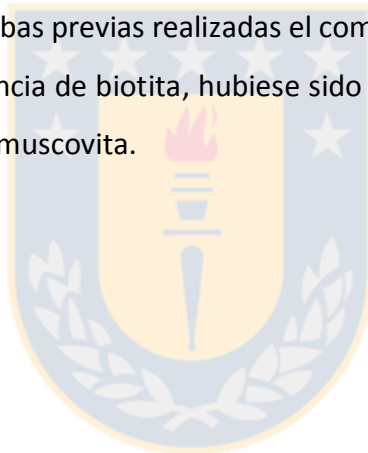


Figura 41. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en el tiempo de inducción en agua de mar; 0.1 ppm PAX.

En el caso del tiempo de inducción en presencia de micas es posible notar una diferencia entre el efecto que produce la muscovita y la biotita, ya que la muscovita al igual que el caso presentado en agua destilada 0.01 M NaCl no presenta una variación significativa del tiempo de inducción con respecto a la curva de calcopirita sola. Mientras que la presencia de biotita por su parte provoca una disminución en el tiempo de inducción, este resultado si bien debiese considerarse favorable para la flotación de calcopirita, su ocurrencia no tiene una explicación fundada y se contradice con estudios realizados previamente sobre filosilicatos tipo arcillas. Cortés (2016) investigó el efecto de arcillas caolinita y montmorillonita en el tiempo de inducción de calcopirita obteniendo en ambos casos un aumento en el tiempo de inducción en presencia de arcillas. Si bien, en este estudio el comportamiento general de las micas fue distinto al presentado por las arcillas, ya que mientras que las arcillas presentaron un efecto negativo en la flotación de calcopirita, las micas no presentaron efecto, en base a esto y a las pruebas previas realizadas el comportamiento esperado del tiempo de inducción de calcopirita en presencia de biotita, hubiese sido que ésta no produjese una variación, tal como sucedió en el caso de la muscovita.



4.4 Reología

Las pruebas de reología realizadas con biotita y muscovita tuvieron como objetivo estudiar el efecto que tiene el pH sobre la viscosidad de la suspensión y además de esto evaluar el efecto que tiene la presencia de iones en solución en la interacción entre partículas de mica.

Como es posible observar en la Figura 42 en donde se muestra el esfuerzo de cedencia en función del pH, es posible deducir de aquí que el esfuerzo de cedencia no tiene un comportamiento dependiente del pH ya que éste no sigue una tendencia clara. Además se puede observar que la presencia de iones en solución tampoco tiene una relevancia sobre el comportamiento reológico de la suspensión de biotita, ya que según es posible deducir de esta figura, la interacción de las partículas de biotita entre si no se ve alterada en ningún tipo de solución utilizada. De lo anterior se concluye que tanto el pH como la presencia de iones en solución no tienen un efecto sobre la viscosidad de la suspensión de biotita.

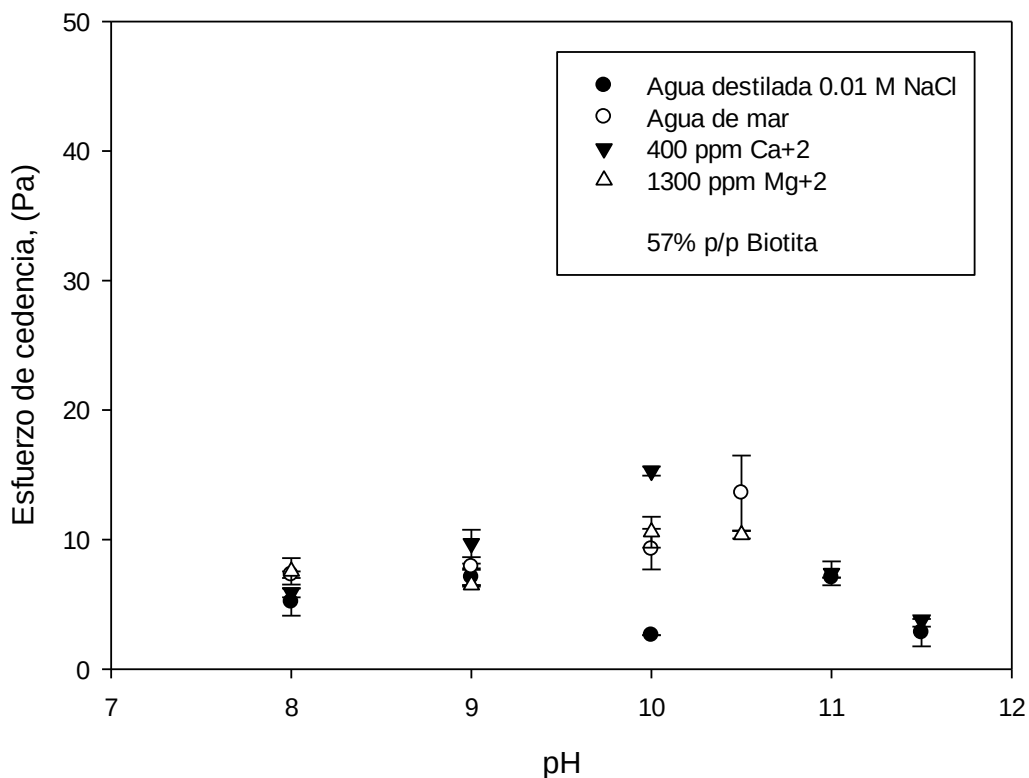


Figura 42. Esfuerzo de cedencia en función del pH para una suspensión de 57% p/p de biotita en distintos medios acuosos; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

Ahora, en la Figura 43 se muestra el esfuerzo de cedencia de la suspensión de muscovita en función del pH. De esta figura se puede notar más claramente que el comportamiento del esfuerzo de cedencia es independiente del pH, ya que los datos obtenidos para la suspensión de muscovita resultaron mucho más dispersos que los obtenidos para biotita. Es importante notar que en este caso se obtuvieron esfuerzos de cedencia mayores a los que presento la biotita, ya que en el caso de la biotita éstos oscilaban entre 0 a 15 Pa, mientras que en el caso de la muscovita el esfuerzo de cedencia está en un rango de 0 a 30 Pa. Los valores más altos obtenidos corresponden a la solución de 1300 ppm Mg^{+2} , de aquí podría deducirse que entre todas las soluciones acuosas utilizadas, sólo la presencia de magnesio en solución genera una mayor interacción entre las partículas de muscovita. Esto debería haberse visto reflejado de igual manera en agua de mar, ya que contiene la misma concentración de iones Mg^{+2} , y cómo es posible notar en la Figura 43 el esfuerzo de cedencia en agua de mar alcanza sólo la mitad del esfuerzo de cedencia obtenido en solución de 1300 ppm de Mg^{+2} . Esto se puede atribuir a la gran cantidad de iones presentes en el agua de mar que podrían dificultar la interacción entre iones Mg^{+2} y la muscovita.

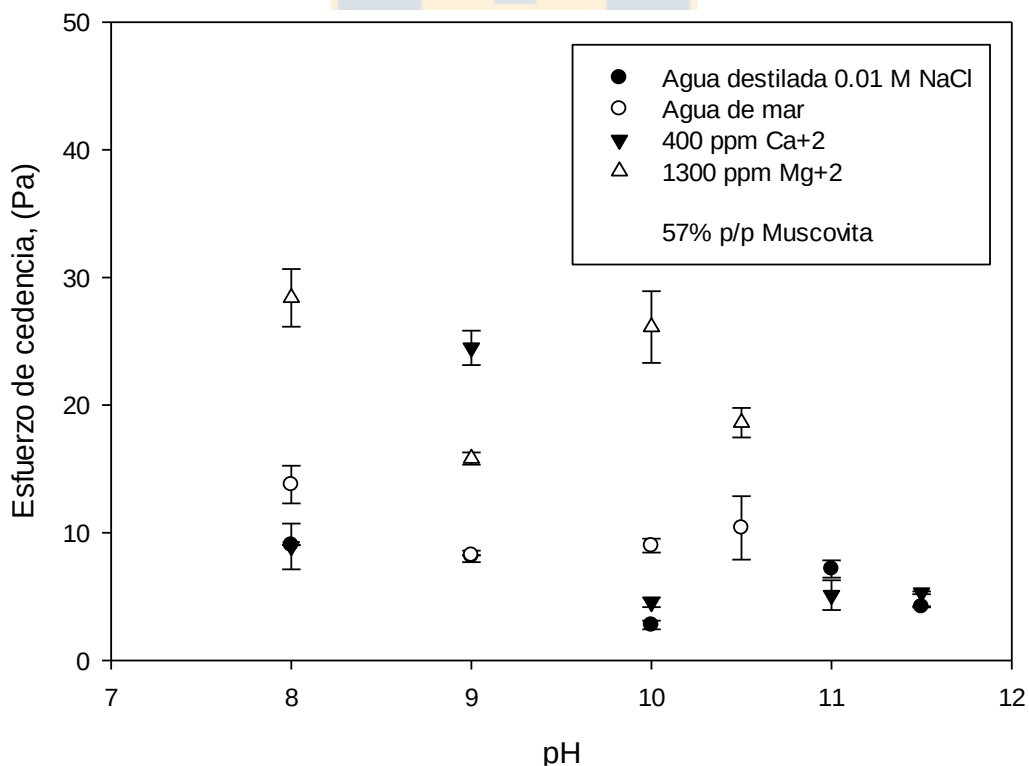


Figura 43. Esfuerzo de cedencia en función del pH para una suspensión de 57% p/p de muscovita en distintos medios acuosos; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

4.5 Micro flotaciones con control de potencial redox

Adicional a las pruebas de micro-flotación convencionales, se realizaron pruebas de micro flotación con control de potencial de la pulpa en presencia y ausencia de micas, esto en agua de mar a pH 8.5 y 10.5. Estas pruebas se realizaron con el fin de estudiar si existía algún rango de potencial en el que las micas tuviesen un comportamiento negativo en la flotación de calcopirita.

La Figura 44 muestra la curva de recuperación obtenida a pH 8.5 en agua de mar, como es posible observar el comportamiento de la calcopirita en ausencia de micas se relaciona con el observado en la Figura 20, la recuperación disminuye a potenciales oxidantes debido a la capa oxidada que se forma en la superficie de calcopirita y que impide la adsorción de dixantógeno en la superficie del mineral disminuyendo así su recuperación [Yin et al., 2000].

Por otra parte, se puede ver que ambas micas presentan un comportamiento muy similar en todo el rango de potencial estudiado y la presencia de éstas favorecería la recuperación de calcopirita desde potencial 100 mV a potenciales cercanos a 400 mV (SHE), esto podría atribuirse a una posible estabilización de la espuma provocada por la presencia de micas. Como se puede ver en la Figura 46, existe una diferencia en el colchón de espuma de calcopirita en ausencia y presencia de micas, si bien, en ausencia de micas se notan burbujas más pequeñas, la estabilidad de las burbujas resultó ser menor que las burbujas formadas en presencia de micas, caso en el cual se notó una espuma más persistente, sumado a esto se notó una leve diferencia en la altura de la espuma en presencia de micas, lo cual se atribuyó a la misma inestabilidad de la espuma formada en ausencia de micas.

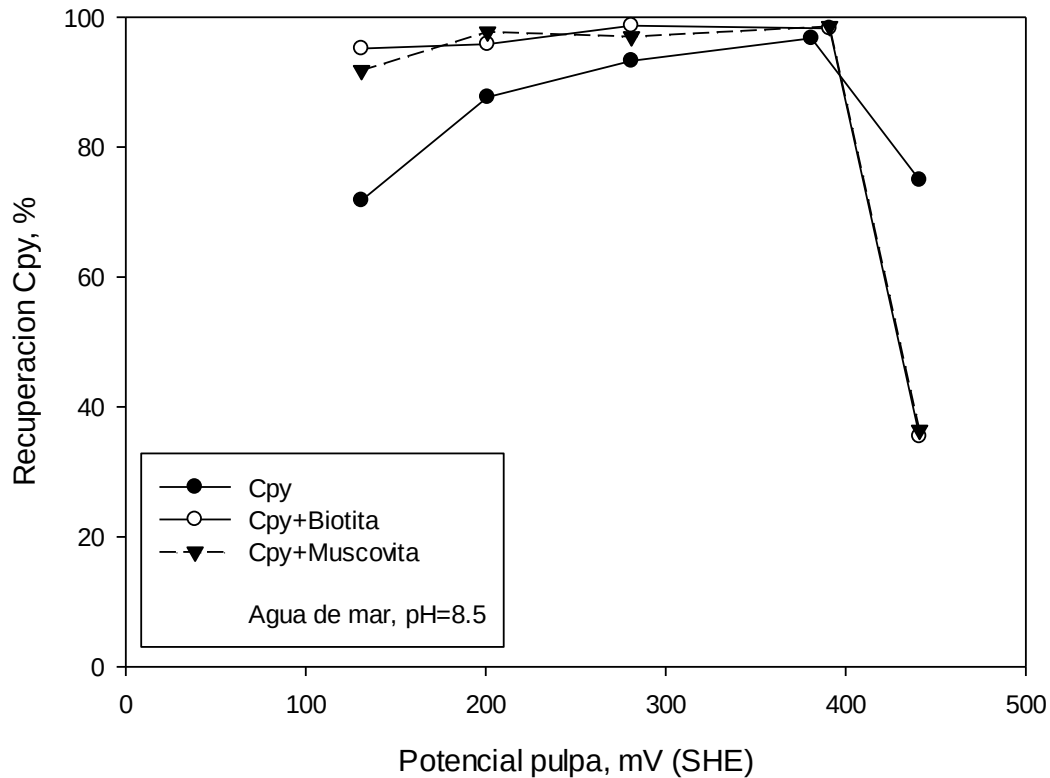


Figura 44. Efecto de la presencia de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar en función del potencial de la pulpa; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

Ahora, en la Figura 45 se presenta el efecto que tienen la biotita y la muscovita en la recuperación de calcopirita en agua de mar a pH 10.5. Aquí es posible observar un comportamiento de la calcopirita similar al que se presenta a pH 8.5, es decir, la disminución en la recuperación a potenciales sobre 400 mV (SHE) debido a la formación de óxido en la superficie mineral. En esta figura destacan principalmente dos puntos, el punto cercano a 400 mV (SHE), el cual corresponde al potencial natural de la pulpa y en el que se obtiene una disminución significativa en presencia de ambas micas. Y el punto correspondiente a potenciales de 300 mV (SHE), en el cual se observa un aumento en la recuperación de calcopirita en presencia de ambas micas.

La disminución en la recuperación de calcopirita en presencia de micas a potenciales cercanos a 400 mV (SHE) se debe a la formación de hidrox-complejos de Ca^{+2} y precipitados de los iones Mg^{+2} presentes en el agua de mar, los cuales en el caso de $\text{Ca}(\text{OH})^+$ actúan como puente entre las micas y el mineral, debido a que ambas partículas presentan una carga superficial negativa, y en el caso de

$\text{Mg}(\text{OH})_2$, estas especies sólidas se adhieren a la superficie de calcopirita favoreciendo la adhesión de micas al mineral, además de impedir o dificultar la acción del colector sobre éste.

Por otra parte, el aumento de la recuperación de calcopirita en presencia de micas a potenciales de 300 mV (SHE), se atribuye a que las micas podrían producir una estabilización de la espuma generando esto un aumento en la recuperación (Figura 46), este comportamiento se puede observar también a potenciales más bajos en donde si bien el efecto es menor, se distingue de igual manera un leve aumento en la recuperación de aproximadamente 5 puntos porcentuales en promedio para ambas micas. Es importante destacar además, que a potenciales oxidantes (~ 440 mV) la recuperación disminuye notoriamente con respecto a lo observado en la Figura 44, ya que en este caso además de estar presente el efecto que tiene la capa oxidada sobre la superficie mineral, existen en solución los complejos y precipitados de Ca^{+2} y Mg^{+2} que se forman a pH sobre 10 y que dificultan aún más la acción del colector sobre la calcopirita, además de interferir en la adhesión partícula-burbuja.

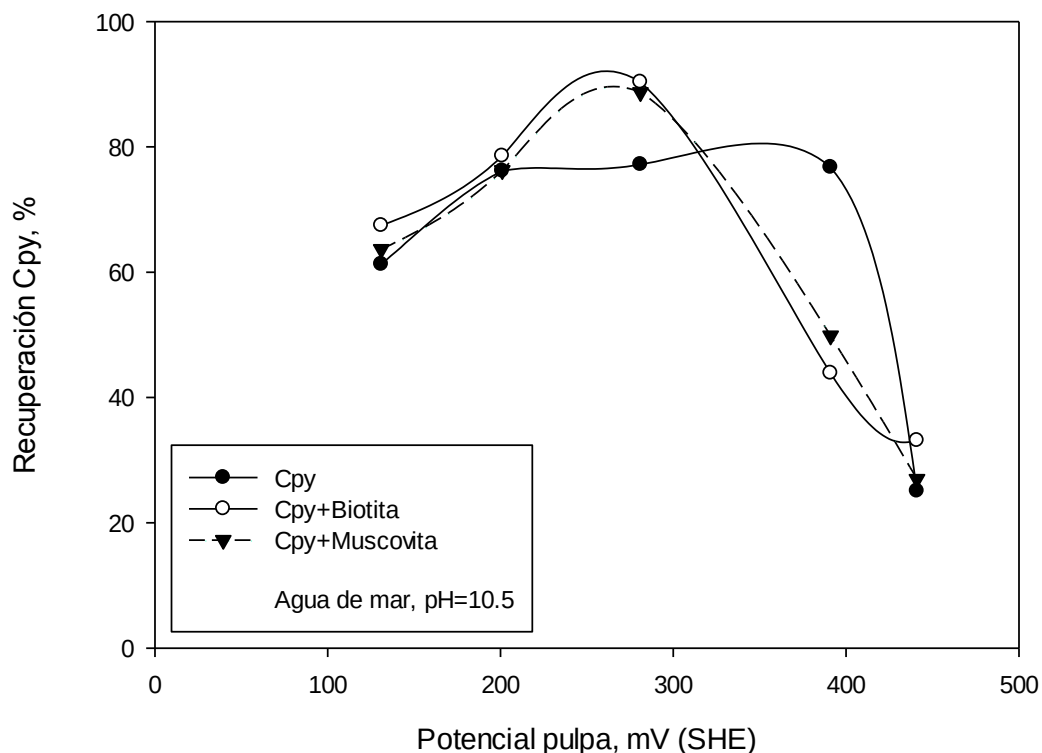


Figura 45. Efecto de muscovita y biotita en la recuperación de calcopirita en agua de mar en función del potencial de la pulpa; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

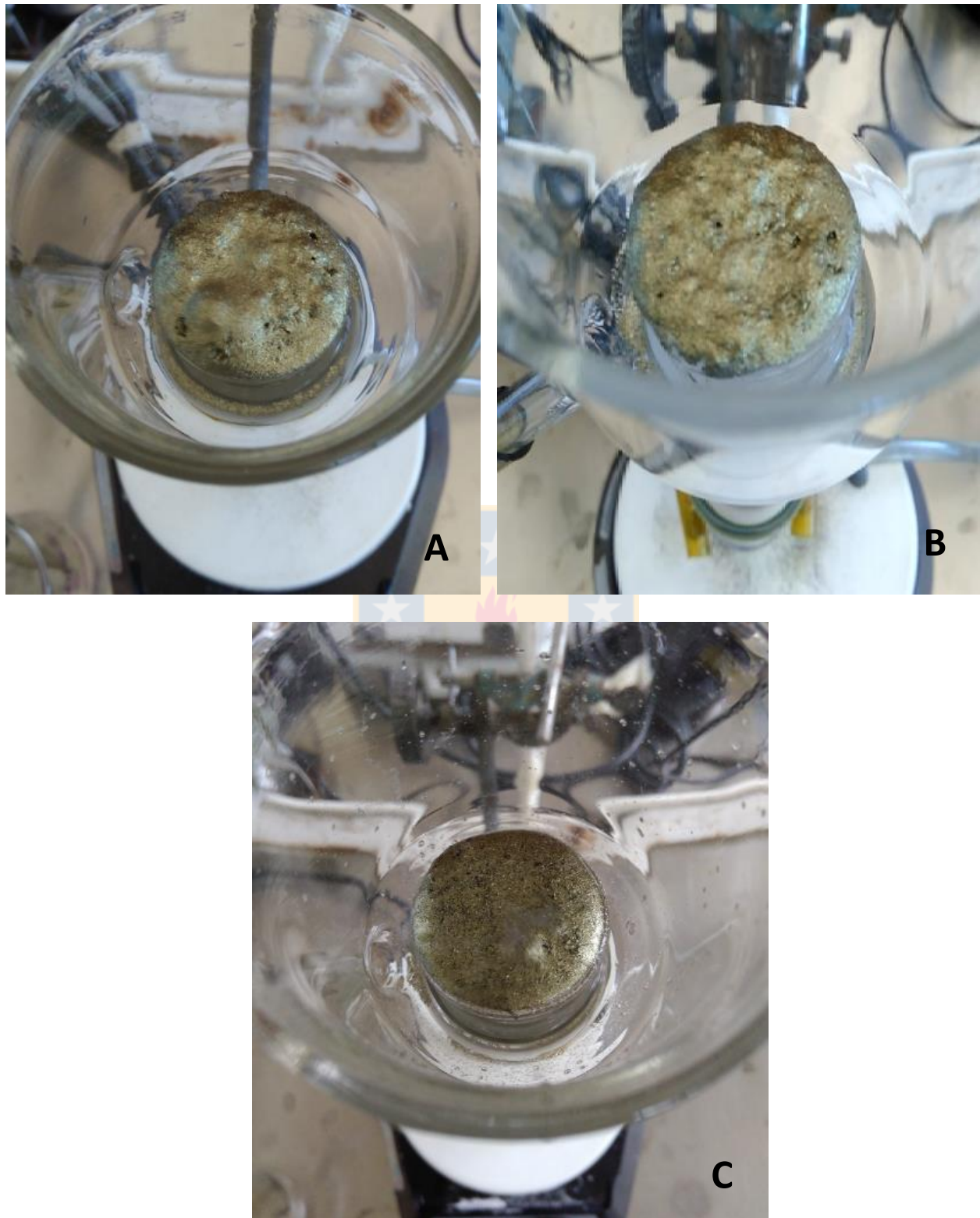


Figura 46. a) Colchón de espuma de calcopirita en presencia de biotita; b) Colchón de espuma en presencia de muscovita; c) Colchón de espuma de calcopirita en ausencia de micas.

5. CONCLUSIONES

Las pruebas de micro-flotación realizadas mostraron que tanto la biotita como la muscovita no presentaron un efecto depresante en la flotación de calcopirita en ningún medio acuoso utilizado. En agua destilada la presencia de micas en la solución no presentó efecto alguno en la recuperación de calcopirita en todo el rango de pH estudiado. Por su parte, la flotabilidad de calcopirita en agua de mar en presencia de micas tampoco se vio afectada, a excepción de pH 10.5, en donde se pudo observar un efecto depresante de las micas sobre la calcopirita, el cual se atribuyó a la presencia de los iones divalentes presente en altas concentraciones en el agua de mar. En tanto, las pruebas de micro-flotación en presencia de iones (Mg^{+2} , Ca^{+2} , Na^{+} , K^{+}) se observó que sólo en el caso de solución en presencia de iones Mg^{+2} se presentó un leve efecto depresante a pH 10, el cual fue atribuido a la formación de complejos del ion magnesio.

Los resultados obtenidos de las pruebas de turbidez por su parte, entregan una buena correlación a los resultados obtenidos en micro-flotación. En agua destilada y agua de mar las mediciones de turbidez en presencia de calcopirita resultaron bastante similares a las mediciones realizadas con micas puras, esto indica claramente que no existe interacción entre las partículas de mica y las partículas de calcopirita, es decir, no existe efecto slime coating, siendo esta la razón de que no exista un efecto depresante en la micro-flotación.

Las pruebas de tiempo de inducción en presencia de muscovita se relacionan tanto con los resultados obtenidos en micro-flotación, como con los resultados obtenidos en mediciones de turbidez, ya que las mediciones de tiempo de inducción realizadas en presencia de muscovita no presentaron variación respecto a la medición realizada en calcopirita sola. En el caso de la biotita, ésta produjo una disminución en el tiempo de inducción, el cual se atribuye a error experimental.

En las pruebas de reología, se observó para ambas micas, biotita y muscovita, que la interacción entre sus partículas no se vio alterada por la variación del pH de la suspensión. La viscosidad de la suspensión, en el caso de la biotita, no se vio alterada por la presencia de iones en solución, presentando valores dentro de un rango de 0 a 15 Pa en todos los medios acuosos utilizados. En el caso de la muscovita se observó que sólo la presencia de iones Mg^{+2} en solución provocó un aumento en el esfuerzo de cedencia de la suspensión, mientras que los otros medios acuosos no tuvieron efecto sobre la viscosidad.

Finalmente, las pruebas de micro-flotación con control de potencial redox realizadas en agua de mar a pH 8.5, indicaron que la presencia de micas favorece la flotabilidad de calcopirita a potenciales menores a 400 mV, ya que éstas produjeron un leve aumento en la recuperación de calcopirita, mientras que a potenciales sobre 400 mV la disminución en la recuperación de calcopirita se vio acrecentada por la presencia de micas. Esta disminución en la recuperación se atribuyó a la formación de una capa oxidada sobre la superficie la que provoca un aumento en la hidrofiliidad de la superficie mineral. Por otra parte, las pruebas de micro-flotación con control de potencial redox realizadas en agua de mar a pH 10.5, revelaron que a potenciales bajo 300 mV, la recuperación de calcopirita aumenta en presencia de micas y a potenciales cercanos a 400 mV la presencia de micas presenta un efecto depresante en flotabilidad de calcopirita.



6. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de flotación con mineral real en agua fresca y agua de mar, a distintos valores de pH y con distintas concentraciones de micas.
- Realizar pruebas de concentración critica de coalescencia (CCC), para estudiar el efecto de las micas sobre el tamaño de burbujas.
- Realizar pruebas en celdas de flotación con mineral real controlando el potencial redox, en agua de fresca y agua de mar.



7. BIBLIOGRAFÍA

- Allison, S.A., Goold, L.A., Nicol, M.J., Granville, A., (1972). Determination of the products of reaction between various sulfide minerals and aqueous xanthate solution, and a correlation of the products with electrode rest potentials. *Metallurgical and Materials*, vol. 3(10), 2613–2618.
- Arnold, B., Aplan, F., (1986). The effect of clays slimes on coal flotation, Part I: The nature of the clay. *International Journal of Mineral Processing*, 225- 242.
- Biedermann, A., Koch, C.B., Lorenz, W., Hirt, A., (2014). Low-temperature magnetic anisotropy in micas and chlorite. *Tectonophysics*, 3.
- Bray, A.W., Benning, L.G., Bonneville, S., Oelkers, E.H., (2014). Biotite surface chemistry as a function of aqueous fluid composition. *Geochimica et Cosmochimica*, 128, 58-70.
- Brigatti, M.F., Galan, E., Theng, B.K.G., (2006). Structures and mineralogy of clay minerals. *Handbook of Clay Science*, vol. 1.
- Bulatovic, M., (2007). *Handbook of Flotation Reagents. Chemistry, Theory and Practice: Flotation of Sulfide Ores*.
- Castro, P., Huber, M.E., (2003). *Marine Biology* (4th edition). McGraw-Hill.
- Castro, S., (2012). Challenges in flotation of Cu-Mo Sulfide ores in seawater. In: Drelich, J. (Ed.), *Water in Mineral Processing*. SME, Colorado, 29-40.
- Castro, S., Laskowski, J., (2008). Flotation in Concentrated Aqueous Electrolyte Solutions. *Proceedings of the 11th International Mineral Processing Symposium, Belek-Atalya, Turkey 2008*.
- Castro, S., Laskowski, J., (2011). Froth flotation in sea water. *KONA Powder and Particle Journal*, 4-15.
- Castro, S., Rioseco, P., Laskowski, J., (2012). Depression of molybdenite in seawater. In *Proceeding of XXVI International Mineral Processing Congress IMPC 2012, New Delhi, India*.
- Chander, S., (2003). A brief review of pulp potentials in sulfide flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 72, 141-150.
- Concha, J., Wasmund, E., (2017). Flotacion de finos y gruesos aplicada a la recuperación de minerales de cobre.

Connelly, D., (2011). High clay ores a mineral processing nightmare. *Australian Journal of Mining*, 28-29.

Cortes, C., (2016). Efecto de la presencia de caolinita y montmorillonita en la flotabilidad de calcopirita de alta pureza en agua destilada, agua de mar e iones. Memoria de título Ingeniería Civil Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Eigeles, M.A., Volova, M.L., (1964). On the Mechanism of Activating and Depressant Action in Soap Flotation. *Proc. 7th International Mineral Processing Congress* (N. Arbiter, ed.), Gordon and Breach, vol. 1, 269–277.

Eigeles, M.A., Volvenkova, V.S., (1963). Inorganic Electrolytes and Colloids in Elementary Flotation. *Proc. 6th International Mineral Processing Congress* (A. Roberts, ed.), Peramon Press, 513–525.

Farrokhpay, S., Bradshaw, D., (2012). Effect of clay minerals on froth stability in mineral flotation: a review. In *Proceeding of XXVI International Mineral Processing Congress*, New Delhi, 4601-4611.

Farrokhpay, S., (2012). The importance of rheology in mineral flotation: A review. *Minerals Engineering*, 36-38, 272-278.

Farrokhpay, S., Ndlovu, B., (2013). Effect of phyllosilicate minerals on the rheology, colloidal and flotation behaviour of chalcopyrite mineral. In: *Chemeca 2013: Challenging Tomorrow*. Chemeca 2013: Australasian Conference on Chemical Engineering, Brisbane, QLD, Australia, 1-7.

Forbes, E., Davey, K.J., Smith, L., (2014). Decoupling rheology and slime coatings effect on the natural flotability of chalcopyrite in a clay-rich flotation pulp. *Minerals Engineering*, 56, 136-144.

Friedrich, F., Heissler, S., Faubel, W., Nüesch, R., Weidler, P.G., (2007). Cu (II)-intercalated muscovite: An infrared spectroscopy study. *Vibrational Spectroscopy*, 43, 427-434.

Gaudin, A.M., Grob J., Henderson, H., (1931). Effect of Particle Size in Flotation. Technical Publication No. 414, AIME, New York, NY, USA.

Guo, H., Yen, W.-T., (2003). Pulp potential and flotability of chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 16, 247-256.

Guo, Y., Yen, W.-T., (2005). Selective flotation of enargite from chalcopyrite by electrochemical control. *Minerals Engineering*, 18, 605-612.

Han, M.Y., Ahn, H.J., Shin, M.S., Kim, S.R., (2004). The effect of divalent metal ions on the zeta potential of bubbles. *Water Science and Technology*, 50, 49–56.

Hu, Y., Sun, W., Wang, D., (2009). Electrochemical Flotation Separation of Sulphide Minerals. *Electrochemistry of Flotation of Sulphide Minerals*, 244-268.

Hu, W.B., (1982). Flotation. Metallurgical Industry Publishing House, Beijing China, 249–259.

Jiang, Y.R., Zhou, L.H., Xue, Y.L., Zhang, Q.X., (1999). Electrochemical flotation separation of chalcopyrite from molybdenite by CMEh control. *Proceedings of an international Workshop on Electrochemistry of Flotation of Sulfide Minerals*, Changsha, China, 110–113.

Jordens, A., Marion, C., Grammatikopoulos, T., Waters, K.E., (2016). Understanding the effect of mineralogy on muscovite flotation using QEMSCAN. *International Journal of Mineral Processing*, 155, 6-12.

Kelm, U., Helle, S., Jerez, O., Pincheira, M., (2013). What are copper clays?, Geometallurgical implications. *Copper international Conference (COPPER 2013)*, Santiago, Chile, December 1-4.

Klein, C., Dutrow, B., (2008). *Manual of mineral science*. 23rd ed. New York.

Klein, C., Hurlbut, C., (1993). *Manual of mineralogy (after James D. Dana)*. 21st ed., Wiley international ed.

Krieger, I.M., Maron, S.H. (1951), Rheology of synthetic latex. Test of some flow equations. *Journal of Colloid Science*, 6, 528-538.

Laskowski, J., Castro, S., Ramos, O., (2013). Effect of seawater main components on frothability in the flotation of Cu-Mo sulfide ore. *Physicochemical Problems of Minerals Processing*, 50(1), 17-29.

Leppinen, J.O., Basilio, C.I., Yoon, R.H., (1988). Spectroelectrochemical study of ethyl xanthate adsorption on sulfide minerals. In: Richardson, P.E., Woods, R. (Eds.), *Electrochemistry in Mineral and Metal Processing II*. In: *Proceedings of the Electrochemical Society*, 49–65.

Li, C., Somasundaran, P., (1991). Reversal of Bubble charge in multivalent inorganic salt solution-effect of Magnesium. *Journal of Colloid and Interface Science*, 146 (1).

Li, C., Runge, K., Shi, F., Farrokhpay, S., (2018). Effect of froth rheology on froth and flotation performance. *Minerals Engineering*, 115, 4-12.

- Liu, W., Zhang, S., Wang, W., Zhang, J., Yan, W., Deng, J., Feng, O., Huang, Y, (2015). The effect of Ca(II) y Mg(II) ions on the flotation of spodumene using NaOL. *Minerals Engineering*, 79, 40-46.
- Luckham, P., Rossi, S., (1999). The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 82, 43-92.
- Marion, C., Jordens, A., McCarthy Sh., Grammatikopoulos, T., Waters, K.E., (2015). An investigation into the flotation of muscovite wih an amine collector and calcium lignin sulfonate depressant. *Separation and Purification Technology*, 149, 216-227.
- Menacho, J.M., Aliaga, W., Valenuela, R., Ramos, V., Olivares, I., (1993). Selective flotation of enargite and chalcopryrite. *Minerals*, vol. 48 (203), 33–39.
- Mitchell, T., Nguyen, A., Evans, G., (2005). Heterocoagulation of chalcopryrite and pyrite minerals in flotation separation. *Advances in Colloid and Interface Science*, 114–115; 227–237.
- Ndlovu, B., Becker, M., Forbes, E., Deglon, D., Franzidis, J-P., (2011). The influence of phyllosilicate mineralogy on the reology of mineral slurries. *Minerals Engineering*, 24, 1314-1322.
- Ndlovu, B., Farrokhpay, S., Bradshaw, D., (2013). The effect of phyllosilicate minerals on mineral processing industry. *International Journal of Mineral Processing*, 125, 140-156.
- Ndlovu, B., Forbes, E., Farrokhpay, S., (2014). A preliminary rheological calssification of phyllosilicate group minerals. *Minerals Engineering*, 55, 190-200.
- Nelson, S., (2015). Phyllosilicates (micas, chlorite, talc & serpentine). *Mineralogy*. Department of earth and environmental sciences, Tulane University.
- Ozkan, A., Ucbeyiay, H., Duzyol, S., (2009). Comparison of stages in oil agglomeration process of quartz with sodium oleate in the presence of Ca(II) and Mg(II) ions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 329, 81–88.
- Peng, Y., Zhao, S., (2011). The effect of surface oxidation of copper sulfide minerals on clay slime coating in flotation. *Minerals Engineering*, 24 (15), 1687–1693.
- Quiroz, R., Pagliero, A., (1988). Electrochemical study of chalcopryrite in the presence of sodium isopropyl xanthate. *Proceedings of the 2nd Latin–American Congress on Froth Flotation*, vol. 2.

Rand, B., Melton, I.E., (1977). Particle interaction in aqueous kaolinite suspensions: I. Effect of pH and electrolyte upon the mode of particle interaction in homoionic sodium kaolinite suspensions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 60, 308-320.

Rao, K.H., Cases, J.M., Barres, O., Forssberg, K.S.E., (1995). Flotation, Electrokinetic and FT-IR Studies of mixed anionic/cationic collectors in Muscovite-Biotite System. *Mineral Processing: Recent Advances and Future Trends*, 29- 45.

Rath, R.K., Subramanian, S., (1997). Studies on adsorption of guar gum onto biotite mica. *Minerals Engineering*, vol.10 (12), 1405-1420.

Rojas, A., (2017). Evaluación del uso de hexametáfosfato de sodio y de water glass sobre la flotación de calcopirita de alta pureza en agua fresca y agua de mar con presencia de caolinita. Memoria de título Ingeniería civil Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

Suyantara, G.P.W, Hirajima, T., Miki, H., Sasaki, K., (2018). Flotability of molybdenite and chalcopyrite in artificial seawater. *Minerals Engineering*, 115, 117-130.

Van Wazer, J.R., Lyons, J.W., Kim, K.Y., Colwell, R.E., (1963). *Viscosity and Flow Measurement*. John Wiley and Sons, New York.

Wang, Y., Peng, Y., Nicholson, T., Lauten, R.A., (2015). The different effects of bentonite and kaolin on copper flotation. *Applied Clay Science*, 114, 48-52.

Warkentin, B.P., (1961). Interpretation of the upper plastic limit of clays. *Nature*, vol. 190, (4772), 287-288.

Whorlow, R.W., (1980). *Rheological Techniques*. Ellis Horwood Limited, Chichester, New York, 220.

Woods, R., (2000). Recent advances in electrochemistry of sulfide mineral flotation. *Proceedings of an International Workshop on Electrochemistry of Flotation of Sulfide Minerals*, Changsha, China. *Transaction of Metal Society of China* 10, 26–29 (Special issue).

Woods, R., (2003). Electrochemical potential controlling flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 72 (1–4), 151–162.

Wyslouzil, H. E., Kohmeunch, J., Christodoulou, L., Fan, M. (2009). Coarse and fine particle flotation. In *Proceedings of the 48th Conference of Metallurgists*.

- Xu, D., Ametov, I., Grano, S.R., (2011). Detachment of coarse particles from oscillating bubbles – the effect of particle contact angle, shape and medium viscosity. *International Journal of Mineral Processing*, 101 (1–4), 50–57.
- Xu, L., Wu, H., Dong, F., Wang, L., Wang, Z., Xiao, J., (2013). Flotation and adsorption of mixed cationic/anionic collectors on muscovite mica. *Minerals Engineering*, 41, 41-45.
- Yen, W.T., Tajadod, J., (2000). Selective flotation of enargite and chalcopyrite. *Proceeding of the XX IMPC B 8A*, 49–55.
- Yianatos, J., (2005). *Apuntes de curso "Flotación de minerales"*. Departamento de procesos químicos, biotecnológicos y ambientales, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Yin, Q., Vaughan, D.J., England, K.E.R., Kelsall, G.H., Brandon, N.P., (2000). Surface oxidation of chalcopyrite (CuFeS_2) in alkaline solution. *Journal of the Electrochemical Society*, 147(8), 2945–2951.
- Yu, Y., Ma, L., Zhang, Z., Wang, L., Yao, L., (2015). Mechanism of entrainment and slime coating on coal flotation. *Journal of China Coal Society*, 40, 652–658.
- Yu, Y., Ma, L., Cao, M., Liu, Q., (2017). Slime coatings in froth flotation: A review. *Minerals Engineering*, 114, 26-36.
- Yukselen-Aksoy, Y., Kaya, A., Ören, A., (2008). Seawater effect on consistency limits and compressibility characteristics of clays. *Engineering Geology*, 102, 54-61.

8. ANEXOS

8.1 Micro flotaciones con variación de porcentaje de micas

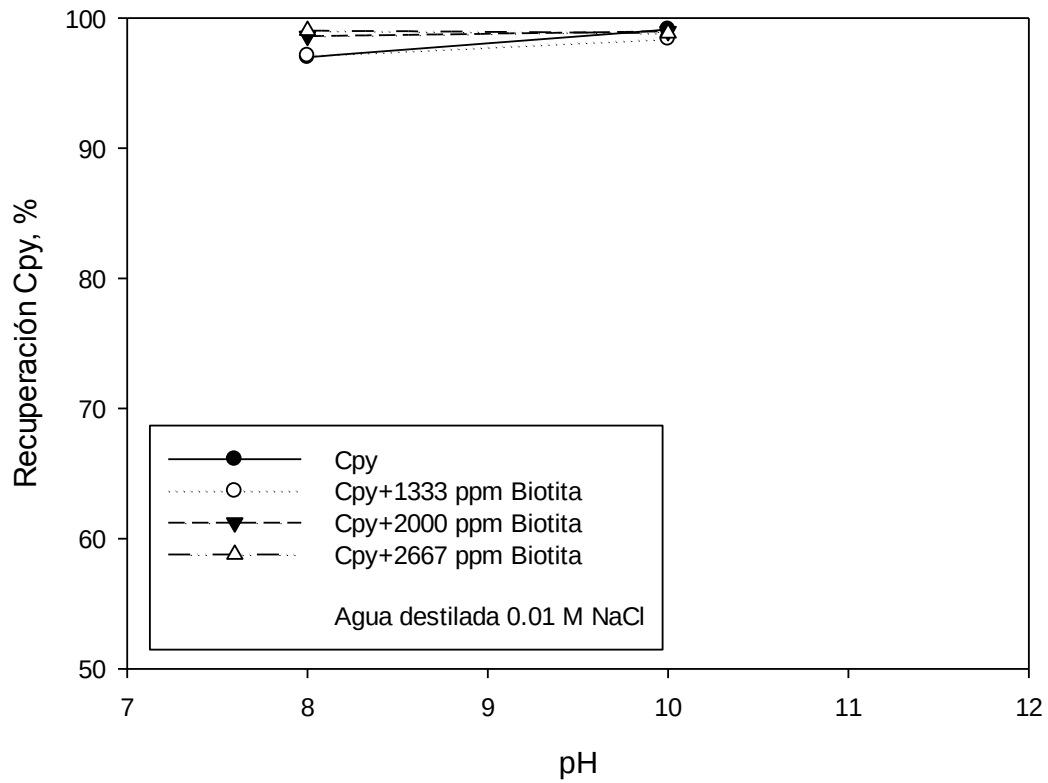


Figura A-1. Efecto de la presencia de biotita en la recuperación de calcopirita a porcentajes de 15%, 20%, 30% y 40% de mica con respecto a la masa de mineral en agua destilada 0.01 M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

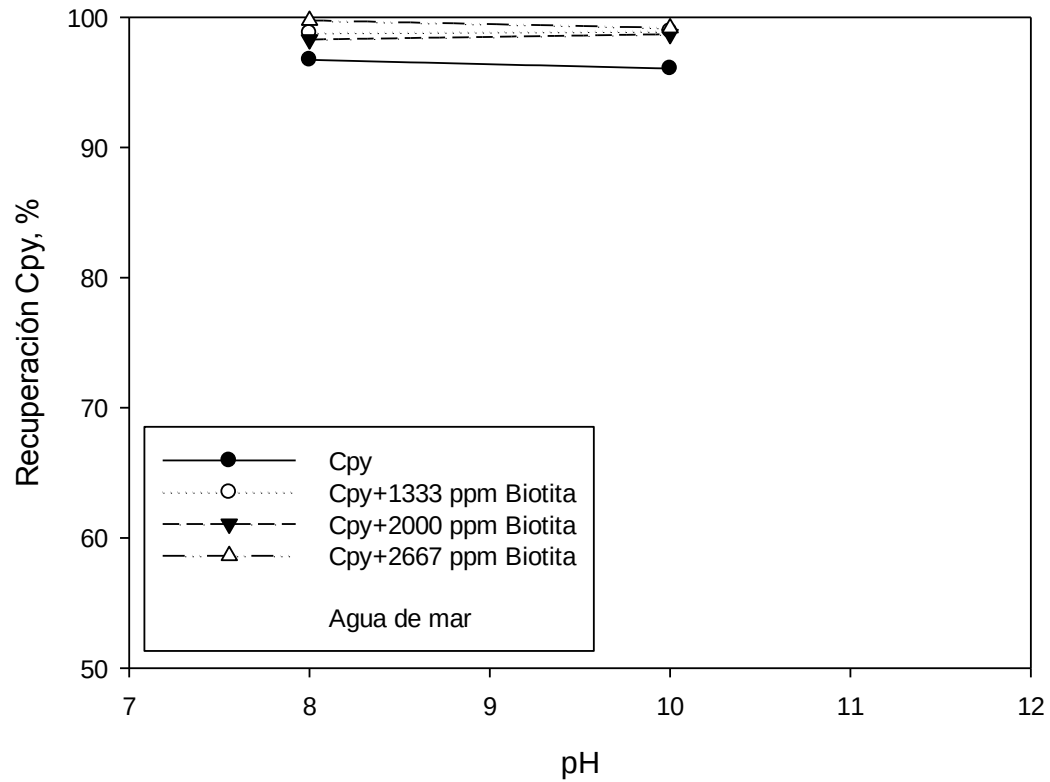


Figura A-2. Efecto de la presencia de biotita en la recuperación de calcopirita a porcentajes de 15%, 20%, 30% y 40% de mica con respecto a la masa de mineral en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

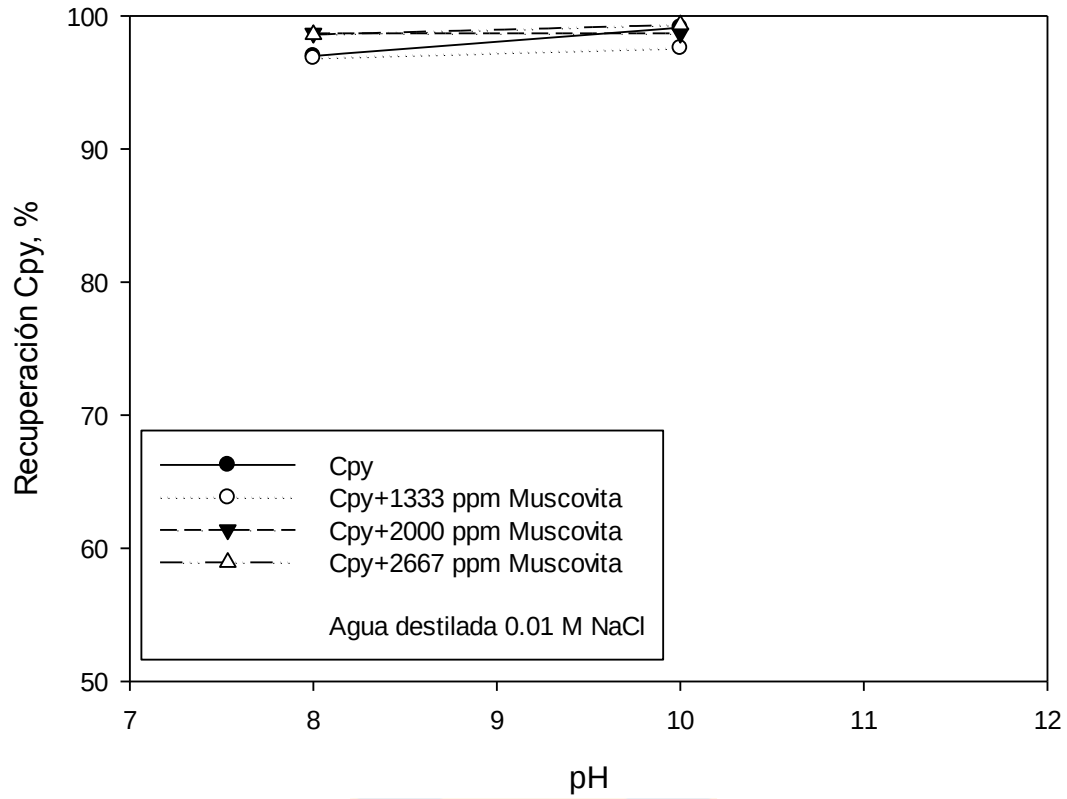


Figura A-3. Efecto de la presencia de muscovita en la recuperación de calcopirita a porcentajes de 15%, 20%, 30% y 40% de mica con respecto a la masa de mineral en agua destilada 0.01 M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

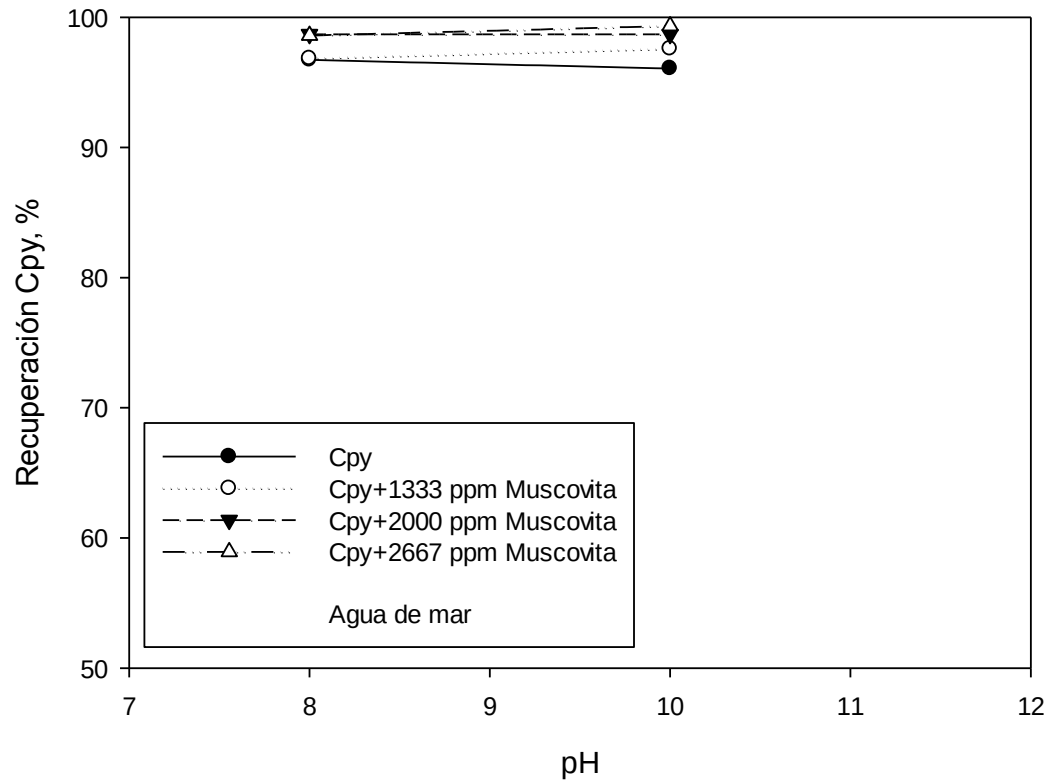


Figura A-4. Efecto de la presencia de muscovita en la recuperación de calcopirita a porcentajes de 15%, 20%, 30% y 40% de mica con respecto a la masa de mineral en agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

8.2 Pruebas de turbidez en presencia de iones

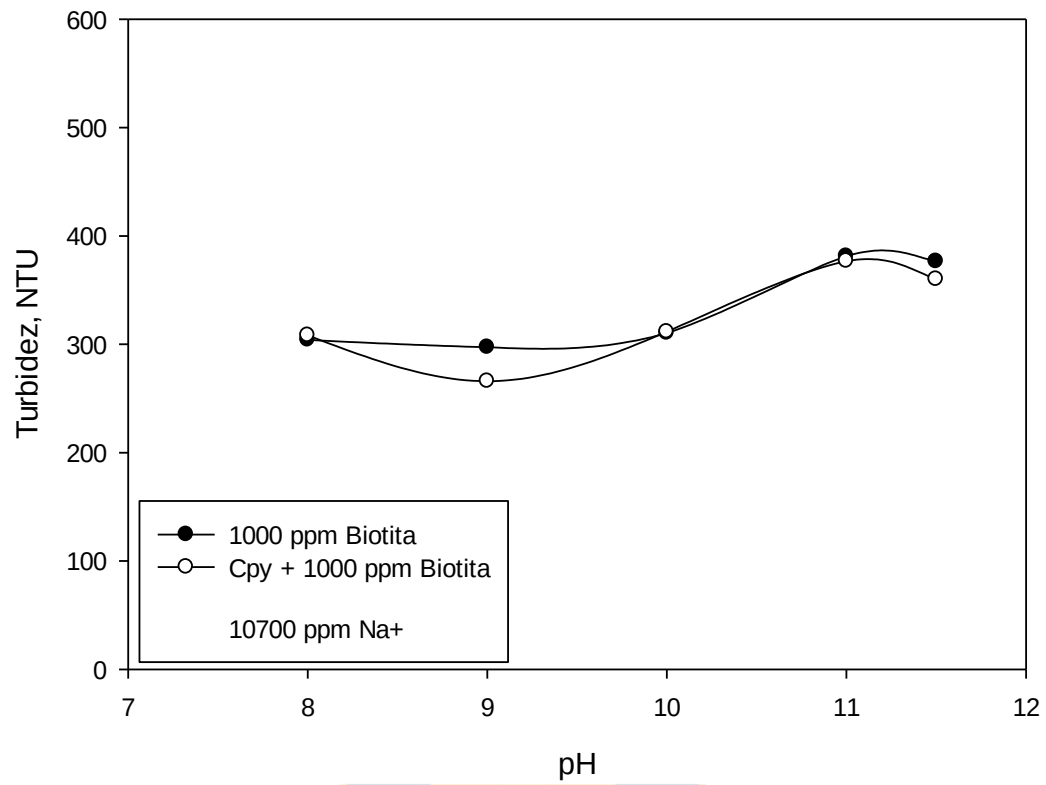


Figura A-5. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 10700 ppm Na^+ ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

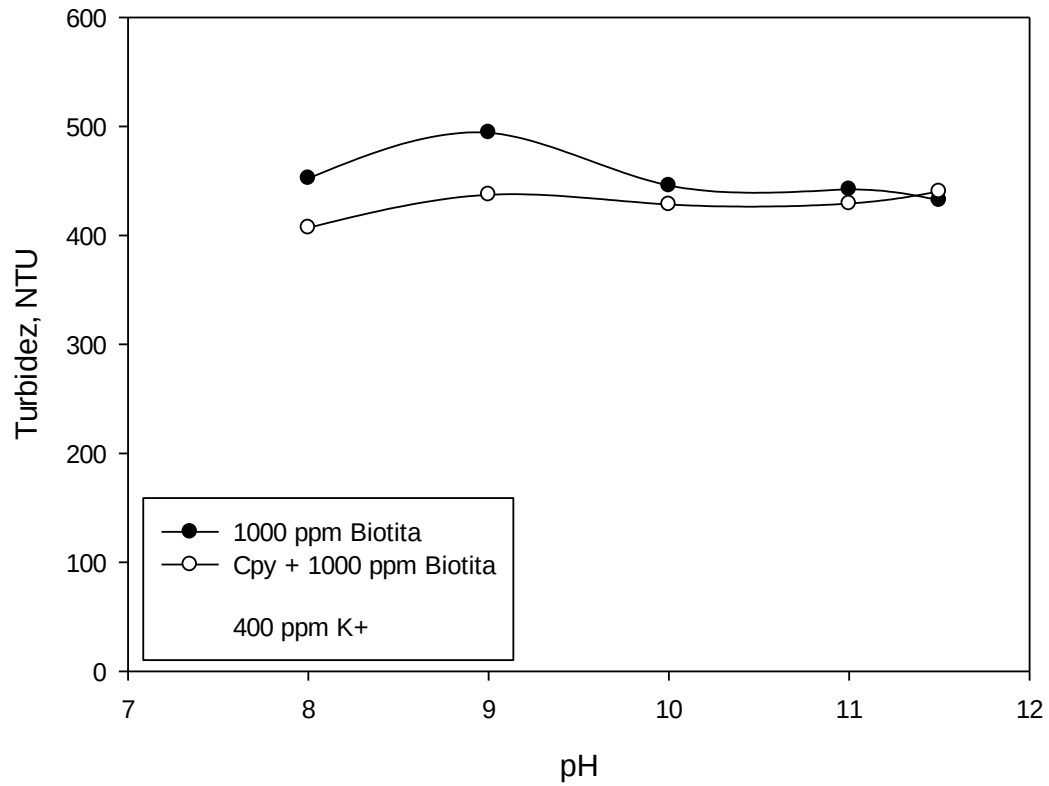


Figura A-6. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 400 ppm K⁺; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

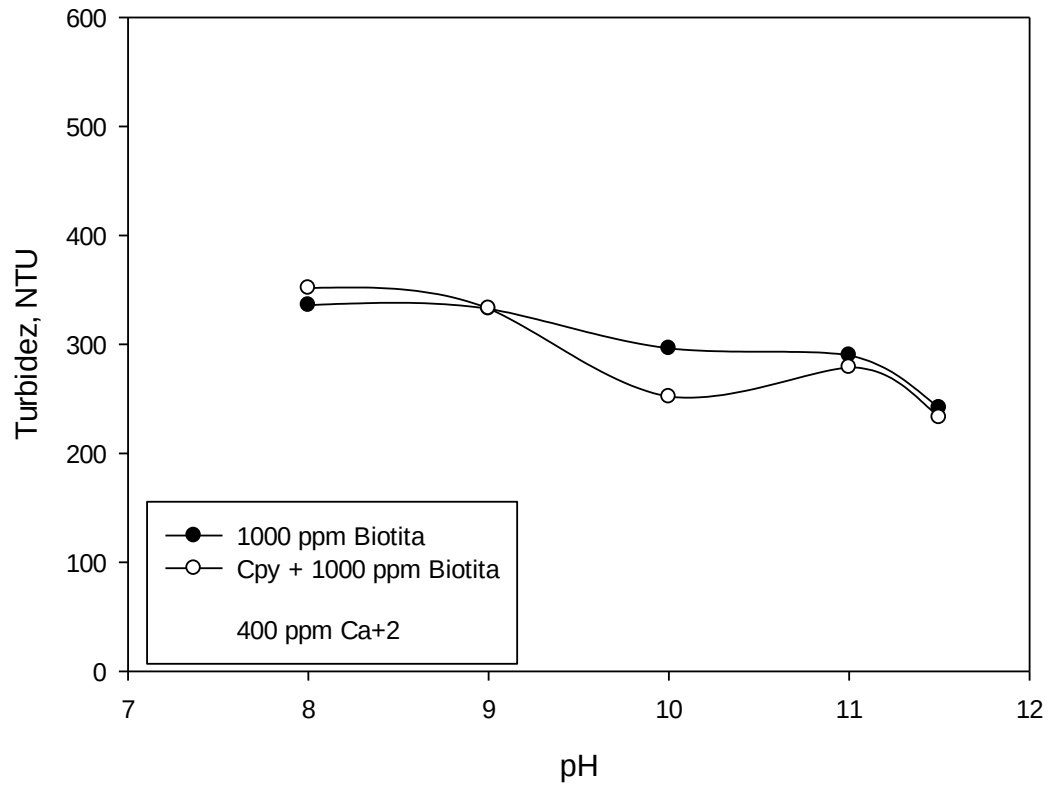


Figura A-7. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 400 ppm Ca^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

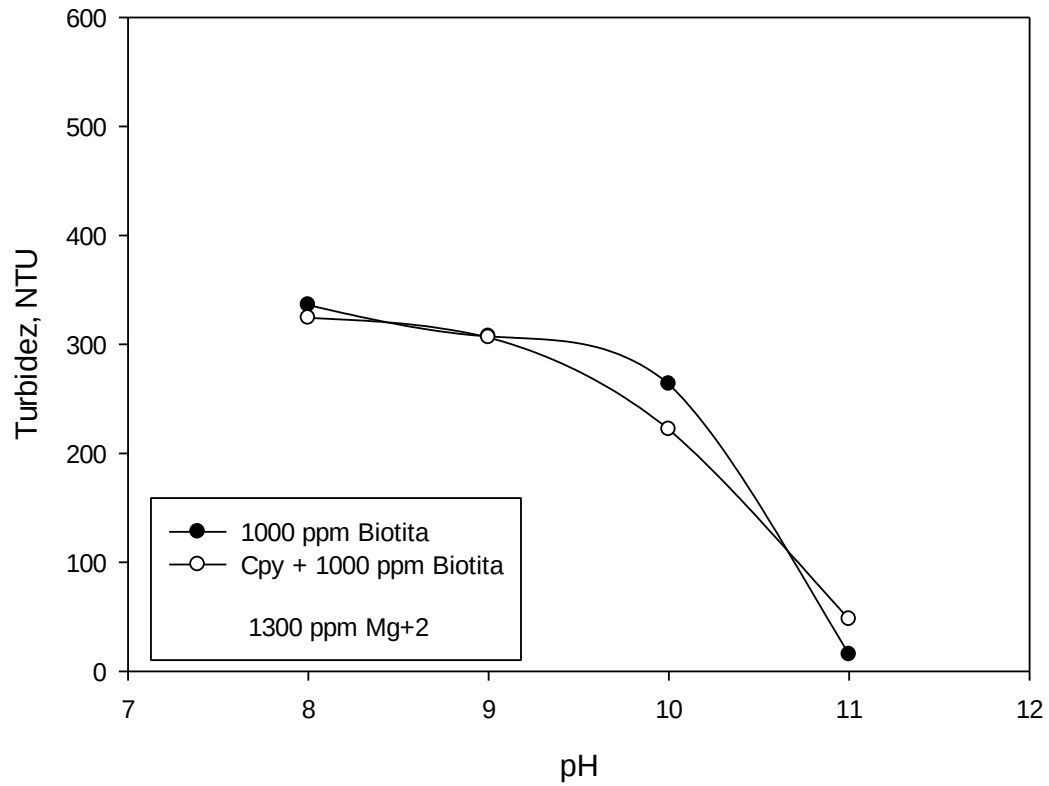


Figura A-8. Turbidez suspensión de biotita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

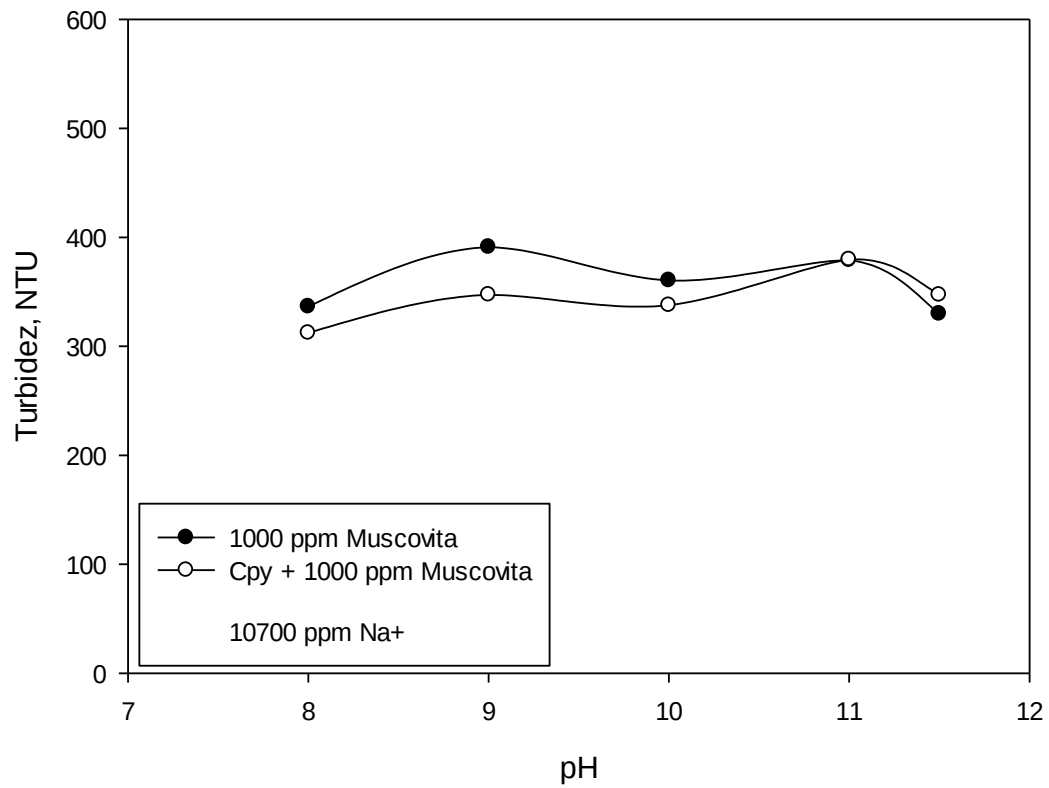


Figura A-9. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 10700 ppm Na⁺; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

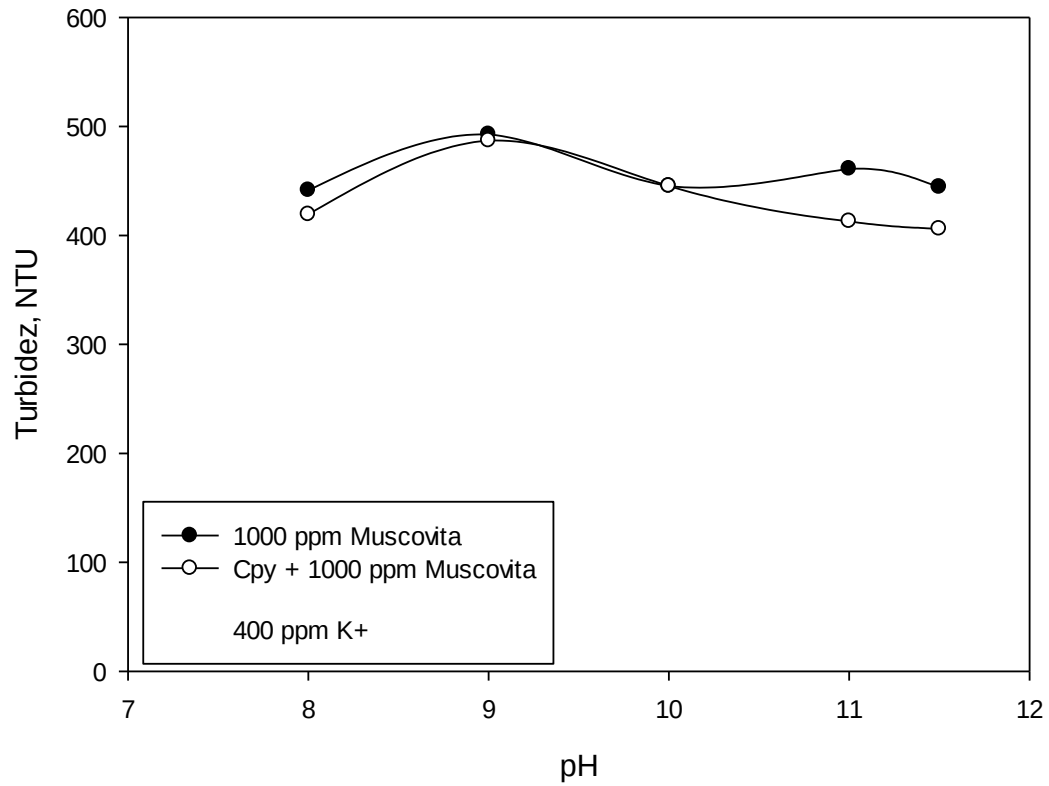


Figura A-10. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 400 ppm K^+ ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

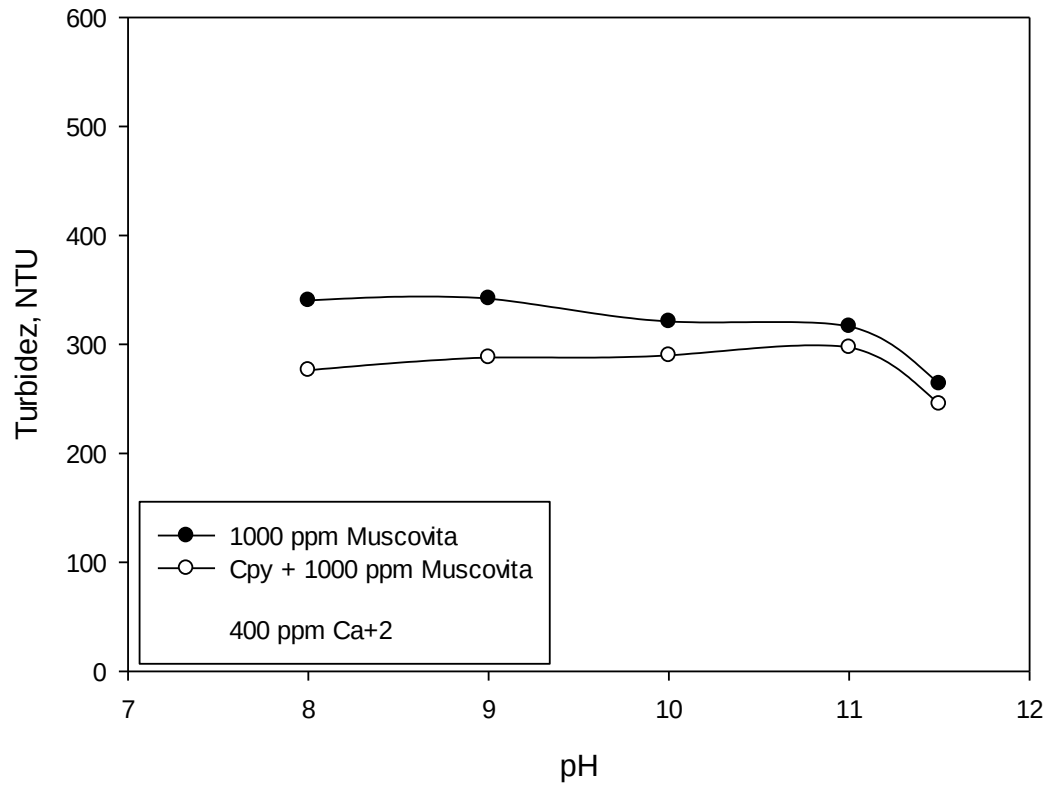


Figura A-11. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 400 ppm Ca²⁺; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

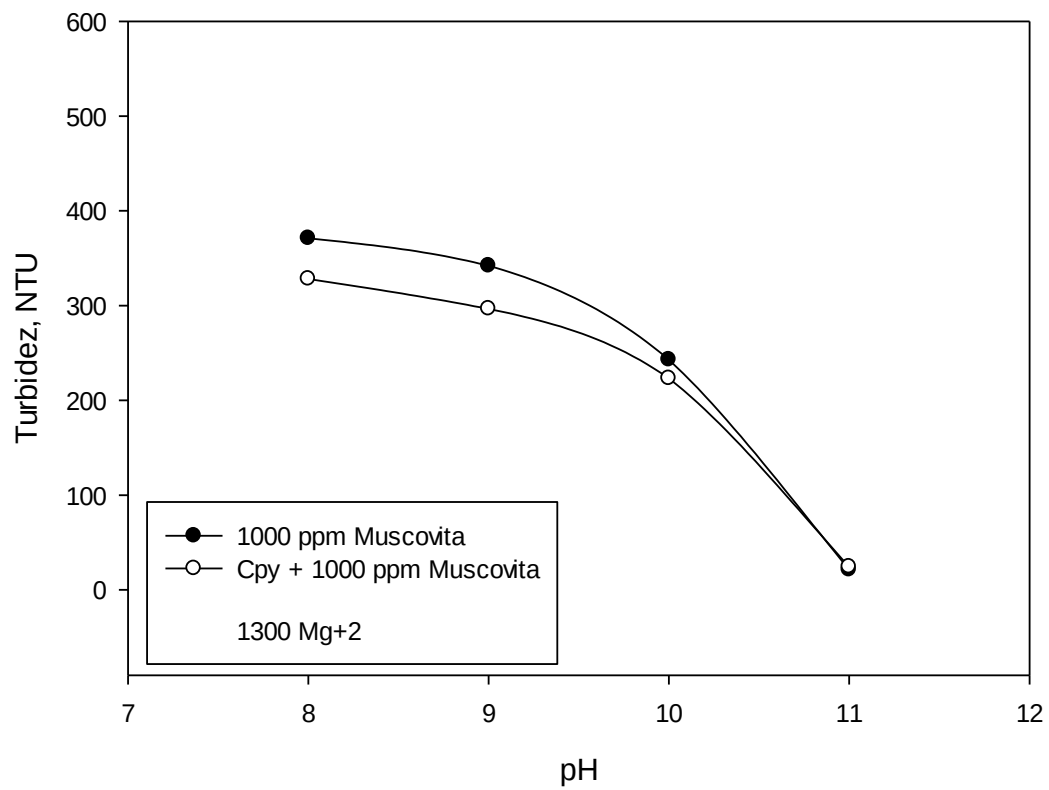


Figura A-12. Turbidez suspensión de muscovita en ausencia y presencia de calcopirita en solución de 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

8.3 Pruebas de reología

8.3.1 Reogramas para suspensión de biotita

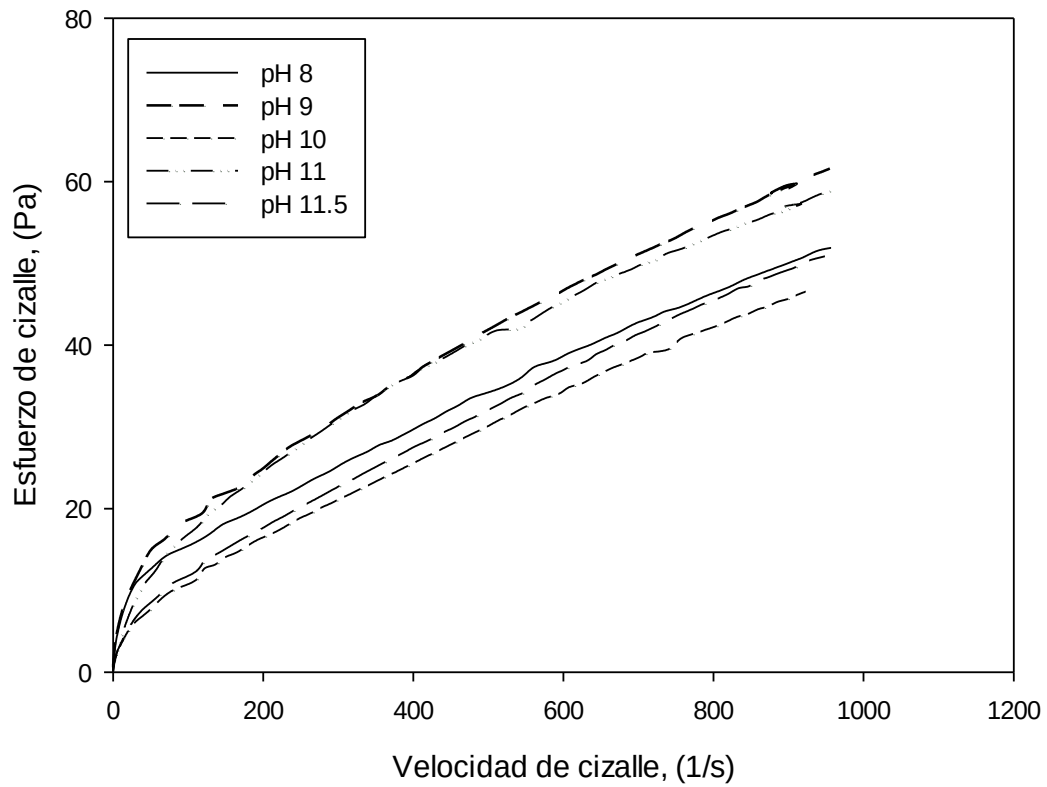


Figura A-13. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de biotita; agua destilada 0.01 M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

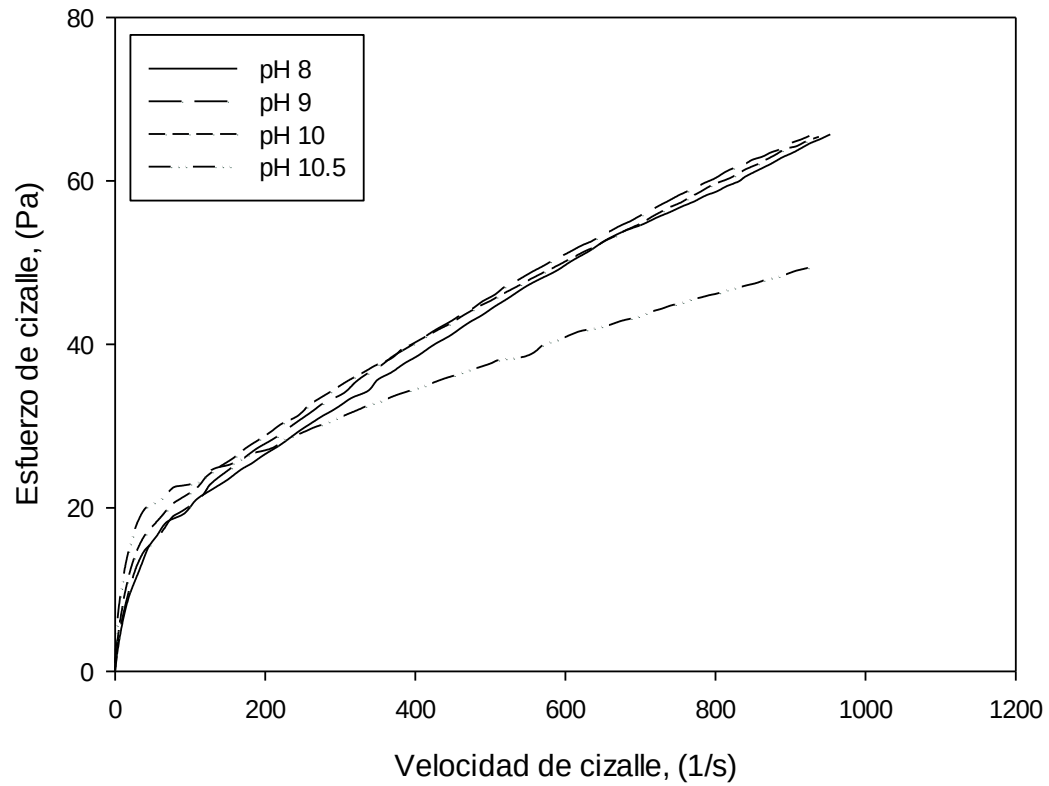


Figura A-14. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de biotita; agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

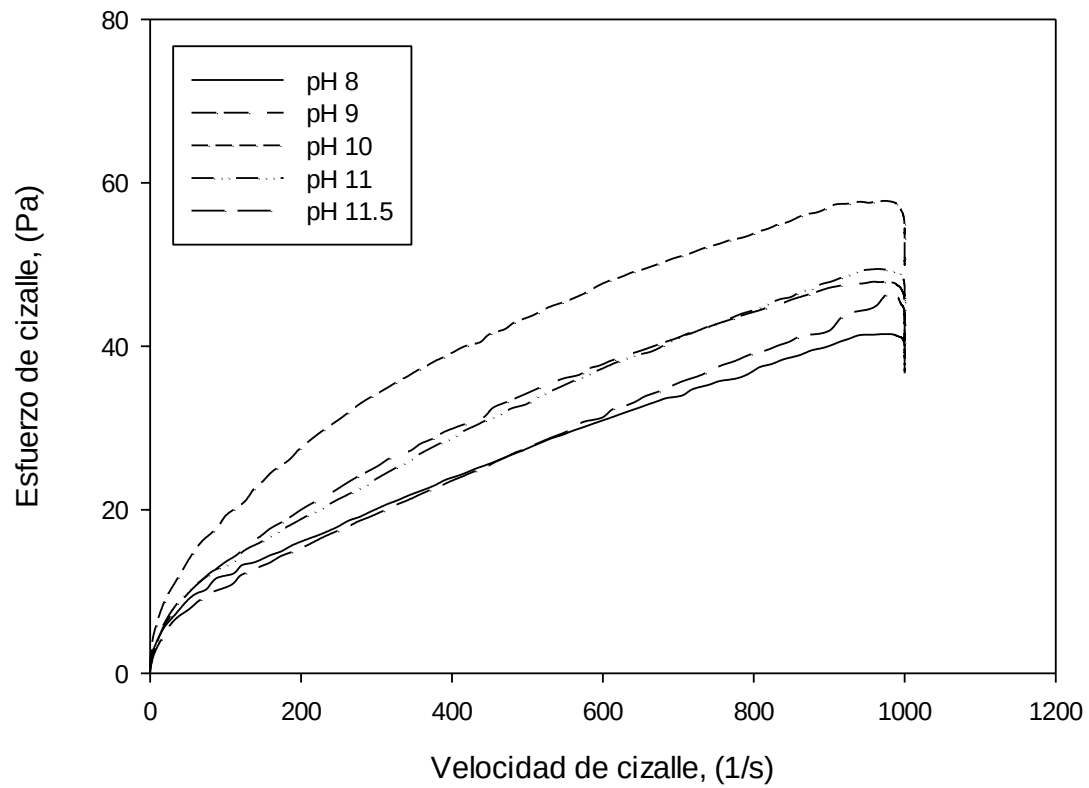


Figura A-15. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de biotita; 400 ppm Ca^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

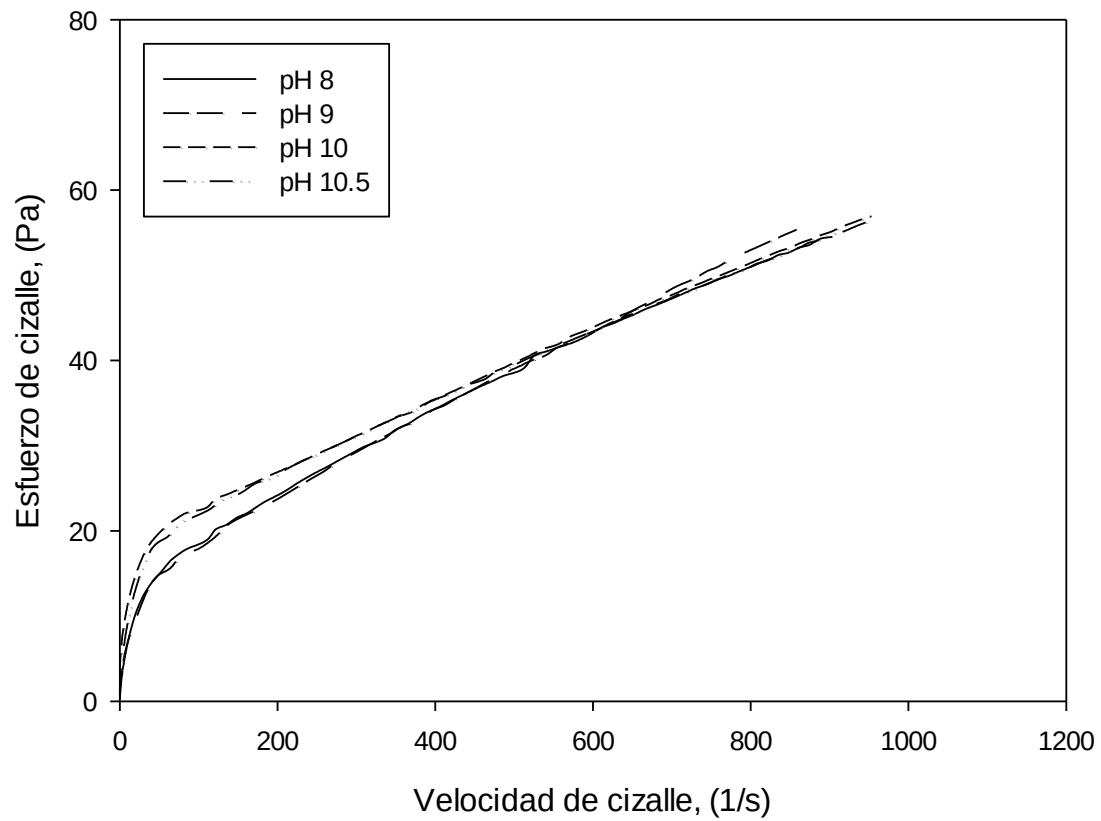


Figura A-16. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de biotita; 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

8.3.2 Reogramas para suspensión de muscovita

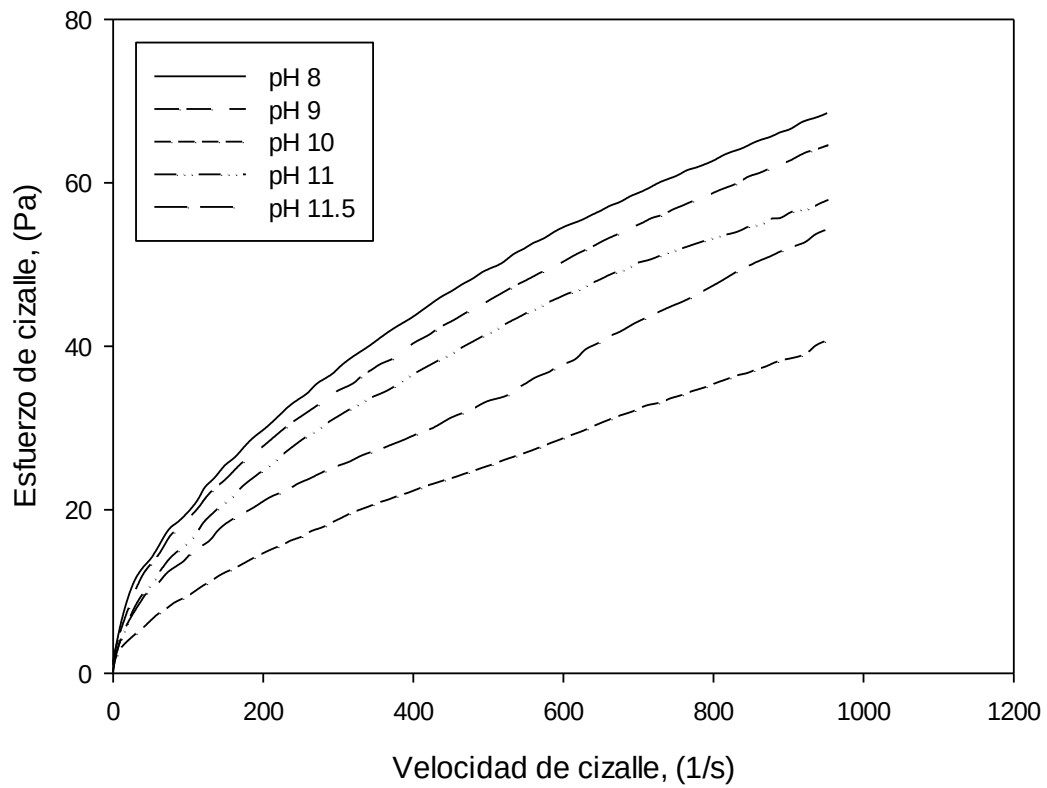


Figura A-17. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de muscovita; agua destilada 0.01 M NaCl; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

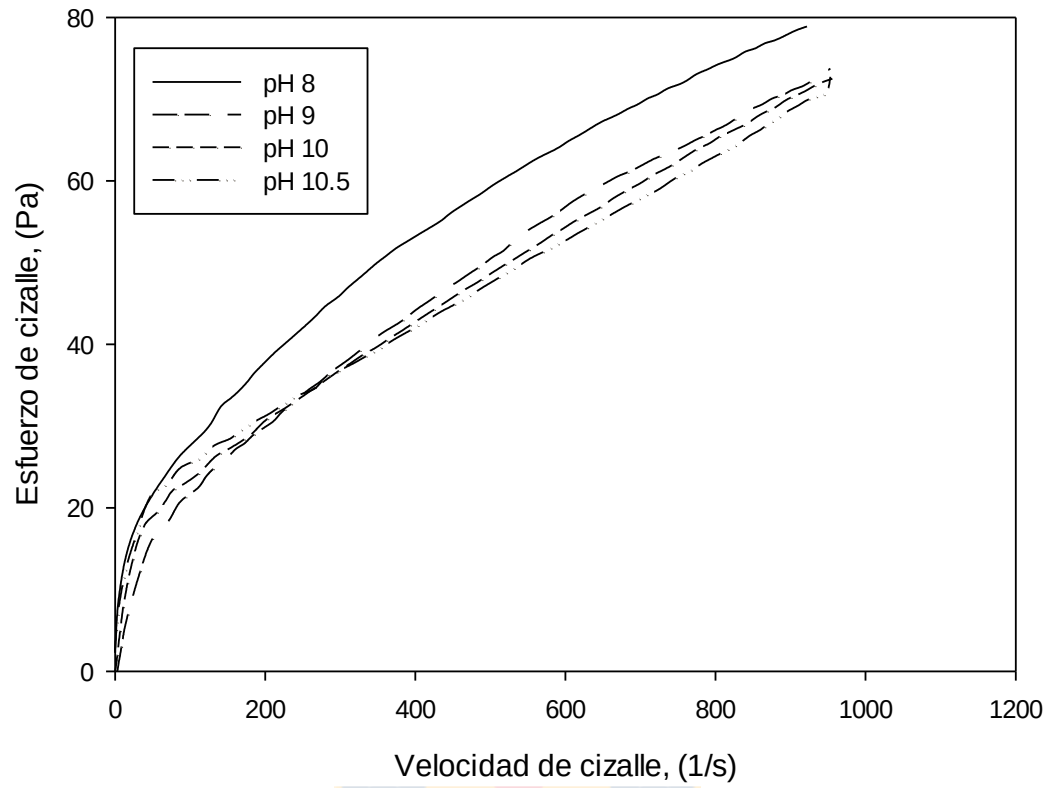


Figura A-18. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de muscovita; agua de mar; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

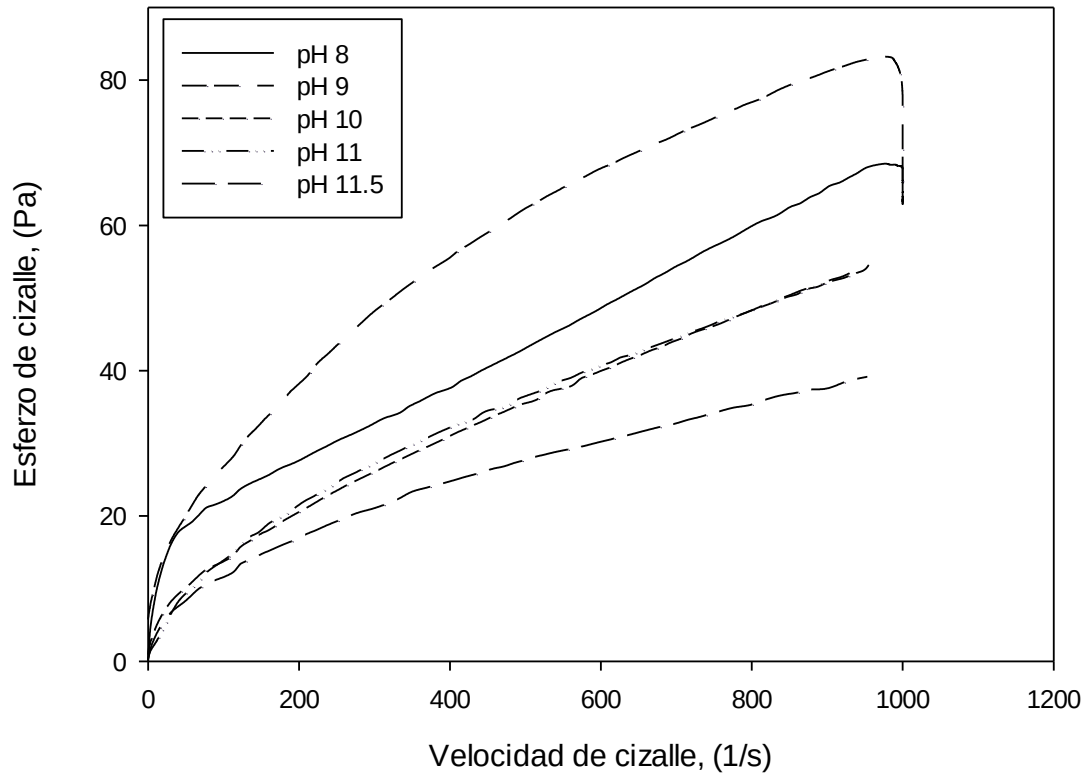


Figura A-19. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de muscovita; 400 ppm Ca^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.

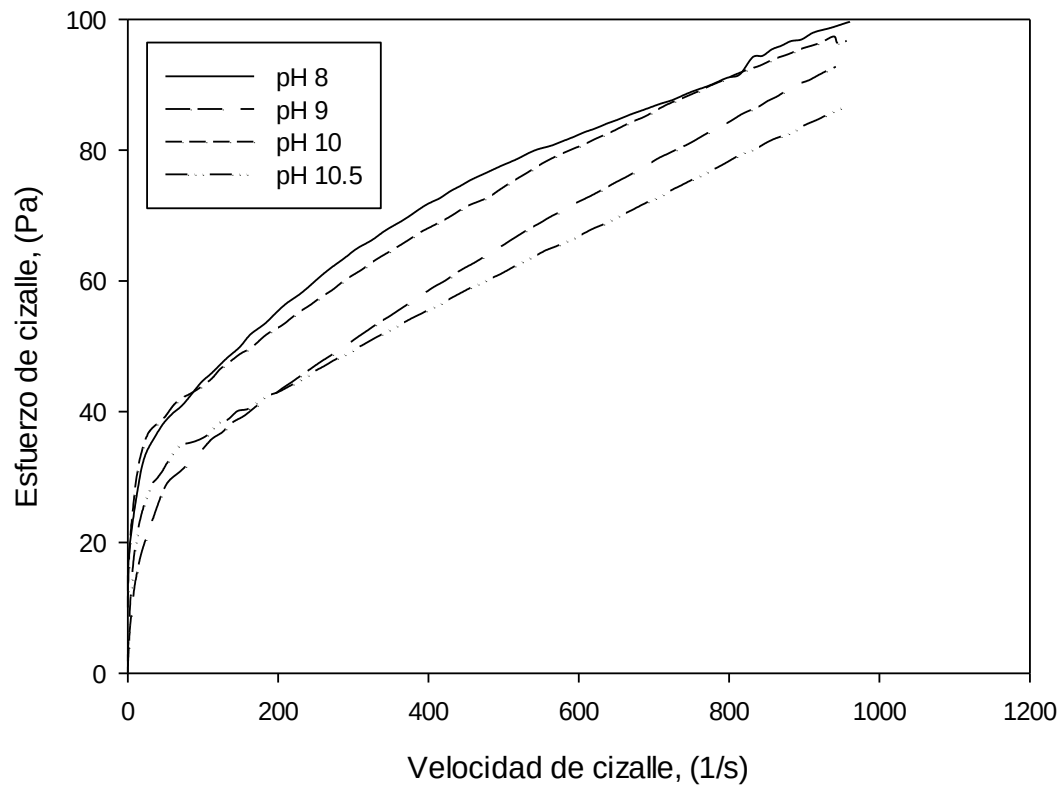


Figura A-20. Esfuerzo de cizalle en función de la velocidad de cizalle para una suspensión de 57% sólidos de muscovita; 1300 ppm Mg^{+2} ; 25 ppm PAX; 20 ppm MIBC.