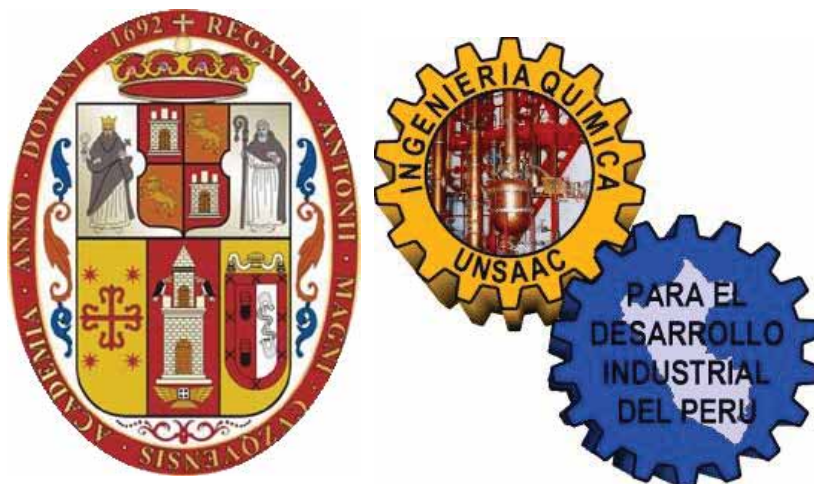


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ELECTROFLOTACIÓN DE HEMATITA MEDIANTE UN BIOSURFACTANTE
CRUDO EXTRAIDO DE LA LEVADURA *Sacharomyces cerevisae***

Tesis presentada por:

Br. **ATAUCONCHA MENDOZA CARMEN YHOHAIRA**

Br. **LIÑAN MEJIA ROCIO ROSALI**

Para optar al Título Profesional de:

Ingeniero Químico

Asesor: Ing. Corvacho Marroquín José Hilario

Co-Asesor: Mgt. Soto Puelles Jhonatan Gerardo

Cusco - Perú

2019

DEDICATORIA

A Dios, porque es mi fortaleza en cada segundo de mi vida y me muestra el camino en horas inciertas.

A mis padres Miguel Antonio Atauconcha Lazaro y Elizabeth Mendoza Quispe, a quienes amo y quienes desde antes que yo naciera han luchado por darme un futuro mejor que el de ellos.

A mis hermanos, Tommy Atauconcha, Manuel Atauconcha Mendoza y Jeramy Atauconcha Mendoza, para quienes deseo ser una hermana ejemplar.

A todos mis tíos, tías, primas, y a mi mentora Carlota Pereyra quien me ha guiado desde que era una niña; ellos siempre han estado conmigo enseñándome, apoyándome y brindándome su experiencia.

A Kenyo, quien es un amigo muy especial para mí.

Muchas gracias Dios.

Carmen Yhohaira Atauconcha Mendoza

A Dios, por permitirme llegar a este momento especial, por los triunfos realizados, por los buenos y malos momentos que me han enseñado a valorar el sentido de vivir.

A mi madre Norma Mejía, mi tía Marisol Mejía mi padre Alberto Liñan y mis hermanos Luis Alberto Liñán y Carla Liñán quienes me han apoyado y motivado en cada etapa de mi vida, para llegar a ser la persona en la que me he convertido.

A mi compañero de vida David Alex Pinto, quien me brindó su apoyo incondicional todos estos 8 años, quien de manera especial me ha ido apoyando y animando a seguir adelante y poder concluir con la presente tesis.

A mi pequeña hija, Alessia que acaba de llegar a mi vida con mucho amor y satisfacción que de hoy en adelante se convierte en mi motivación para seguir adelante.

Rocío Rosalí Liñán Mejía

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios, quién nos guio durante todo el camino de nuestra formación universitaria.

Agradecemos a nuestros padres que nos apoyaron íntegramente e incondicionalmente para culminar el presente trabajo.

Agradecemos a nuestro asesor el Ingeniero José Hilario Corvacho Marroquin y a nuestro co-asesor el Magister Jhonatan Gerardo Soto Puelles, quienes nos guiaron en el desarrollo del presente trabajo de investigación; nos dieron su tiempo y experiencia.

Agradecemos al Ingeniero Julio Lechuga Canal y al Ingeniero Antonio Bueno quienes nos brindaron el laboratorio de hidrocarburos SL01LA129 para poder desarrollar la parte experimental del presente trabajo de investigación, y de manera particular nos apoyaron en el desarrollo del mismo.

Agradecemos a todos los ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Química quienes nos formaron profesionalmente durante nuestra vida universitaria.

RESUMEN

La flotación es un proceso de concentración de minerales que utiliza surfactantes sintéticos para separar los minerales de interés de la ganga, estos surfactantes sintéticos son compuestos altamente tóxicos y no biodegradables. La bioflotación consiste en realizar el proceso de flotación utilizando surfactantes de origen biológico, llamados biosurfactantes. En la concentración de minerales la recuperación de partículas finas por procesos de flotación convencional no es posible debido al tamaño de las burbujas que producen. Partículas finas son recuperadas con microburbujas, que son generadas por procesos de electrólisis. El presente trabajo tuvo por objetivo principal evaluar la electroflotación del mineral hematita usando un biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*; el mineral hematita con el cual se trabajó contenía 74.48% de hierro. En una primera etapa, se desarrolló un protocolo de extracción con etanol del biosurfactante crudo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*. La extracción con etanol se realizó a 180°C durante 4h, condiciones a las cuales las sustancias necesarias de la célula de la levadura fueron liberadas y solubilizadas. El rendimiento promedio de la extracción del biosurfactante fue de 0.67 g/g de biosurfactante por peso de levadura seca de *Sacharomyces Cerevisiae*. La caracterización del biosurfactante mediante análisis de espectrofotometría infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) permitió identificar en el biosurfactante grupos hidroxilos (-OH) y grupos hidroxilos unidos a átomos de carbono (C-OH). En una segunda etapa, se realizaron ensayos electroflotación de hematita de tamaño menor a 75µm, a diferentes condiciones de intensidad de corriente, concentración de biosurfactante y pH. Los resultados mostraron que se alcanzó 95.80% de flotabilidad de hematita con 60ppm de concentración de biosurfactante, pH 5 e intensidad de corriente de 3 amperios. Finalmente, se concluyó que la hematita tiene afinidad por el biosurfactante, principalmente a pH ácido, y a concentraciones entre 40 ppm y 60 ppm del mismo.

Palabras Clave

Hematita, electrólisis, electroflotación, Sacharomyces cerevisiae, biosurfactante.

CONTENIDO

1	CAPÍTULO I	1
	GENERALIDADES	1
1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.3	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3.1	PROBLEMA GENERAL.....	2
1.3.2	PROBLEMAS ESPECÍFICOS	2
1.4	OBJETIVOS.....	2
1.4.1	OBJETIVO GENERAL.....	2
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
1.5	JUSTIFICACIÓN.....	3
1.6	ANTECEDENTES.....	4
2	CAPÍTULO II	8
	MARCO TEÓRICO	8
2.1	HEMATITA	8
2.2	BIOSURFACTANTES	9
2.2.1	CLASIFICACIÓN DE LOS BIOSURFACTANTES	11
2.2.2	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIOSURFACTANTES	13
2.2.3	MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE BIOSURFACTANTES	14
2.3	ELECTROFLOTACIÓN.....	15
2.3.1	ELECTROFLOTACIÓN CON BIOSURFACTANTES	17
2.3.2	VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ELECTROFLOTACIÓN 17	
2.4	DISEÑO EXPERIMENTAL	28
2.5	ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR).....	31
3	CAPÍTULO III	33
	METODOLOGÍA	33
3.1	MUESTRA.....	33
3.2	EQUIPOS, INSTRUMENTOS, MATERIALES Y REACTIVOS	33
3.3	ANÁLISIS ELEMENTAL DEL MINERAL HEMATITA	34
3.4	ACONDICIONAMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA DE HEMATITA	34
3.5	EXTRACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE.....	35
3.6	CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL BIOSURFACTANTE CRUDO	38

3.7	CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL MINERAL HEMATITA ANTES Y DESPUÉS DE LA INTERACCIÓN CON EL BIOSURFACTANTE.....	38
3.8	ENSAYOS PRELIMINARES DE ELECTROFLOTACIÓN.....	39
3.9	ENSAYOS DE ELECTROFLOTACIÓN	40
3.10	INTERACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO EN LAS PARTÍCULAS DE HEMATITA.....	47
4	CAPÍTULO IV	48
	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	48
4.1	ANÁLISIS ELEMENTAL DEL MINERAL HEMATITA	48
4.2	EXTRACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO.....	48
4.3	CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL BIOSURFACTANTE CRUDO 51	
4.4	ENSAYOS DE ELECTROFLOTACIÓN	53
4.4.1	MODELO DE PREDICCIÓN	65
4.5	INTERACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO EN LAS PARTÍCULAS DE HEMATITA.....	66
4.6	PARÁMETROS DE ELECTROFLOTACIÓN	71
	CONCLUSIONES.....	72
	RECOMENDACIONES.....	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	74
	APÉNDICE A.....	90
	APÉNDICE B.....	91
	APÉNDICE C.....	95

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. <i>Clasificación de los depósitos de minerales de hierro.</i>	8
Tabla 2. <i>Características de los principales minerales de hierro.</i>	9
Tabla 3. <i>Microorganismos productores de los diferentes tipos de biosurfactantes.</i>	11
Tabla 4. <i>Comparación entre ventajas y desventajas de los biosurfactante.</i>	13
Tabla 5. <i>Tamaños de burbuja generados en electrodos de diferentes materiales durante la electrolisis.</i>	25
Tabla 6. <i>Conceptos fundamentales en el diseño experimental.</i>	30
Tabla 7. <i>Variables y niveles máximos y mínimos para el diseño experimental.</i>	36
Tabla 8. <i>Variables y niveles para el diseño experimental.</i>	41
Tabla 9. <i>Parámetros de los procesos de electroflotación.</i>	42
Tabla 10. <i>Plan experimental.</i>	44
Tabla 11. <i>Plan experimental.</i>	45
Tabla 12. <i>Datos de la Curva de Calibración.</i>	46
Tabla 13. <i>Composición del mineral hematita.</i>	48
Tabla 14. <i>Rendimiento del proceso de extracción de biosurfactante crudo a partir de la levadura Sacharomyces Cerevisae bajo diferentes condiciones de extracción.</i>	49
Tabla 15. <i>Rendimiento del proceso de extracción de biosurfactante crudo a partir de la levadura Sacharomyces Cerevisae bajo las condiciones óptimas de extracción.</i>	49
Tabla 16. <i>Grupos funcionales identificados por el espectro FTIR del biosurfactante crudo.</i>	51
Tabla 17. <i>Porcentaje de flotabilidad de hematita bajo diferentes condiciones.</i>	53
Tabla 18. <i>Porcentaje de flotabilidad de hematita bajo diferentes condiciones.</i>	54
Tabla 19. <i>Correlación de la densidad de corriente con la Intensidad de Corriente</i>	57
Tabla 20. <i>Coeficientes de la regresión polinómica.</i>	65
Tabla 21. <i>Coeficientes de la regresión polinómica ajustada.</i>	66
Tabla 22. <i>Parámetros del Procesos.</i>	71

CONTENIDO DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Representación esquemática de un tensoactivo.	10
<i>Figura 2.</i> Esquema de la celda de electroflotación preliminar.	31
<i>Figura 3.</i> Diagrama de bloques del protocolo de extracción del biosurfactante de la levadura <i>Sacharomyces Cerevisae</i>	37
<i>Figura 4.</i> Celda de electroflotación preliminar.	39
<i>Figura 5.</i> Esquema de la celda de electroflotación.	40
<i>Figura 6.</i> Esquema de la celda de electroflotación.	40
<i>Figura 7.</i> Circuito eléctrico de la celda de electroflotación.	41
<i>Figura 8.</i> Diagrama de bloques del procedimiento de los ensayos de electroflotación.	43
<i>Figura 9.</i> Curva de calibración concentración del mineral hematita versus turbiedad.	46
<i>Figura 10.</i> Diagrama de bloques del protocolo de extracción del biosurfactante de la levadura <i>Sacharomyces Cerevisae</i>	50
<i>Figura 11.</i> Espectro FTIR del biosurfactante crudo.	52
<i>Figura 12.</i> Flotabilidad de Hematita a pH 7.	55
<i>Figura 13.</i> Flotabilidad de Hematita a pH 5.	55
<i>Figura 14.</i> Flotabilidad de Hematita a pH 3.	56
<i>Figura 15.</i> Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.	57
<i>Figura 16.</i> Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.	58
<i>Figura 17.</i> Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.	58
<i>Figura 18.</i> Flotabilidad de hematita a pH 7.	59
<i>Figura 19.</i> Flotabilidad de hematita a pH 5.	60
<i>Figura 20.</i> Flotabilidad de hematita a pH 3.	60
<i>Figura 21.</i> Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 20ppm.	62
<i>Figura 22.</i> Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 40ppm.	62
<i>Figura 23.</i> Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 60ppm.	63
<i>Figura 24.</i> Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 80ppm.	63
<i>Figura 25.</i> Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 100ppm.	64
<i>Figura 26.</i> Espectro FTIR de la hematita.	67
<i>Figura 27.</i> Espectro FTIR de la hematita después de interactuar con el biosurfactante.	68
<i>Figura 28.</i> Superposición de los espectros FTIR del biosurfactante crudo, de la hematita y de la hematita después de la interacción con el biosurfactante.	70

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El proceso de flotación de minerales consiste en la separación selectiva del mineral de interés de la ganga. Esta técnica involucra la adhesión del mineral valioso a burbujas de aire, las cuales son estabilizadas mediante reactivos espumantes. En adición, generalmente el mineral a flotar es hidrofílico, por lo tanto es necesario utilizar sustancias llamadas surfactantes las cuales confieren propiedades hidrofóbicas a las partículas (Kyzas & Matis, 2016).

Los surfactantes son sustancias tensoactivas, caracterizadas por tener una parte polar y una parte apolar. Tales sustancias son de origen petroquímico y causan un impacto ambiental significativo debido a su toxicidad. El uso de la biotecnología como alternativa potencial de bajo costo y ambientalmente amigable en el procesamiento de minerales es una alternativa viable frente al agotamiento de recursos y la problemática ambiental (Dwyer et al., 2013). La bioflotación se define como la recuperación selectiva de minerales mediante el uso de bio surfactantes, los cuales son sustancias surfactantes biodegradables e inocuas derivadas de microorganismos (Dwyer et al., 2013).

La liberación del mineral de interés de la ganga involucra el chancado y molienda del mineral con el fin de llegar a un tamaño de partícula adecuado. Se observa la tendencia de mayor calidad de mineral a menor tamaño de partícula. Sin embargo, existe un límite en el proceso debido a que la formación de partículas finas perjudica el proceso de flotación convencional por el incremento en el área de contacto del mineral que es significativamente mayor que el área de contacto de las burbujas (Dwyer et al., 2012). En adición, el gasto de surfactantes se incrementa de manera excesiva mermando la economía del proceso.

La electroflotación es particularmente aplicable en la recuperación de partículas finas y ultra finas debido a la posibilidad de controlar el tamaño de burbuja mediante la densidad de corriente y material del electrodo. La generación de microburbujas incrementa la eficiencia de colisión burbuja-mineral permitiendo una recuperación selectiva del mineral valioso (Rubio & Hoberg, 1993). El presente trabajo estudia la electroflotación de minerales finos de hematita utilizando un biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces Cerevisiae*.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de flotación de minerales es raramente aplicado a partículas finas debido a la falta de control en el tamaño de las burbujas. Partículas finas, típicamente muestran bajas tasas de recuperación, debido a la disminución en la eficiencia de colisión partícula-burbuja y la excesiva área superficial a menor tamaño de partícula (Gonzales et al., 2013). En adición, en la industria minera, en los procesos de flotación se hace uso de surfactantes sintéticos, los cuales causan efectos adversos en el ambiente, debido a su alta toxicidad y degradación lenta (Wills & Napier-Num, 2006).

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.3.1 PROBLEMA GENERAL

¿Es posible separar (flotar) partículas finas del mineral hematita con un proceso de electroflotación usando como biosurfactante sustancias tensoactivas extraídas de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*?

1.3.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- ¿Cuál es la composición elemental del mineral hematita?
- ¿Cómo extraer el biosurfactante crudo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*?
- ¿Cuáles son los grupos funcionales del biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*?
- ¿Qué efecto tiene el pH, intensidad de corriente y concentración de biosurfactante crudo en la electroflotación del mineral hematita?
- ¿Existe interacción entre la hematita y el biosurfactante crudo?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el proceso de electroflotación del mineral hematita mediante un biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el análisis elemental del mineral hematita.
- Plantear un protocolo de extracción para la obtención del biosurfactante crudo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*.

- Caracterizar los grupos funcionales el biosurfactante crudo.
- Estudiar el efecto del pH, intensidad de corriente y concentración de biosurfactante crudo en la electroflotación del mineral hematita.
- Mediante análisis elemental evaluar la interacción del biosurfactante crudo en las partículas del mineral hematita.

1.5 JUSTIFICACIÓN

- En la industria minera los procesos de flotación convencional producen burbujas de gran tamaño que no permiten la recuperación eficiente de mineral fino, por otro lado la tecnología de electroflotación tiene la característica de producir microburbujas, las cuales ofrecen mayor área de contacto lo que hace posible una mejor recuperación de mineral fino, (Wills & Napier-Num, 2006). Con la creciente demanda de minerales y el agotamiento de los depósitos minerales de alta ley, la investigación mineral se centra cada vez más en el beneficio de minerales de baja ley para producir material adecuado para un mercado global (Dwyer et al., 2012).
- Los biosurfactantes son de origen microbiano, generalmente procedentes de bacterias, hongos y levaduras son (Zaragoza, 2012) y son de vital importancia para muchas industrias debido a su diversidad química, características multifuncionales, biodegradabilidad y baja toxicidad, por lo tanto no dañan el medio ambiente cuando se hace uso de estos (Maier 2003).
- La normativa actual sobre el medio ambiente promueve el uso de tecnologías que no deterioren el medio ambiente y la salud del ser humano. Una de estas tecnologías en lo que respecta a la flotación de minerales es el uso de biosurfactantes, que son más amigables y responsables con el medio ambiente en lugar de los surfactantes sintéticos, que a pesar de sus múltiples ventajas y aplicaciones, su principal desventaja sigue siendo su toxicidad frente al ambiente y al ser humano. (Makkar & Cameotra, 2002)
- Este estudio podrá contribuir en generar conocimiento en el campo de la bioflotación. Junto con la utilización de biosurfactantes en la flotación de minerales, surgirá una nueva perspectiva de los mecanismos por los cuales se pueden extraer biosurfactantes a partir de microorganismos, el uso de biosurfactantes, que son más estables y químicamente más activos que los sintéticos, proporcionará nuevos conocimientos en el tratamiento de minerales de baja ley (Mulligan et al., 2014).

1.6 ANTECEDENTES

Valdiviezo, G ; Huamán, G, & Torem, M. (2013). *ELECTROFLOTACIÓN DE FINOS DE CASITERITA USANDO UNA CEPA BACTERIANA HIDROFÓBICA.*

En este trabajo, la electroflotación de finos de casiterita se llevó a cabo usando *Rhodococcus opacus* (*R. opacus*) como biosurfactante. La interacción entre *R. opacus* y la superficie del mineral fue evaluada a través del potencial zeta. Después de la interacción de la casiterita con *R. opacus*, las partículas resultantes exhibieron un comportamiento hidrofóbico. El ensayo de electroflotación óptimo obtuvo una recuperación de 64.5% a un pH de 5, concentración de *R. opacus* 2.87×10^{12} células/mL y densidad de corriente de 51.4 mA/cm².

Lopez, L; Merma, G; Torem, M, & Pino, G. (2015). *ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LA FLOTACIÓN DE HEMATITA UTILIZANDO COMO BIOREAGENTE LA CEPA BACTERIANA RHODOCOCCUS RUBER.*

Lopez et al. (2015), Realizó la flotación de hematita usando la cepa bacteriana *Rhodococcus ruber* como biosurfactante en una celda de flotación Partridge-Smith modificada y mezcló 0.25 g de hematita con 0.25 L de solución de concentración bacteriana conocida, agua destilada y con pH ajustado con HCl y NaOH diluidos; trabajando con una concentración de hematita en la celda de flotación de 1 g/L.

El objetivo de este trabajo fue estudiar y evaluar la cepa bacteriana *Rhodococcus ruber* como biosurfactante. Los resultados mostraron un cambio en el potencial zeta de la hematita después de la interacción con *R. ruber*, y su adhesión a la superficie del mineral fue bastante alta a un pH de 3 y a una concentración de *R. ruber* de 10⁹ células/mL. Bajo las condiciones mencionadas y con un tamaño de partícula promedio de 53 µm para la hematita, se alcanzó una flotabilidad alta de 84%.

Shahverdi, O; Noaparast, M; Eslami, A; Manafi, Z; Kolahdoozan, M; Yazdi, S; Tabatabaei, T.; Shahverdi, R; & Oliazadeh, M. (2004). *BIOFLOTACIÓN DE SULFURO DE COBRE DE UN MINERAL DE BAJO GRADO DE SARCHESHMEH.*

Esta investigación estudió la aplicación de bacterias gram negativas de la especie *Thiobacillus ferrooxidans* en la flotación de sulfuro de cobre de una mena de baja ley de Sarcheshmeh. Se utilizaron una muestra de sulfuro de cobre de baja ley y una cepa bacteria de *Thiobacillus ferrooxidans*. Se demostró que la flotación selectiva de sulfuro de cobre fue eficiente usando *Thiobacillus ferrooxidans*, logrando recuperaciones de

Cu entre 62% y 65% en comparación al proceso regular que tenía recuperaciones de Cu entre 40% y 42%.

Hassan, M; Khoshdast, H; & Ranjbar, M. (2010). *FLOTACIÓN DE CARBÓN UTILIZANDO UN BIOSURFACTANTE DE PSEUDOMONAS AERUGINOSA COMO VAPORIZADOR.*

Este trabajo evaluó la flotación de carbón utilizando el biosurfactante producido por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa*. Se demostró que la flotación selectiva con carbón fue eficiente usando *Pseudomonas aeruginosa* como un nuevo vaporizador que dio resultados óptimos a una concentración de 100 ppm. La recuperación de materia combustible fue de 72-79%.

Rojas, R. (2016). *ELECTROFLOTACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS DE HEMATITA EN CELULA MODIFICADA DE PARTRIDGE SMITH USANDO RHODOCOCCUS OPACUS COMO BIORREACENTE.* Pontificia Universidad Católica De Rio De Janeiro, Brasil.

En este trabajo se evaluó el uso de la bacteria *Rhodococcus opacus* mediante electroflotación de partículas finas y ultrafinas de hematita utilizando microburbujas de hidrógeno y oxígeno. La flotabilidad máxima de hematita obtenida con el *R. opacus* para las burbujas de hidrógeno fue de 80% y la flotabilidad obtenida con burbujas de oxígeno fue de 65%.

Hacha, R. R., Leonardo Torem, M., Merma, A. G., & da Silva Coelho, V. F. (2016). *ELECTROFLOTACION DE PARTICULAS FINAS DE HEMATITA CON RHODOCOCCUS OPACUS COMO BIOCOLECTOR EN UN CELDA MODIFICADA PARTRIDGE-SMITH.*

Hacha et al., (2016), realizó la electroflotación de hematita usando *Rhodococcus opacus* como bioreagente, en una celda modificada de Partridge-Smith de 0.380 litros. Hacha et al., (2016) realizó la flotación de hematita con *Rhodococcus Opacus* como colector, en una celda modificada de Partridge-Smith bajo las siguientes condiciones: pH de 3, 5, 7, 9 y 11; concentración del electrolito entre 0.05-0.1M; tiempo de flotación de 5-10min; tiempo de acondicionamiento de la hematita con el bioreagente de 5-10 min; y densidad de corriente entre 5.28, 6.69 y 8.31 mA/cm². Hacha et al., (2016) concluyó que con un tiempo de acondicionamiento de 10 min entre la hematita y el bioreagente, tiempo de flotación de 10min, pH 6, con concentración de biosurfactante de 300 mg/L, y densidad de corriente de 22.18 mA/cm² se obtiene la

flotabilidad máxima de hematita de 80% con burbujas de hidrógeno y de 70% con burbujas de oxígeno.

Soto, J. (2016). *FLOTACIÓN DE HEMATITA USANDO UN BIOSURFACTANTE CRUDO EXTRAÍDO DE *Rhodococcus opacus**.

Soto (2016) realizó la bioflotación de hematita usando como biosurfactante *R. opacus*, los ensayos de flotación se llevaron a cabo en un tubo de hallimond, las condiciones de trabajo fueron: concentración de biosurfactante 0, 20, 50, 60, 80, 100 y 150ppm; rango de pH de 3, 5, 7, 9 y 11; tiempo de acondicionamiento entre mineral y biosurfactante de 5min; y tiempo de flotación de 5min. La máxima flotabilidad de hematita fue de 95% a pH 3 y 125ppm de biosurfactante.

Raju, G. B., & Khangaonkar, P. R. (1982). *ELECTROFLOTACIÓN DE FINOS DE CALCOPIRITA*.

Raju y Khangaonkar (1984) estudiaron la electroflotación de partículas finas de calcopirita (tamaño promedio de la calcopirita 4.42 μm) con dietil-ditio-carbonato de sodio en un tubo de hallimond modificado. Ellos consiguieron una flotabilidad máxima de 81% para las burbujas de oxígeno e hidrógeno para un pH inicial de 9. El pH del sistema se mantuvo constante durante la flotación, sin embargo, al usar burbujas de hidrógeno el pH disminuía y al usar burbujas de oxígeno el pH aumentaba. Además, los autores observaron que la carga superficial de las burbujas de hidrógeno y oxígeno no influenciaron la adsorción de dietil-ditio-carbonato en la superficie de la calcopirita. En consecuencia, la flotabilidad de la calcopirita no es influenciada por el tipo de burbuja utilizada.

Quast, K. B. (2000). *UNA REVISION DE LA FLOTACIÓN DE HEMATITA USANDO COMO COLECTOR ÁCIDO LÁURICO*

Quast (2000), utilizó la hematita (98.5% de pureza) para realizar estudios de flotación con ácido láurico. Los ensayos de flotación se llevaron a cabo en una celda de flotación de 1 litro y se agregó agua destilada hasta llevar el nivel de la pulpa a 20 mm por debajo del vertedero de desbordamiento.

Didyk, A. M., & Sadowski, Z. (2012). *FLOTACIÓN DE SERPENTINITA Y CUARZO USANDO BIOSURFACTANTES*.

Didyk & Sadowski (2012), realizó la flotación de serpentinita usando biosurfactantes producidos por *Bacillus circulans* y *Streptomyces sp*. Los ensayos de electroflotación se llevaron a cabo en un tubo hallimond de vidrio de un volumen total de 500cm³, flujo

de nitrógeno 50cm³/min y tiempo de flotación de 20 min, y concentración del mineral de 2 g/L en la celda de flotación.

Mesquita, L. M. S., Lins, F. F., & Torem, M. L. (2003). *INTERACCIÓN DE UNA CEPA BACTERIANA HIDROFÓBICA EN EL SISTEMA DE FLOTACIÓN HEMATITA -CUARZO*

Mesquita et al., (2003) estudió la interacción de la flotación de hematita y cuarzo con una cepa bacteriana hidrofóbica (*R. opacus*), bajo las siguientes condiciones de trabajo: pH de 2, 4, 6, 8, 10, 12, y 14; concentración celular de 150, 300, 450, 600ppm, tiempo de acondicionamiento de la bacteria con el mineral de 5min y tiempo de flotación de 5min. La máxima flotabilidad de hematita se alcanzó a pH 4, obteniendo porcentajes de recuperación de 90% y de 72% en valores de pH entre 6-12.

Yang, H., Tang, Q., Wang, C., & Zhang, J. (2013). *RESPUESTA DE LA FLOCULACIÓN Y FLOTACIÓN DEL MINERAL HEMATITA A *Rhodococcus erythropolis**

Yang et al., (2013) realizó la flotación y floculación de hematita usando *Rhodococcus erythropolis*, los ensayos se realizaron en una celda de 2.5 litros, para cada ensayo se acondicionó 2 g de mineral en la celda de flotación con agua destilada y pH ajustado usando HCl, las condiciones de trabajo fueron: tiempo de acondicionamiento de 2min; tiempo de flotación de 5 min; rango de pH de 3 a 6; y concentración de *Rhodococcus erythropolis* entre 0-90 mg/L. La máxima flotabilidad de hematita fue de 89.67%, se alcanzó a pH 6 y concentración de *R. erythropolis* de 75mg/L.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 HEMATITA

El hierro constituye cerca del 1.51% en peso de la corteza terrestre. Es uno de los siete metales conocidos desde la antigüedad (Katz, 2011). Casi todas las rocas contienen hierro en mayor o menor proporción, especialmente aquellas que son ricas en anfíboles, piroxenos, olivino y micas; las especies minerales que contienen hierro son muy numerosas y se presentan en forma de óxidos, sulfuros, silicatos, carbonatos, sulfatos, etc. (Bellido, 1974).

Los diferentes tipos de depósitos de hierro se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. *Clasificación de los depósitos de minerales de hierro.*

I - Depósitos Sedimentarios y Meta sedimentarios
A) Minerales de formaciones ferrícolas precámbricas con chert Taconitos Magnéticos Jaspelitos Itabiritos Sideríticos
B) Minerales de Ironstones
C) Minerales de hierro clásticos
II - Minerales Magmáticos
A) Minerales de tipo Kiruna B) Depósitos de titanita magnética
III - Minerales de Metasomatismo de contacto
IV - Minerales macizos en formaciones ferríferas con chert
V - Depósitos Residuales
A) Depósitos de tipo Lago Superior B) Minerales de tipo OXIBIF C) Gangas y minerales de terrazos fluviales D) Minerales marrones E) Minerales lateríticos

Nota. Recuperado de Marsden, 1982.

La Tabla 2 presenta los principales minerales de hierro y alguna de sus características (Seely & Gordon, 1998).

Tabla 2. Características de los principales minerales de hierro.

Mineral	Sistema cristalino	Fórmula Química	Densidad (g/cm ³)	Fe (%)
Magnetita	Cúbico hexoctahedral	Fe ₃ O ₄	55.1 - 5.2	77.236
Hematita	Trigonal-hexagonal	Fe ₂ O ₃	55.3	66.994
	Scalenoledral	γ - Fe ₂ O ₃		
Maghemita	Cúbico - tetartoidal	Fe ₂ O ₃ ·0,5(H ₂ O)	44.9	66.994
Ferrhidrita	Hexagonal	α - FeO(OH)	33.8	66.621
	Escalenoledral	λ - FeO(OH)		
Goethita	Otorrombico	γ - FeO(OH)	33.3 - 4.3	66.285
	Dipiramidal	FeS		
Ferroxihita	Hexagonal	Fe(O,OH,Cl)	44.2	66.285
Lepidocrocita	Ortorrómico-dipiramidal	Fe ₂ O ₃ ·H ₂ O	44	66.285
Pirrotita	Monoclínico prismático	FeCO ₃	44.6 - 4.7	66.233
Akganeíta	Monoclínico prismático	FeS ₂	33	55.575
Limonita	Ortorrómico dipiramidal	FeS ₂	33.6 - 4	66.0
Siderita	Hexagonal escalenoledral	Fe ₃ O ₄	33 - 3.9	44.82
Pirita	Cúbico diploidal	Fe ₂ O ₃	55 - 5.2	44.655
Marcasita	Ortorrómico dipiramidal	γ - Fe ₂ O ₃	44.9	44.655

Nota. Recuperado de: Webmineral. Acceso en: 18/01/2019.

A pesar de la amplia distribución de los minerales de hierro, apenas unas cuantas clases de minerales son consideradas económicamente explotables. Uno de esos minerales es la hematita, debido a su presencia en varios tipos de rocas. La hematita se produce como mineral primario asociado a depósitos de vetas, rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias (Dana & Hulburt, 1976; Derr et al., 1992).

En Perú, la hematita es uno de los principales minerales de hierro. La regiones que contienen hierro son: el paraje pampa de Jollucos, provincia de Contuzamá, Cajamarca; valles Santa y Huarmey en la cordillera negra, Ancash; Marcona, Nazca; Acarí, Arequipa; Tarpuy y Mirador, Arequipa; valles Tambo y Moquegua; cerro Morritos, Tacna; Livitaca, Cusco y Andahuaylas, Apurímac (Bellido, 1974).

2.2 BIOSURFACTANTES

Los tensoactivos son conocidos también como surfactantes, son compuestos anfífilicos, es decir, que presentan en la misma molécula una porción hidrófoba (o apolar), la cual se encuentra unida covalentemente a una región hidrófila (o polar), que tiene afinidad por disolventes polares (Figura 1). La región apolar tiene afinidad por disolventes orgánicos o apolares y corresponde frecuentemente a una cadena hidrocarbonada, de tipo alquilo o alquil-

benceno, de longitud variable (Zaragoza, 2012). Estos surfactantes son compuestos tóxicos en mayor o menor medida (Makkar & Cameotra, 2002).

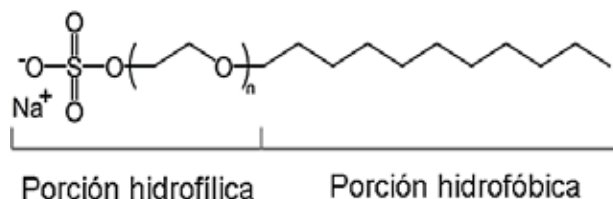


Figura 1. Representación esquemática de un tensoactivo.

Nota. Se muestra la cabeza polar y la cola hidrofóbica de un tensoactivo. Adaptado de: Zaragoza, 2012.

Todos los tensoactivos tienen la propiedad de disminuir la tensión superficial cuando se añaden al agua en pequeñas cantidades (Chevalier & Zemb, 1990), también actúan como dispersantes (Hoar & Shulman, 1943), espumantes, emulsionantes, (Hoar & Shulman, 1943).

Los tensoactivos se clasifican en dos tipos: tensoactivos artificiales (surfactantes) y tensoactivos naturales (biosurfactantes).

Los biosurfactantes (BSs) son compuestos biodegradables producidos por microorganismos, estos compuestos tienen propiedades emulsificantes y dispersantes (Supaphol et al., 2011). Pueden ser secretados extracelularmente o estar unidos a la membrana celular (Desai & Banat 1997).

Los biosurfactantes presentan una región hidrofílica formada por aminoácidos, péptidos (aniones o cationes), mono o polisacáridos y una región hidrofóbica, que consiste de ácidos grasos saturados e insaturados (Desai & Banat, 1997). Esta característica les permite actuar como sustancias tensoactivas. Los tensoactivos biológicos llamados también biosurfactantes son moléculas anfífilas de origen microbiano, generalmente procedentes de bacterias, hongos y levaduras. Estas sustancias son sintetizadas principalmente en fase exponencial y los microorganismos que las producen se dividen en tres categorías según el sustrato que utilicen: los que usan alcanos exclusivamente como fuente de carbono, tales como *Corynebacterium sp.* o *Arthrobacter sp.*; los que sólo usan sustratos solubles en agua como fuente de carbono, como es el caso de *Bacillus sp.*; y los que usan tanto alcanos como sustratos solubles en agua como fuente de carbono como *Pseudomonas sp.* Debido a interesantes propiedades como su diversidad estructural, baja toxicidad y biodegradabilidad, los biosurfactantes se están convirtiendo en una excelente alternativa para reemplazar tensoactivos de origen sintético (Zaragoza, 2012).

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS BIOSURFACTANTES

En la tabla 3, se muestran los tipos de biosurfactante, su respectiva sub clasificación y los microorganismos productores. El biosurfactante de interés para el presente trabajo de investigación es la manoproteína. La manoproteína corresponde al grupo de las lipoproteínas.

Tabla 3. *Microorganismos productores de los diferentes tipos de biosurfactantes.*

Tipo de Biosurfactante	Sub Clasificación	Microorganismo productor
Glicolípidos	Ramnolipidos	<i>P.aeruginosa</i>
		<i>Pseudomonas sp.</i> <i>R.erithropolis, Nerithropolis</i>
	Trehalolipidos	<i>Mycobacterium sp.</i> <i>T. bombicola</i>
	Soforolipidos	<i>T. epicola</i> <i>T. petrophilum</i>
Lipopéptidos y lipoproteínas	Celobiolipidos	<i>U. zae, U. maydis</i>
	Liquenicina	<i>B. licheniformis</i>
	Serrawerina	<i>S. marcescens</i>
	Viscosina	<i>P. fluorescens</i>
	Surfactina	<i>B. subtilis</i>
	Subtilosina	<i>B. subtilis</i>
	Gramicidina	<i>B. brevis</i>
	Polimixinas	<i>B. polymyxa</i>
Ácidos grasos, fosfolípidos	Manoproteínas	<i>S. cerevisae</i>
	Acidos grasos	<i>C. lepus</i>
	Lípidos neutros	<i>N. erythropolis</i>
	Fosfolipidos	<i>T. thiooxidans</i>
Surfactantes poliméricos	Emulsan	<i>A. calcoaceticus</i>
	Manan-lípidos-proteína	<i>C. tropicalis</i>
	Liposan	<i>C. lipolytica</i> <i>P. fluorescens</i>
	Carbohidrato-proteína-lípido	<i>D.polymorphis</i>
Partículas biosurfactantes	Proteínas PA	<i>P. aeruginosa</i>
	Vesículas y fimbriaes	<i>A.calcoaceticus</i>

Nota. Recuperado de: Desai & Banat, 1997.

La levadura *S. cerevisae* es un hongo unicelular que prosperan típicamente en hábitats con azúcares, tales como frutos, flores y corteza de los árboles; y también pueden vivir en simbiosis con animales (Madigan et al., 2004). Las levaduras tienen los siguientes componentes principales para la extracción del biosurfactante:

Pared Celular

La pared celular de la levadura presenta una estructura compleja cuya composición depende de las condiciones del medio en el que creció y las condiciones de operación del proceso de fermentación (Volesky, 2003); (Pradelles et al., 2008).

Capa exterior

La capa exterior de la pared celular es amorfa y posee principalmente manoproteínas (30-40% de la masa de la pared) que están ligadas a los finales de las moléculas 1,3-β glucanos y 1,6-β glucanos, éstas son las moléculas de la pared celular más expuestas y pueden formar sitios de adsorción (Volesky, 2003); (Pradelles et al., 2008). Pertenecientes al grupo de las glucoproteínas, las manoproteínas son proteínas unidas a moléculas de azúcar, concretamente a restos de manosa. La manoproteínas son los componentes mayoritarios (25-50%) de la pared celular de levaduras *Saccharomyces cerevisiae*. Su función consiste en proporcionar estructura y rigidez a la célula, estando formadas por proteoglicanos que contienen un 5-20% de porción peptídica y un 80-95% de cadenas del azúcar manosa.

La levadura *Sacharomyces cerevisiae* es ampliamente utilizada en la industria alimentaria y se genera una gran cantidad de residuos de esta levadura, siendo una biomasa viable para el proceso de biosorción (Jianlong, 2002).

La manoproteína, el cual es el componente más abundante de la pared celular de la *Sacharomyces cerevisiae*, es un bioemulsionante. La extracción del biosurfactante de la levadura *Sacharomyces cerevisiae* es un proceso nuevo, simple y con rendimientos altos (Cameron et al., 1998).

Por otro lado, la levadura *Sacharomyces cerevisiae* es fácil de cultivar a gran escala. La levadura puede crecer fácilmente utilizando sofisticadas técnicas de fermentación y en medios de crecimiento económico. El rendimiento de la biomasa es alto (Sheng et al., 2007). También, la biomasa de *Sacharomyces cerevisiae*, se puede obtener fácilmente como sub producto de la industria de la fermentación de distintos alimentos y bebidas. En comparación con otros tipos de residuos, el suministro de *Sacharomyces cerevisiae* es básicamente estable (Sheng et al., 2007). Así mismo, los biosurfactantes y biosorbentes a partir de *Sacharomyces cerevisiae* pueden ser fácilmente aceptados por el público cuando se aplican de manera práctica (Sheng et al., 2007). Finalmente, la levadura *Sacharomyces cerevisiae*, es un

organismo modelo para identificar el mecanismo de biosorción en la eliminación de iones metálicos, especialmente para investigar las interacciones de los metales a nivel molecular (Sheng et al., 2007).

Dikit *et al.*, (2010) obtuvo un rendimiento de 0.32 g/g (peso seco de levadura *Sacharomyces Cerevisae* obtenida del vino de palma de una cervecería local en la provincia de Songkhla) de biosurfactante.

El uso de diferentes fuentes de carbón cambia la estructura del biosurfactante que se va a producir y su rendimiento (Amaral et al., 2010).

Así mismo, la literatura sugiere que la mayoría de los biosurfactantes son aniónicos (Christova et al., 2014); por otro lado.

2.2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS BIOSURFACTANTES

Existen diferentes ventajas y desventajas de los biosurfactantes, las cuales se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Comparación entre ventajas y desventajas de los biosurfactante.

VENTAJAS	DESCRIPCIÓN	DESVENTAJAS
Biodegradabilidad	Pueden ser fácilmente degradables por los microorganismos (Mohan et al., 2006).	Producción costosa en la producción de biosurfactantes puros.
Baja toxicidad	Los biosurfactantes son menos tóxico que los surfactantes sintéticos o químicos (Desai & Banat, 1997).	Dificultad en la obtención de biosurfactantes puros.
Disponibilidad de residuos orgánicos para su producción	Los biosurfactantes pueden ser producidos a partir de materiales de desecho que existen en abundancia y por lo tanto, son económicos. La fuente de carbono se obtiene de los hidrocarburos, carbohidratos y/o lípidos, los cuales pueden ser utilizados separadamente o en combinación entre ellos (Kosaric, 2001).	
Factores ambientales	Muchos biosurfactantes no son afectados por factores ambientales tales como temperatura, pH o salinidad (Muthusamy et al., 2008).	
Actividad superficie e interfase	Reducen la tensión superficial del agua y la tensión interfacial de muchos compuestos como agua/hexadecano (Mulligan, 2005).	

Nota. Recuperado de: Nuvia et al., 2014.

2.2.3 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE BIOSURFACTANTES

Existen varios métodos convencionales para la extracción de biosurfactantes como precipitación con ácido, extracción con solvente orgánico, fraccionamiento de espuma, ultrafiltración con membrana, adsorción con resinas de poliestirenos, adsorción con carbón activado, cromatografía de intercambio de iones, cristalización, precipitación con sulfato de amonio, y extracción con metil terciario-butil éter. Además de los métodos tradicionales de extracción, existen métodos no convencionales que toman ventaja de las propiedades de los biosurfactantes, propiedades como su actividad superficial y su habilidad para formar micelas. Los métodos no convencionales son particularmente aplicados en procesos de extracción de biosurfactantes a gran escala y tienen la ventaja de operar en modo continuo obteniendo niveles altos de pureza para los biosurfactantes.

El método más utilizado a nivel de laboratorio para la extracción de biosurfactante es el método de extracción con solvente orgánico. Este método está basado en la extracción en fase sólido – líquido. La extracción sólido – líquido como Operación Unitaria consiste en disolver un componente grupo de componentes que forman parte de un sólido con un solvente adecuado en el que es insoluble el resto del sólido, conocido como inerte (Welty, Wicks y Wilson, 1991).

Para dicha operación es necesario:

- El contacto del disolvente con el sólido a tratar para disolver el componente soluble o soluto.
- La separación de la solución del resto del sólido que contiene el resto del soluto y un poco de la solución que se halla en la superficie de la partícula.

Los factores que afectan la velocidad de extracción son: Tamaño de partícula, temperatura y el tipo de solvente (Ullauri, 2010). También, existen tres fenómenos consecutivos en la extracción sólido- líquido hasta llegar al equilibrio (Ocón y Tojo, 1970). Estos son:

- Cambio de fase del soluto por inmediato contacto sólido – solvente.
- Difusión del soluto en el solvente contenido dentro de los poros del sólido por difusión cinética o molecular si convección.
- Paso de soluto de la superficie del sólido a la masa de la solución, por la difusión y convección de la masa líquida.

2.3 ELECTROFLOTACIÓN

La separación o concentración de minerales exige que haya una diferencia física y/o físico-química entre el mineral de interés y los minerales de la ganga (Fuerstenau et al., 2007). Para la concentración de minerales con diferente composición de hierro, en general, se utilizan los métodos de separación gravimétrica, separación magnética, separación electrostática y flotación (Araujo et al., 2003).

El proceso de flotación se basa en inducir diferencias en el comportamiento de humectación (mojabilidad) en partículas de ciertos minerales que se desean separar de los minerales de ganga, por medio de la adición de agentes químicos con funciones específicas (Hacha et al., 2016). Este proceso se realiza en un equipo que airea una pulpa previamente acondicionada, se separan los minerales hidrofóbicos, recogidos en la espuma, y los minerales hidrofílicos se hunden (Finch & Smith, 1979). La flotación es un proceso de separación que explora las diferencias en las propiedades de superficie entre varias especies minerales presentes en el yacimiento minero (Araujo & Peres, 1995). En este proceso, partículas hidrofóbicas chocan y se adhieren a las burbujas y son removidas del medio acuoso, mientras, las partículas hidrofílicas permanecen suspendidas en el sistema, ya que chocan con las burbujas pero no se adhieren a estas (Laskowski, 1986). El sistema de flotación contempla la presencia de tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida es representada por el material a separar, la fase líquida es el agua y finalmente la fase gaseosa está representada generalmente por aire y en otros casos gases como oxígeno e hidrógeno (Hacha et al., 2016). Existen diferentes técnicas de flotación, entre ellas se encuentran: la electroflotación, la flotación por aire disuelto, ultraflotación y la bioflotación.

La electroflotación es un proceso de flotación que está basado en la electrólisis del agua. El proceso de electroflotación se basa en la generación de burbujas de oxígeno e hidrógeno a través de la electrólisis del agua. Este proceso electroquímico ocurre cuando se aplica una diferencia de potencial eléctrico a dos o más electrodos sumergidos en una solución con presencia de electrolitos conductores, esta diferencia de potencial aplicado desencadena reacciones electroquímicas de óxido-reducción en la superficie de los electrodos. La corriente eléctrica es fuente de energía en el sistema, hace que los electrones se desplacen del ánodo en dirección al cátodo. En el ánodo ocurre la remisión de electrones dando lugar a la oxidación de las especies disueltas en el electrolito; en contraste, el cátodo recibe el flujo de electrones dando lugar a reacciones de reducción (Bagotsky, 2006).

En la electroflotación del agua, el oxígeno se forma en el ánodo (Ecuación 2.1), mientras que el hidrógeno se genera en el cátodo (Ecuación 2.2). Estos gases pueden ser usados por separado o en conjunto en los procesos de electroflotación. La reacción global de la electrólisis del agua está representada por la Ecuación 2.3 (Neagu et al., 2000).



En estas reacciones se da, básicamente un intercambio entre los electrones de los electrodos y los iones o moléculas de la solución, mediante la aplicación de una diferencia de potencial que genera una corriente donde los electrones fluyen desde el punto más negativo hasta el más positivo. Este tipo de reacciones se clasifican según el lugar donde ocurran, ya sea en el seno de la solución, que son las llamadas homogéneas o en la superficie del electrodo, llamadas heterogéneas (Hurley y Masterton, 2015; Rajeshwar, 1997). Por otro lado, en la electrólisis de una disolución de cloruro sódico o sal común en agua (salmuera), se produce cloro gaseoso. Cuando se introduce en la celda de electroflotación una solución de cloruro sódico, que se obtiene simplemente disolviendo sal en agua, la reacción de electrólisis se da de la forma siguiente:

Los iones que se hallan presentes son: procedentes de la sal, el ion cloruro (Cl^-) y el ion sodio (Na^+). Ver la ecuación 2.4.



Los iones procedentes del agua, el hidrogenión (H^+) y el ion hidroxilo (OH^-). Ver las ecuaciones 2.1 y 2.2.

A continuación se hace pasar una corriente continua a través de los electrodos. En estas condiciones:

- En el electrodo positivo (ánodo), los iones cloruro ceden un electrón y se transforman en cloro. Ver ecuación 2.5.



- En el agua queda el sodio (Na^+) restante.
- En el electrodo negativo (cátodo), el hidrogenión (H^+) capta un electrón y se transforma en hidrógeno (H_2). Ver ecuación 2.2.

Comparando la flotación electrolítica con la flotación convencional, la flotación electrolítica es más costosa principalmente por la energía requerida por la electrólisis. Sin embargo, estos costos se compensan en la mayoría de casos por: bajo consumo o incluso la eliminación del colector, la velocidad de flotación aumenta, obtención de un concentrado de mejor calidad, posibilidad de utilización completa de la materia prima y utilización de materias primas que no podrían ser utilizadas por otro proceso existente (Matis & Mavros, 1991).

2.3.1 ELECTROFLOTACIÓN CON BIOSURFACTANTES

La biotecnología ha sido explorada como una alternativa potencial de bajo costo y ambientalmente benigna para muchas técnicas que se utilizan actualmente en el procesamiento de minerales. Últimas investigaciones muestran que muchas bacterias y sus proteínas excretadas, y sus polisacáridos tienen un efecto significativo sobre las propiedades de superficie de diferentes minerales. Por lo tanto, las células bacterianas y sus metabolitos pueden ser utilizados como surfactantes en la electroflotación y modificadores ambientales que permiten una separación selectiva (Dwyner et al., 2012).

Estos microorganismos con la capacidad de mejorar la electroflotación interactúan con el mineral generando cambios en la superficie del mineral por tres diferentes mecanismos: primero, vía unión de la célula microbiana a la superficie del mineral; segundo, los microorganismos pueden catalizar reacciones de reducción u oxidación que modifican el mineral por la generación de energía; o tercero, proteínas extracelulares y polisacáridos producidos por el microorganismo pueden interactuar con la superficie del mineral (Hanumantha Rao & Subramanian, 2007).

2.3.2 VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE ELECTROFLOTACIÓN

Tamaño del Mineral

El tamaño de la partícula es una variable muy importante en el proceso de flotación. Ningún proceso puede concentrar todos los tamaños de partícula satisfactoriamente (Trahar, 1981). La liberación del mineral que se desea recuperar es un factor esencial que afecta fuertemente la recuperación y el contenido del producto del proceso de

electroflotación. Si hay liberación inadecuada, la separación será limitada. En la práctica, los procesos de conminución son usados para la reducción mineralógica de las materias primas a estado de partículas (King, 2012). En el procesamiento de minerales, la liberación de los constituyentes valiosos de la ganga es obtenida a través de operaciones de fragmentado (trituration y molienda), pudiendo ser intercaladas o con etapas de separación por tamaño de partícula (Herbest y Flintoff, 2003). La baja recuperación de partículas finas y ultra finas es causada por la baja probabilidad de colisión y adhesión de partículas - burbujas, dificultad para superar la barrera de energía entre ellas, arrastre mecánico, alta adsorción de reactivos, baja selectividad, alta área superficial por unidad de masa, cinética de flotación, oxidación superficial y cambios mineralógicos (Trahar, 1981).

Selectividad en la flotación

La selectividad en la electroflotación es otro factor muy importante que influencia el proceso de electroflotación, éste factor se basa en el hecho de que la superficie de diferentes especies minerales puede presentar distintos grados de hidrofobicidad. El concepto de la hidrofobicidad de una partícula está asociado a su humectabilidad o “mojabilidad” por el agua. Partículas más hidrofóbicas son menos tolerantes al agua (sustancias apolares). El concepto opuesto a hidrofobicidad está designado como hidrofiliidad (sustancia polar) (Whelan & Brown, 1956). El proceso de hidrofobización ocurre mediante la utilización de reagentes surfactantes que se adsorben en la superficie de las partículas minerales. La adsorción puede ser considerada como un aspecto preferencial de los adsorbentes (surfactantes y especies inorgánicas) en la región interfacial (interfase sólido/líquido), resultado de cambios de energía favorables. Así mismo, cuando una especie surfactante es adsorbida sobre la burbujas o partícula, la remoción de cadenas hidrocarbonadas de agua permite que los dipolos del agua y los iones disueltos interactúen unos con otros sin que una especie no polar las separe. Tal adsorción resulta en condiciones favorables de electroflotación con respecto a las burbujas y a las partículas sólidas (Somasundaran et al., 1964; Fuerstenau & Somasundaran, 2003).

Tamaño de las burbujas.

La influencia de tamaño de burbuja influye en la eficiencia de los procesos de electroflotación. Cuanto menor es el tamaño de las burbujas mejor será la recuperación de finos debido a mayor área superficial de la burbuja (Rubio & Hoberg, 1993).

Se requieren microburbujas para la separación de minerales finos. Cuanto más fino es el mineral la superficie de contacto del mineral es más grande y se necesita burbujas más pequeñas para que el mineral se adhiera a la burbuja (Rubio & Hoberg, 1993).

Sarkar et al., (2010) hicieron la comparación de los procesos de electroflotación y flotación convencional. En este estudio se usaron aire e hidrógeno molecular generado electrolíticamente para la flotación de cuarzo, y las variables de concentración del surfactante, flujo de gas, pH de la solución y tamaño de partícula fueron mantenidas constantes. Los resultados mostraron que un número mayor de partículas finas fueron recuperadas en el proceso de electroflotación en comparación a la flotación convencional. Este resultado fue atribuido al tamaño de las burbujas producidas en la electroflotación.

Velocidad de Agitación

La agitación ayuda a mantener condiciones uniformes y evita la formación de gradiente de concentración en la celda de electroflotación (Ruiz, Á., 2005).

Tiempo de Electroflotación

La eficiencia de la electroflotación aumenta con el tiempo de electroflotación, hasta un valor óptimo; a partir de este valor el rendimiento es constante (Ruiz, Á., 2005).

pH de la solución

En cuanto al efecto del pH sobre la electroflotación de minerales, el pH es una variable muy importante ya que ésta influencia las propiedades superficiales del mineral y del microorganismo, por lo que puede favorecer o inhibir la interacción microorganismo/mineral (Hacha, et al., 2016). El pH es una variable que influencia las propiedades superficiales del mineral, ya que esta es determinada por el pH del medio de acuerdo con la concentración relativa de H^+ y OH^- en la solución (Stumm, 1992; Quast, 2015). Además, las propiedades superficiales del microorganismo también son afectadas por el pH del sistema, los grupos funcionales presentes en la

superficie de la bacteria pueden ser activadas o inhibidas influenciando la interacción microorganismo/partícula (Subramanian et al., 2003; Merma et al., 2013; El-Midany & Adbel-khalek, 2014; Kim et al., 2015; Sanwani et al., 2016).

Hacha, et al., 2016 realizó la recuperación de hematita con burbujas de hidrógeno y oxígeno en función del pH, para una concentración de *R. opacus* de 200mg/L en un rango de granulometría de la hematita de $-38+20\mu\text{m}$. La Figura 11 muestra el efecto de pH sobre la recuperación de hematita en este trabajo. A pH 6 se favorece el incremento de la flotabilidad de la hematita, encima de este pH, la flotabilidad de la hematita tiende a disminuir. Según los resultados obtenidos, el pH óptimo para la recuperación de hematita se encuentra entre un pH de 5 a 7. Entre este pH la interacción partícula/microorganismo se mostró fuerte. Además, en el rango de pH de 5 a 7 diferentes grupos funcionales con carácter hidrofóbico presentes en el *R. opacus* se mostraron muy activos favoreciendo la adhesión y consecuentemente la flotabilidad de las partículas minerales (Bueno et al., 2008; Kim et al., 2015).

El-Midany y Adbel-Khalek (2014) observaron la importancia de las interacciones electrostáticas de Van der Waals, hidrofóbica y de puentes de hidrógeno para la adsorción de bacterias en las superficies minerales, para realizar una flotación satisfactoria. La adsorción de las bacterias en la superficie del mineral depende de los diferentes tipos de interacciones, y al mismo tiempo estas interacciones dependen del pH del medio.

La flotabilidad de hematita con burbujas de hidrógeno y oxígeno presentan un perfil semejante, sin embargo las burbujas de hidrógeno alcanzan valores mayores de recuperación de hematita en comparación con las burbujas de oxígeno; en un rango de pH de 3 a 9. Encima de pH 9 la flotabilidad con burbujas de hidrógeno y oxígeno tienen valores similares (Hacha, et al., 2016).

Según Bueno et al., 2008 y Kim et al., 2015 que realizaron la electroflotación de hematita con *R. opacus* de 200 mg/L, en el rango de pH de 5-7, diferentes grupos funcionales con carácter hidrofóbico presentes en el *R. opacus* se mostraron activos, favoreciendo la adhesión y consecuentemente la flotabilidad de las partículas minerales.

La carga superficial (potencial zeta)

En cuanto al potencial zeta, un aumento de la concentración del electrolito indiferente resulta en un incremento de la fuerza iónica del medio, así la magnitud del potencial zeta de la partícula disminuye. De esta forma, un aumento de la fuerza iónica de la solución provocará una reducción en el espesor de la doble capa eléctrica circundante a la partícula, lo que resulta en una disminución de la magnitud del potencial zeta de la partícula (Hunter, 1981; Quast, 2015; Shrimali et al., 2016). Por ejemplo, un aumento en la concentración del NaCl provoca una disminución del potencial zeta de la hematita, este comportamiento ocurre sin cambiar el punto isoelectrico (punto isoelectrico de la hematita aproximadamente 5.2). Al mismo tiempo, cuando la hematita interactúa con la bacteria *R. opacus* se observa que la hematita experimenta una disminución de su valor de potencial zeta de un valor de pH correspondiente a su punto isoelectrico de 5.2 a 3.9. Mesquita et al., (2003) observan un movimiento similar del punto isoelectrico en la flotación de hematita en un tubo de Hallimond. Este fenómeno es atribuido a la adsorción del surfactante en la superficie del mineral provocado por las fuerzas electrostáticas.

Basándose en los estudios electroforéticos de Soto (2016), el punto isoelectrico de la hematita es de 7.1. A partir de estos datos, se entiende que a pH ácido habrá atracción electrostática entre el mineral y el biosurfactante anionico, resultando una adhesión máxima y por lo tanto se alcanza la máxima recuperación de hematita. Por otro lado a pH básico la adhesión es menor y por lo tanto la recuperación de hematita también (Soto, 2016).

Para la flotación de óxidos de mineral, ésta se da con un surfactante anionico por debajo del PIE y si el surfactante es catiónico la flotación se da por encima del PIE (Fuerstenau, 2005). Los estudios del potencial zeta mostraron que la hematita y la bacteria tienen un PIE de 7.1 y 3.2 respectivamente (Mesquita et al., 2003). A pH 5, las bacterias y el mineral tienen cargas eléctricas opuestas y por lo tanto, la adhesión bacteria-mineral mejora, lo que da como resultado un aumento en la recuperación de hematita.

Mesquita et al., (2003) usaron la bacteria *Rhodococcus opacus* en la flotación de hematita, los autores observaron un cambio de pH y del PIE del mineral después de la interacción con la bacteria. La superficie de la hematita sufrió un desplazamiento del PIE hacia un valor cercano al PIE de las bacterias, esta interacción bacteria-mineral

fue reflejada en la flotabilidad de la hematita. La flotabilidad alcanzada fue de 87% para una concentración bacteriana de 450 mg/L.

López et al., (2015) evaluaron la flotabilidad de hematita utilizando la bacteria *Rhodococcus opacus*. Los resultados de potencial zeta mostraron un desplazamiento del perfil del potencial zeta de la hematita después de la interacción con la bacteria, esta interacción provocó un desplazamiento del PIE del mineral de un pH 5.5 a uno de aproximadamente 3. La máxima flotabilidad alcanzada fue de 84% para una concentración bacteriana de 0.6 g/L.

Densidad de Corriente

La cantidad de gases de oxígeno e hidrógeno generados en los electrodos es directamente proporcional a la densidad de corriente. Jiménez et al. (2010) encontró que a densidades de corriente altas se generan grandes cantidades de burbujas pequeñas, mientras un pequeño número de burbujas grandes se generan a densidades de corriente bajas. La densidad de corriente puede afectar al tamaño de las burbujas, y la concentración de las mismas, sin embargo es necesario tomar en cuenta el efecto de otros factores como el material del electrodo, electrolito, para establecer una relación entre la densidad de corriente y el tamaño de burbuja (Tadesse et al, 2018). De acuerdo a los resultados se deduce que la densidad de corriente es un parámetro importante que influencia el diámetro de las burbujas de hidrógeno y oxígeno generadas durante la electroflotación (Hacha et al., 2016).

De acuerdo a Hacha et al., (2016), la densidad de corriente es un parámetro importante que influencia el diámetro de las burbujas de hidrógeno y oxígeno. El presente trabajo realizó la medición del tamaño de las burbujas para tres valores de densidades de corriente; a 5.28, 6.69, y 8.31 mA/cm². En este estudio se utilizaron electrodos de platino con 99.95% de pureza y los alambres de platino fueron armados en forma de malla. Además, se realizó la medición del diámetro de las burbujas a pH 3, 5, 7, 9 y 11 y con una concentración de sulfato sódico de 0.05M. Los resultados mostraron que a pH 3, un aumento en la densidad de corriente genera la disminución del diámetro de las burbujas de hidrógeno (Hacha et al., 2016). Esto se debe a que la tasa de nucleación aumenta generando que se disminuya el crecimiento de las burbujas y así un mayor número de burbujas se desprende con una disminución de su diámetro (Rahmani et al., 2013). Muchos estudios reportan el mismo resultado acerca del efecto

de las densidades de corriente sobre el diámetro de las burbujas de hidrógeno (Ketkar et al., 1991; Jiménez et al., 2010; Sun et al., 2011 y Alam, 2015). Las burbujas de oxígeno, a pH 3 y diferentes densidades de corriente muestran un comportamiento parecido. Un aumento en la densidad de corriente resulta en la disminución del diámetro de las burbujas de oxígeno. Entonces, sin importar el pH un aumento en la densidad de corriente resulta en la disminución del diámetro de las burbujas de oxígeno e hidrógeno, que concuerda con la teoría de nucleación (Ketkar et al., 1991; Jones et al., 1999; Maris, 2006; Jo et al., 2014 y Alam, 2015).

Un aumento de la densidad de corriente favorece la flotabilidad de la hematita. Para el caso de la electroflotación con burbujas de hidrógeno, la flotabilidad de la hematita (con tamaño de partícula promedio de $-20 \mu\text{m}$) para una densidad de corriente de $28.17\text{mA}/\text{cm}^2$ y un pH de 6 fue en torno a 85%, este aumento de la flotabilidad puede ser atribuido al incremento de la probabilidad de colisión burbuja/partícula como resultado del aumento de las burbujas del sistema y la reducción del diámetro de las burbujas. Las burbujas de oxígeno presentaron el mismo comportamiento en comparación a las burbujas de hidrógeno, pero la flotabilidad máxima de la hematita con burbujas de oxígeno fue menor que con las burbujas de hidrógeno, en torno al 75% a un pH de 6 (Hacha et al., 2016).

Ketkar et al., (1991) utilizó burbujas de hidrógeno y oleato de sodio en la flotación de cuarzo, el incremento de la densidad de corriente fue de 12.5 a $37.5 \text{mA}/\text{cm}^2$. El estudio demostró una fuerte influencia de la densidad de corriente en la flotación de cuarzo. Un aumento de la densidad de corriente favorece la recuperación de cuarzo, e igualmente el incremento fue atribuido al aumento en la tasa de producción de burbujas y a la disminución de su diámetro, lo que aumenta la probabilidad de colisión burbuja/partícula. La flotabilidad de cuarzo fue de aproximadamente 62% a un pH 9.

Gonzales et al., (2013) estudiaron la electroflotación de casiterita y cuarzo usando *R. opacus* como surfactante con burbujas de hidrógeno y oxígeno en conjunto; una de las variables evaluadas fue la densidad de corriente (densidad de corriente entre $25-175\text{mA}/\text{cm}^2$). Las densidades de corriente tienen un papel preponderante en la electroflotación de casiterita y cuarzo. En el presente estudio valores de $75\text{mA}/\text{cm}^2$ favorecen la flotabilidad; la casiterita presenta valores de flotabilidad en torno de 60% y el cuarzo alcanza una flotabilidad de 30%.

Alam (2015) reportó un comportamiento similar en la electroflotación de asfalto en un rango de densidades de corriente de 5-30 mA/cm². En este estudio el autor comprobó que un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de asfalto como resultado del aumento de la generación de burbujas de hidrógeno y oxígeno en la celda de electroflotación, y aumentando la probabilidad de colisión y formación de agregado burbuja/partícula. A intensidades de corriente mayores a 20 mA/cm², el autor observa una disminución de la tasa de generación de burbujas debido a la coalescencia excesiva entre las mismas, reduciendo la remoción de asfalto.

Raju y Khangaonkar (1984) estudiaron la electroflotación de calcopirita con burbujas de hidrógeno y oxígeno separadamente utilizando un surfactante sintético y una densidad de corriente de 56 – 223 mA/cm². En el estudio relacionado a la burbujas de oxígeno, los autores observaron que el incremento en la densidad de corriente es proporcional al incremento en la flotabilidad de calcopirita hasta 111 mA/cm², encima de ese valor de densidad de corriente la recuperación de calcopirita sufre una disminución, debido a la coalescencia de las burbujas. La recuperación de calcopirita con las burbujas de oxígeno fue en torno a 81.3%.

Material del electrodo

El material del electrodo afecta el tamaño de las burbujas de hidrógeno y oxígeno generados. Por ejemplo, los electrodos de hierro producen burbujas de hidrogeno más pequeñas que el electrodo de platino. Esto se debe a que los electrodos de hierro suprimen el crecimiento y la coalescencia de las burbujas de hidrógeno, mientras que ocurre lo opuesto con el electrodo de platino (Hacha et al., 2016). Una revisión concisa de la influencia del material del electrodo sobre el tamaño de las burbujas está dada en la Tabla 5.

Tabla 5. Tamaños de burbuja generados en electrodos de diferentes materiales durante la electrólisis.

	Rango de Tamaño (µm)	Electrodo	Referencia
H ₂	15-65	Al (Aluminio)	Han et al. (2002)
H ₂	19-38	Grafito	Burns et al. (1997)
H ₂	20-89	Pantalla de alambre de acero	Ren et al. (2014a)
H ₂	15-23	Pt (Platino)	Sarkar et al. (2010)
H ₂	68-105	Ti (Talio)	Jiménez et al. (2010)
	62-88	Acero Inoxidable	Glembotsky et al. (1975)
H ₂	25-55	Pt (Platino)	
	17-40	Fe (Hierro)	
	25-35	C (Carbono)	
O ₂	25-55	Pt (Platino)	
H ₂	22-34	Plato de Acero Inoxidable	Ketkar et al. (1991)
	28-39	Malla 200	
	32-45	Malla 100	
	37-49	Malla 60	
O ₂	42-48	Plato de Pt	
	38-50	Malla 200	
O ₂	17-38	Grafito	Chen et al. (2002)
			Al Shakarji et al. (2011)
O ₂	49-58	Aleación de Pb-Ca-Sn	

Nota. Recuperado de: Chen & Chen, 2010.

Geometría de los Electrodos

En adición al tipo de material de los electrodos, la geometría de los mismos y su respectiva aspereza, también influyen el tamaño de burbuja. Por ejemplo los electrodos de mallas de níquel producen burbujas más pequeñas que los electrodos de platos de níquel (Lumanauw, 2000). En el caso de los electrodos de mallas, cuanto más grande es el diámetro de las mallas del cátodo, más grandes serán las burbujas generadas; la razón es que dos mallas con diámetro largo tienen menos sitios superpuestos que aquellos con un diámetro más pequeño. Además, las mallas con diámetro grande tienen curvaturas más pequeñas generando mayor aspereza en los electrodos de mallas, lo que resulta en burbujas grandes (Lumanauw, 2000). Por el contrario un incremento en la aspereza en los electrodos tipo plato resultan en la

generación de burbujas pequeñas de hidrógeno, debido al gran número de sitios de nucleación (Hacha et al., 2016).

Hacha et al., (2016), utilizó dos tipos de electrodos de geometrías diferentes, denominados electrodo I y electrodo II. El electrodo I presenta diámetro de alambre y espaciamiento en la malla menor en comparación al electrodo II. Según los resultados, las características del electrodo influenciaron en el aumento de diámetro de las burbujas de hidrógeno y oxígeno. Hacha et al., (2016), realizó un análisis con respecto al aumento del diámetro del alambre del electrodo, concluyendo que un mayor diámetro de hilo resulta en el aumento de las fuerzas interfaciales sobre la burbuja y el electrodo, en consecuencia, esto resulta en una mayor fuerza de adherencia entre la burbuja y el electrodo (Lubetkin, 1994; Lumanauw, 2000). Así, la burbuja puede tener un mayor tiempo de crecimiento resultando en el aumento del diámetro de las burbujas (Hacha et al., 2016). Sarkar et al., (2011) obtienen resultados similares con electrodos de malla de acero inoxidable de diámetros 190 μm y 400 μm , usando sulfato de sodio como electrolito.

Por otro lado, el efecto del espaciamiento de la malla del electrodo también favorece al aumento de diámetro de las burbujas de hidrógeno y oxígeno. Un aumento en el espaciamiento de la malla del electrodo resulta en una menor fuerza de repulsión entre las cargas superficiales de dos alambres de la malla. En vista de este hecho, las mallas tienen un tiempo mayor de crecimiento resultando en un incremento en el tamaño de las burbujas (Hacha et al., 2016). Sun et al., (2011) obtuvo el mismo resultado para electrodos tipo malla de acero inoxidable. El estudio se realizó a diferentes densidades de corriente de (5.28, 6.69 y 8.31 mA/cm²), obteniendo los mismos resultados.

Concentración de Biosurfactante

La bioflotación es una tecnología que emplea microorganismos para la separación de minerales por medio de la modificación de las propiedades superficiales del mineral provocados por los microorganismos empleados. En este proceso los microorganismos actúan como bioreagentes o surfactantes que transforman la superficie hidrofílica del mineral en una superficie con características hidrofóbicas, facilitando así la separación del mineral de interés.

Hacha, et al., (2016), realizó el estudio del efecto de la concentración del microorganismo en la flotación de las partículas finas de hematita, los resultados se muestran en la Figura 12. El estudio se realizó para una concentración bacteriana de 100 a 600 mg/L, un rango granulométrico de hematita entre $-38+20 \mu\text{m}$ y a un pH de 6. Se alcanzó la flotabilidad máxima para una concentración de 200 mg/L, encima de este valor la flotabilidad comienza a decrecer. Las burbujas de hidrógeno y oxígeno siguieron una misma tendencia, sin embargo, las burbujas de hidrógeno alcanzan recuperaciones mayores en comparación a las burbujas de oxígeno.

Varios investigadores encontraron diferentes concentraciones bacterianas a las cuales se alcanza la bioflotación máxima de hematita. Dubel et al., (1992) encontró una concentración máxima de *Mycobacterium phlei* de 145 mg/L para la flotación de hematita en un rango de granulometría de hematita entre $-53+20 \mu\text{m}$. Por otro lado, Yang et al., (2013) realizaron estudios de bioflotación de minerales presentes en minerales de hierro, entre ellos, la hematita con *Rhodococcus erythropolis*. En este trabajo la concentración máxima de *R. erythropolis* en la flotación de hematita fue de 80 mg/L.

Lopez et al., (2015) también realizaron estudios de bioflotación de hematita. Estos autores encontraron una concentración límite de *Rhodococcus ruber* de 600 mg/L.

Hacha et al., 2016, concluyó que la concentración de los colectores tuvo una fuerte influencia en la flotabilidad de las partículas de hematita. Además, realizó ensayos de electroflotación con dos tipos de colectores. En ese sentido, en el presente trabajo la mayor flotabilidad de hematita con oleato de sodio fue de 90% a un pH de 7 y de 55% con *R. opacus* a un pH de 6. El mayor desempeño del oleato de sodio está relacionado al tipo de interacción mineral/ surfactante. La interacción del oleato de sodio es predominantemente de naturaleza química con todas la consecuencias de este tipo de interacción, por lo que el mecanismo de quimisorción del oleato de sodio en la superficie de la hematita forma oleato férrico observado mediante análisis por espectrofotometría infrarroja (Quast, 2016). Por otro lado el *R. opacus* presenta una adsorción predominantemente de naturaleza electrostática y de menor energía en comparación a la química (Merma et al., 2013; Yang et al., 2013). En el caso del oleato de sodio el tiempo de acondicionamiento fue de 5 min en pH 7, la flotabilidad máxima alcanzada fue de 99% con burbujas de hidrógeno y 90% con burbujas de

oxígeno, a una densidad de corriente 22.18 mA/L, granulometría de hematita de -20 μm y 200 mg/L de concentración del surfactante.

Ekmekyapar et al., (2006) estudió la flotación de hematita con *R. opacus* para concentraciones bacterianas entre 100 a 600 mg/L, un rango granulométrico de -38+20 μm y a un pH de 6. Se alcanzó la flotabilidad máxima para una concentración de 200mg/L, encima de este valor la flotabilidad comienza a decrecer. La disminución de la recuperación de hematita a altas concentraciones de biosurfactante puede estar ligada a la formación de agregados durante la adsorción del microorganismo en la superficie del mineral resultando en la disminución del área efectiva de adsorción (Ekmekyapar et al., 2006). Otra posibilidad puede estar relacionada al hecho de que el biosurfactante en altas concentraciones puede tener preferencia de ser adsorbida en la interfase liquido/gas disminuyendo la interacción con la superficie del mineral y consecuentemente perjudicando la flotabilidad del mineral (Hacha et al., 2016).

Geometría de la Celda de Electroflotación

Actualmente, en la industria minera las celdas de flotación son tubulares (columnas de flotación). Una columna de flotación, en comparación a las celdas de flotación tradicionales, debido a su estructura ofrece mayor tiempo de retención de las partículas, lo que aumenta la probabilidad de colisión y adhesión de las partículas finas en las burbujas (Matis & Mavros, 1991).

Además, estas columnas de flotación, en comparación con las celdas de flotación tradicionales, tienen menores costos de operación, consumen menor energía, bajos costos de mantenimiento, la operación y mantenimiento de la columna de flotación incluyen procedimientos sencillos, y aumentan el rendimiento (Eriez Flotation Division, consulta en enero del 2019).

2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Las investigaciones y en particular los diseños experimentales intentan establecer básicamente relaciones causa-efecto. Más específicamente, cuando se desea estudiar como una variable independiente (causa) modifica una variable dependiente (efecto) (Ramón, G., 2016).

El establecimiento de que, en un experimento, una variable independiente produce una variación específica (que solo puede ser atribuida a la variable independiente) en la variable dependiente depende fundamentalmente de la manera como esté diseñado el experimento. Los

procedimientos estadísticos permiten confirmar o validar el procedimiento empleado, pero una cosa debe ser clara: el hecho de aplicar procedimientos estadísticos no permite afirmar que el experimento está bien diseñado, al punto de que se puede afirmar que las variaciones producidas en los sujetos experimentales sólo y exclusivamente pueden ser atribuidas a la variable independiente (Ramón, G., 2016).

Las variables independientes son las que elegimos libremente, o manipulamos, para verificar su efecto en, o su relación con, las variables dependientes. El objetivo directo de una investigación es clarificar la relación entre las variables independientes y las variables dependientes (Ramón, G., 2016).

El enfoque cuantitativo reconoce al método científico como el único camino para hacer ciencia. Así mismo, Bunge citado en Molina y Mousalli-Kayat (2016) señala que este método, comprende los procedimientos para la formulación y comprobación de hipótesis a partir de la experimentación, lo que constituye el carácter hipotético-deductivo, es decir, de la teoría general (a partir del cual se generan las hipótesis) a la particularidad de los hechos estudiados en la recolección de los datos (experiencia) (Mousalli, G., 2015).

Esto significa que, lo que se considera científicamente válido está asociado a la objetividad de los instrumentos utilizados, la forma de selección de las unidades de análisis y la aplicación correcta de los métodos estadísticos para determinar la significación de los resultados. A los criterios de objetividad de los instrumentos se les conoce como validez y confiabilidad. La validez nos revela si el instrumento realmente mide lo que debe medir y la confiabilidad indica la consistencia de esa medida, es decir, en qué medida el instrumento aplicado varias veces para las mismas unidades de análisis producirán los mismos resultados, los cálculos de estas medidas también se realizan a través de técnicas estadísticas (Mousalli, G., 2015).

En la revisión de la literatura hay diferentes clasificaciones de los diseños experimentales, en este caso tomaremos en consideración lo propuesto por Campbell y Stanley (1966, citado en Hernández, Fernández y Baptista 2010) quienes indican que los éstos diseños pueden ser pre-experimentales, experimentales “puros” y cuasi-experimentales. Ver Figura 2. Previo a la explicación de cada uno de estos diseños es importante revisar un conjunto de conceptos asociados a los mismos, los cuales se presentan en el la Tabla 6.

Tabla 6. Conceptos fundamentales en el diseño experimental.

Concepto	Definición
Tratamiento	Estímulo, técnica, medicamento, situación en particular a la que se someten los sujetos para observar su efecto sobre otras variables
Grupo Control	Sujetos a los cuales no se aplica el tratamiento(s) en estudio
Grupo Experimental	Sujetos que reciben el tratamiento(s)
Aleatorización	Proceso de selección de los sujetos donde todos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados
No aleatorización	Proceso de selección de los sujetos donde NO todos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados

Nota. Recuperado de: (Mousalli, G., 2015).

Makhija et al. (2014) determinó un modelo estadístico de orden cuadrático para la flotación de minerales de hierro usando ácido oleico como surfactante.

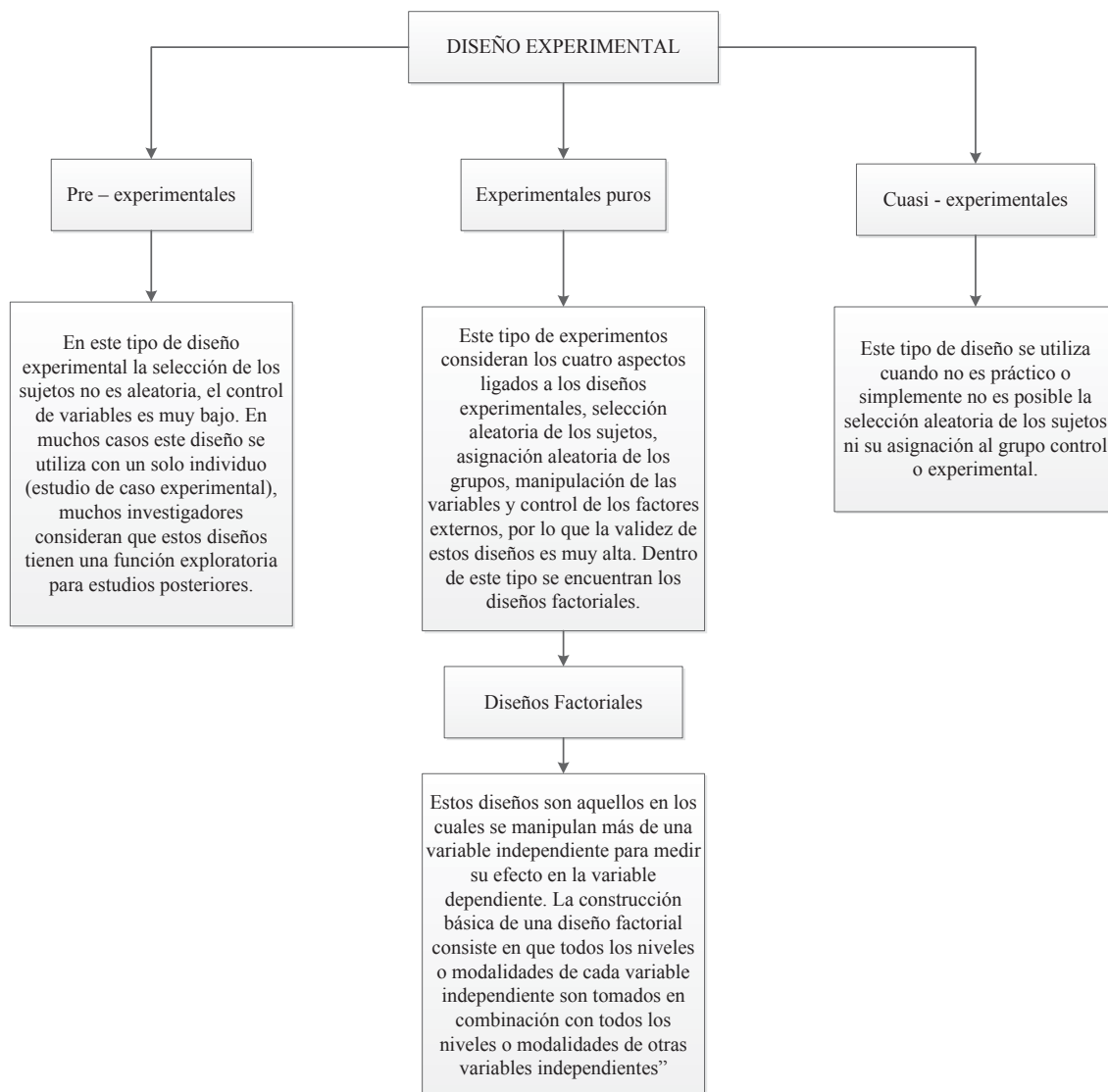


Figura 2. Tipos de diseños experimentales cuantitativos.

Nota. Fuente: (Mousalli, G., 2015).

2.5 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

La región de infrarrojo del espectro electromagnético comprende la radiación con números de onda entre 12,800 a 10 cm⁻¹. Esta región se divide en tres secciones: cercano, medio y lejano. La sección medio es la más utilizada que se extiende entre 4000 y 650 cm⁻¹ (Dimas, 2011).

La radiación infrarroja es absorbida por las moléculas orgánicas y se convierte en energía de vibración molecular. Los fotones no tienen energía suficiente para provocar

transiciones electrónicas pero si pueden conseguir vibraciones de los enlaces covalentes de las moléculas orgánicas. La energía necesaria para provocar una transición vibracional depende del tipo de átomos y del tipo de enlace que los mantiene unidos (Dimas, 2011).

Un espectro infrarrojo es un gráfico de número de onda frente al porcentaje de transmitancia (%) o absorbancia. En este gráfico se observan la intensidad de energía absorbida por la molécula, provocada por las vibraciones de los enlaces (Dimas, 2011).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de hidrocarburos de la Escuela Profesional de Ingeniería Química.

3.1 MUESTRA

Se utilizó para los ensayos experimentales la muestra del mineral hematita proveniente de la ciudad de Nazca, y recolectado de la Escuela Profesional de Geología.

3.2 EQUIPOS, INSTRUMENTOS, MATERIALES Y REACTIVOS

Equipos

- Reactor hidrotérmico.
- Chancadora mecánica marca DENVER.
- Tamiz vibratorio marca Ro-Tap modelo RX-29.
- Celda de electroflotación.
- Destilador de agua marca JSB, modelo 2L/4L.
- Chancadora de quijadas marca DENVER.
- Estufa eléctrica marca CIMATEC S.A.C., modelo MEMMERT.

Instrumentos

- Espectrofotómetro marca OLYMPUS modelo VMR.
- Espectrofotómetro Nicolet FTIR 2000.
- Balanza digital marca OHAUS, modelo Adventurer.
- Turbidímetro digital Turvichек, marca Lovibond.
- pH-metro digital, marca Lovibond.

Materiales

- Papel filtro.
- Vasos de precipitado.
- Embudos de vidrio.
- Soporte universal.
- Morteros de cerámico.
- Probetas de vidrio de 10 ml, 50 ml, 250 ml y 1000 ml.
- Fiolas de vidrio de 1 ml, 5 ml y 10 ml.
- Agitador manual de vidrio.
- Placas petri
- Tubos de ensayo.

- Levadura *Sacharomyces cerevisiae*.
- Etanol de 96°.

Reactivos

- Hidróxido de sodio a una concentración de 0.01 M.
- Ácido clorhídrico a una concentración de 0.1 M.
- Cloruro de sodio grado reactivo.

3.3 ANÁLISIS ELEMENTAL DEL MINERAL HEMATITA

Muestras de hematita se sometieron a un proceso de chancado y molienda en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. La muestra molida del mineral hematita fue tamizada en la Escuela Profesional de Ingeniería Civil para separar una muestra de 15g con un tamaño promedio de partícula menor a 75 μm . Esta muestra fue sometida a un análisis elemental por fluorescencia de rayos X, XRF en el espectrofotómetro marca OLYMPUS en la Escuela Profesional de Ingeniería Química; con la finalidad de identificar y cuantificar la composición porcentual de los elementos químicos que componen el mineral.

3.4 ACONDICIONAMIENTO DE LA GRANULOMETRÍA DE HEMATITA

La granulometría de la hematita se obtuvo mediante el proceso de chancado, molienda y tamizado, todas estas operaciones fueron realizadas en el laboratorio de la escuela profesional de Ing. Metalúrgica. En esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

- El mineral hematita en forma de roca fue colocada en una bolsa de tela blanca y luego amarrada para poder fraccionarla en pedazos más pequeños, chancando con un combo de metal.
- Seguidamente se llevó el mineral chancado a un equipo de molienda para ser molido, esta operación se repite 5 veces con el objetivo de recuperar un mineral más fino.

Finalmente obtenido el mineral molido paso por un tamiz de malla número 200 para alcanzar tamaños de partícula menores a 75 μm que corresponde al rango de partículas finas, el peso del mineral que atravesó por la malla 200 fue de 300 g de hematita.

3.5 EXTRACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE

En este estudio se utilizó la levadura desecada *Sacharomyces cerevisiae*, levadura de panadería, la cual fue sometida a un proceso de extracción mediante etanol de 96%. El procedimiento propuesto basado en el trabajo de Soto., 2016 se muestra en la Figura 3.

Por otro lado, se conoce que los biosurfactantes producidos por la levaduras pueden ser producidos extracelularmente o en partes de la célula (Amaral et al., 2010). Por lo tanto, el biosurfactante se extrajo sabiendo que éste se encuentra en la pared celular de la levadura y por esta razón se decidió utilizar el método de extracción con etanol. Se utilizó la levadura *Sacharomyces cerevisiae* como fuente de obtención del biosurfactante porque este microorganismo es económico y tiene mayor disponibilidad en el mercado.

Descripción del protocolo de extracción

- En el reactor hidrotérmico se realizó un proceso de extracción sólido-líquido. Se colocó en el reactor la levadura y el etanol de 96° en una proporción volumétrica levadura/etanol de 1/3. Después, el reactor herméticamente cerrado, se colocó en la mufla a diferentes temperaturas (150°C, 180°C) y a diferentes tiempos (3hrs, 4hrs) para seleccionar las condiciones a las cuales se obtiene mayor rendimiento del biosurfactante.
- Transcurrido el tiempo de extracción, se dejó enfriar el reactor por 1 hora. Como producto de la extracción se obtuvo el biosurfactante crudo en solución con el etanol. A continuación, se filtró el biosurfactante para quitarle las impurezas.
- Posteriormente, en la estufa, se secó el biosurfactante en placas petri para evaporar el etanol a 80°C por 2.5hrs.
- Transcurrido el tiempo de secado, se dejó enfriar el biosurfactante por 30 minutos. El biosurfactante seco se diluyó con agua destilada, y se agitó hasta obtener una mezcla homogénea.
- A continuación, se filtró por segunda vez el biosurfactante diluido con el objetivo de retirar la parte insoluble de este.
- Finalmente se obtuvo el biosurfactante crudo que fue almacenado en un recipiente hermético bajo refrigeración.

En la Tabla 7 se muestra los ensayos realizados para la extracción del biosurfactante a diferentes condiciones de operación.

Tabla 7. Variables y niveles para el diseño experimental de la extracción del biosurfactante.

		Rendimiento del biosurfactante (g/g)	
		Temperatura	
		180°C	150°C
Tiempo	3hrs		
	4hrs		

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, se seleccionó las condiciones a las cuales se logró mayor rendimiento del biosurfactante; y el proceso de extracción del biosurfactante bajo las mejores condiciones se realizó por triplicado.

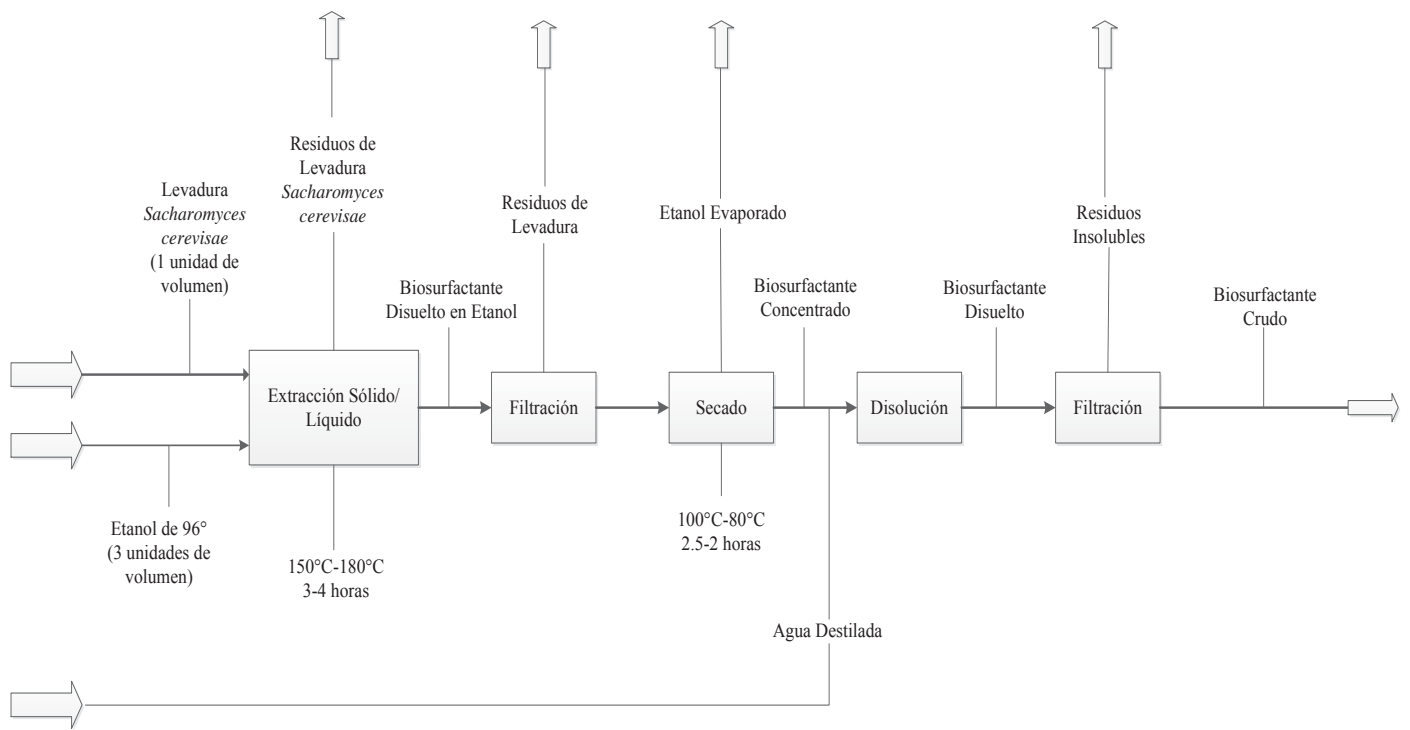


Figura 3. Diagrama de bloques del protocolo de extracción del biosurfactante de la levadura *Sacharomyces Cerevisiae*.
 Nota. Adaptado de: Soto et al., 2016.

3.6 CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL BIOSURFACTANTE CRUDO

En la presente etapa se realizaron las siguientes actividades:

- Se midió en un vaso precipitados 25 ml del biosurfactante crudo a una concentración de 100 ppm.
- Después fue secada en una estufa en 5 placas petri a una temperatura de 50° C por un periodo de tiempo de 12 horas.
- Una vez cumplido el tiempo indicado, se sacó las placas Petri de la estufa para luego raspar la costra de biosurfactante crudo y seguidamente ser molido.
- Una vez obtenida la muestra, fue llevada al laboratorio de Orgánica de la Escuela Profesional de Química para realizar un análisis FTIR (Espectroscopia Infrarroja con Transformadas de Furier).
- Se mezcló el biosurfactante crudo con una matriz de KBr a la razón de tres cucharas espátulas pequeñas de biosurfactante por una de KBr.
- Una vez la muestra bien homogenizada se introdujo al equipo FTIR (Espectroscopia Infrarroja con Transformadas de Furier) el cual utiliza espectros de adsorción infrarroja en un espectrofotómetro para la identificación de los grupos funcionales del biosurfactante.

3.7 CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL MINERAL HEMATITA ANTES Y DESPUÉS DE LA INTERACCIÓN CON EL BIOSURFACTANTE.

Muestras de hematita fueron analizadas antes y después de la interacción con el biosurfactante. En esta etapa se realizaron las siguientes actividades:

Descripción del procedimiento de la hematita pura antes de ser analizada por FTIR

- Se pesó 3 gramos de hematita pura.
- Posteriormente se llevó la muestra al laboratorio de Orgánica de la Escuela Profesional de Química para caracterizar los grupos funcionales de esta haciendo un análisis FTIR (Espectroscopia Infrarroja con Transformadas de Furier).

3.8 ENSAYOS PRELIMINARES DE ELECTROFLOTACIÓN

Se construyó una celda de electroflotación que se muestra en la Figura 4 con el fin de verificar si es posible realizar la electroflotación del mineral hematita utilizando un biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*.

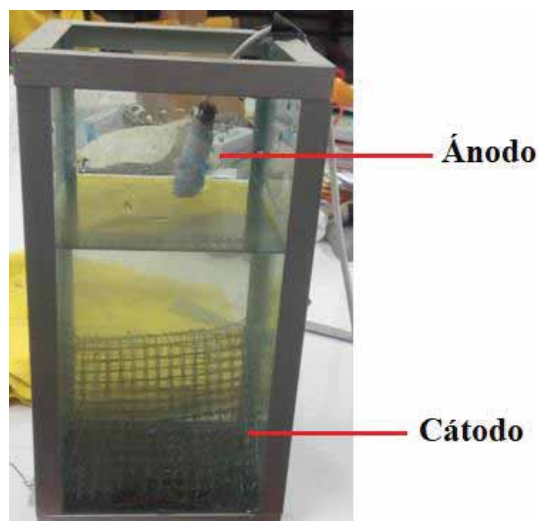


Figura 4. Celda de electroflotación preliminar.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Esta celda de electroflotación cuadrangular de con un volumen de 2 litros, la concentración del mineral hematita en la pulpa se determinó en 0.857 g/L y la pulpa en la celda de electroflotación alcanzó un nivel de 20 mm por debajo del desbordamiento tiene un ánodo de grafito y un cátodo de acero inoxidable 304316 basada en los siguientes criterios:

Se usó el ánodo de grafito porque Burns et al. (1997) confirmó que un electrodo de grafito genera burbujas de hidrógeno de tamaño entre 19- 38 μm y burbujas de oxígeno entre 17-38 μm . Además, según Aurbach et al., (1996) los ánodos de grafito pueden ser reutilizados cientos de veces manteniendo su rendimiento muy cerca de su rendimiento óptimo. Por lo tanto, el grafito es capaz de generar microburbujas y tiene una vida útil prolongada.

Así mismo, La selección del material del electrodo afecta el tamaño de las burbujas de hidrógeno y oxígeno generados. Los electrodos de hierro producen burbujas de hidrógeno más pequeñas que un electrodo de platino. Esto se debe a que los electrodos de hierro suprimen el crecimiento y la coalescencia de las burbujas de hidrógeno, mientras que ocurre lo opuesto con el electrodo de platino (Hacha et al., 2016). Ren et al., (2014) confirmó con su estudio que el acero genera burbujas de hidrógeno entre 20-89 μm .

En adición al tipo de material de los electrodos, para construir la celda de electroflotación se tomó en consideración la geometría de los electrodos y su respectiva aspereza porque influyen el tamaño de burbuja. Por ejemplo, los electrodos de mallas de níquel producen burbujas más pequeñas que los electrodos de platos de níquel (Lumanauw, 2000). En el caso de los electrodos de mallas, cuanto más grande es el diámetro de las mallas del cátodo, más grandes serán las burbujas generadas; la razón es que dos mallas con diámetro largo tienen menos sitios superpuestos que aquellos con un diámetro más pequeño. Además, las mallas con diámetro grande tienen curvaturas más pequeñas generando mayor aspereza en los electrodos de mallas, lo que resulta en burbujas grandes (Lumanauw, 2000). Por el contrario un incremento en la aspereza en los electrodos tipo plato resulta en la generación de burbujas de hidrógeno pequeñas, debido al gran número de sitios de nucleación (Hacha et al., 2016). Por lo tanto, se decidió utilizar un cátodo tipo malla, de acero inoxidable 304316, de diámetro 0.2 mm y espaciamiento 2 mm.

La celda de electroflotación cuadrada de la Figura 4 no funcionó eficientemente porque durante la electroflotación la pulpa empezaba a rebasar por las aristas de la celda, la pulpa se acumulada en las esquinas y la espuma no podía ser retirada debido a los bordes de aluminio que ésta tenía. Así mismo la celda de electroflotación cuadrada ofrece menor tiempo de retención del mineral en comparación con una celda tubular. Por estas razones, la celda de electroflotación cuadrada se cambió por una celda de electroflotación tubular.

3.9 ENSAYOS DE ELECTROFLOTACIÓN

Los ensayos de electroflotación se llevaron a cabo en una celda de electroflotación, construida de acuerdo a las Figuras 5 y 6.

Así mismo, el circuito eléctrico de la celda de electroflotación se muestra en la Figura 7.



Figura 5. Esquema de la celda de electroflotación.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

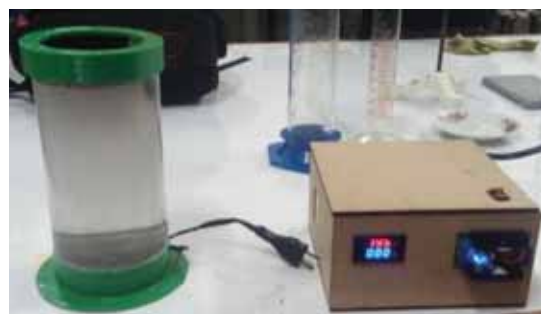


Figura 6. Esquema de la celda de electroflotación.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

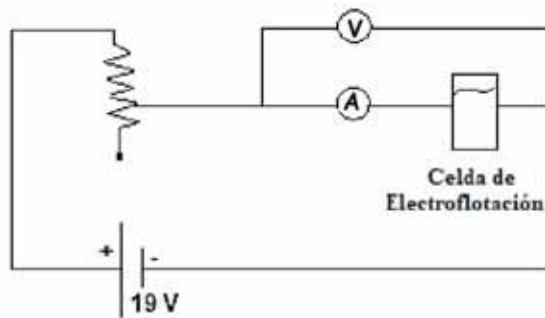


Figura 7. Circuito eléctrico de la celda de electroflotación.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Esta celda de electroflotación tubular se construyó considerando las mismas características de volumen, electrodos y circuito eléctrico de la celda de electroflotación cuadrada.

Para las experiencias, se utilizó un diseño factorial multinivel tomando como: variable dependiente, el porcentaje de flotabilidad de la hematita (%); y como variables independientes, el pH, la intensidad de corriente (Amperio), y la concentración de biosurfactante (ppm).

En la Tabla 8 se muestra los niveles y factores de las variables independientes para el diseño experimental.

Tabla 8. Variables y niveles para el diseño experimental.

Variables	Niveles				
pH	7	5	3	-	-
Concentración de BS (ppm)	20	40	60	80	100
Intensidad de Corriente (Amper)	1	2	3	-	-

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Los parámetros de los ensayos de electroflotación se muestran en la Tabla 9. Así mismo, el procedimiento que se siguió para realizar los ensayos de electroflotación se muestra en la Figura 8. Además, las Tablas 10 y 11 muestran un plan experimental para los ensayos de electroflotación.

Tabla 9. Parámetros de los procesos de electroflotación.

Parámetros	
Temperatura Ambiente	15°C
Presión Atmosférica	3400 m.s.n.m
Tiempo de Electroflotación	15 min
Concentración del Electrolito NaCl	26.8 g/L
Tiempo de Acondicionamiento del Biosurfactante	10 min
Concentración del mineral Hematita en la pulpa	0.8571 g/L
Área del Cátodo	16.824 cm ²

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

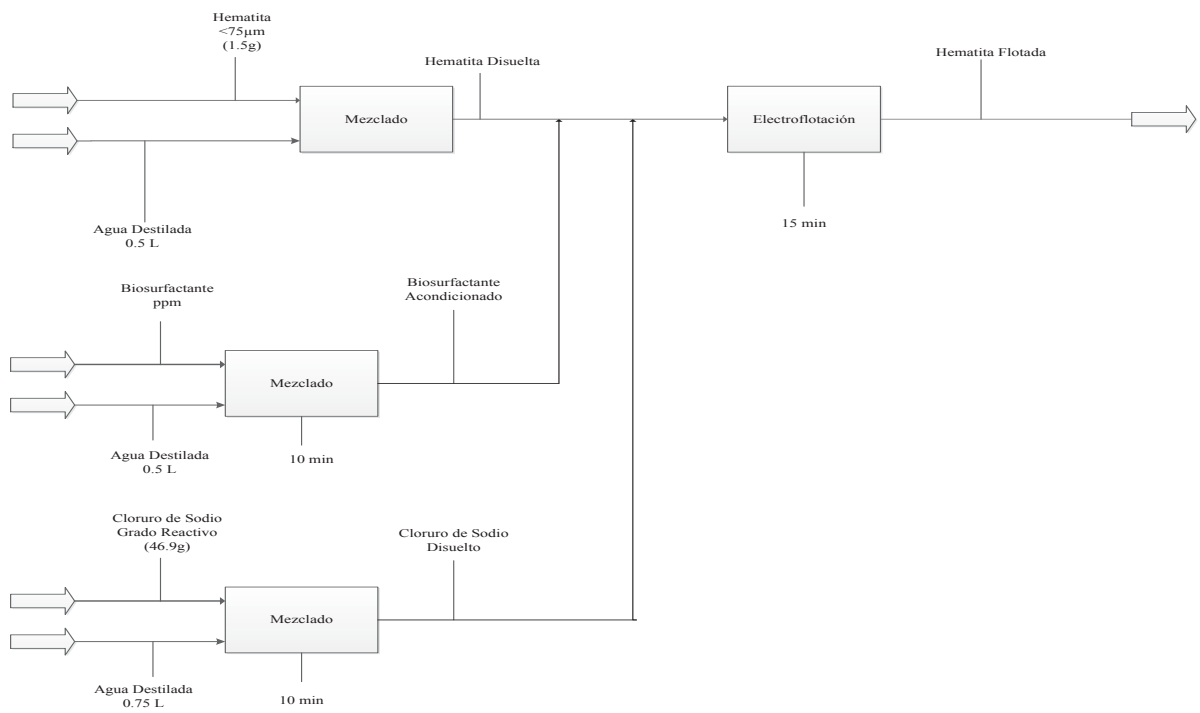


Figura 8. Diagrama de bloques del procedimiento de los ensayos de electroflotación
 Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10. Plan experimental.

N° Prueba	Variables Independientes			Variable Dependiente
	Intensidad de Corriente	pH	Concentración de Biosurfactante, ppm	% Flotabilidad
1	1.00	7.00	0.00	
2	1.00	7.00	20.00	
3	1.00	7.00	40.00	
4	1.00	7.00	60.00	
5	1.00	7.00	80.00	
6	1.00	7.00	100.00	
7	1.00	5.00	0.00	
8	1.00	5.00	20.00	
9	1.00	5.00	40.00	
10	1.00	5.00	60.00	
11	1.00	5.00	80.00	
12	1.00	5.00	100.00	
13	1.00	3.00	0.00	
14	1.00	3.00	20.00	
15	1.00	3.00	40.00	
16	1.00	3.00	60.00	
17	1.00	3.00	80.00	
18	1.00	3.00	100.00	
19	2.00	7.00	0.00	
20	2.00	7.00	20.00	
21	2.00	7.00	40.00	
22	2.00	7.00	60.00	
23	2.00	7.00	80.00	
24	2.00	7.00	100.00	
25	2.00	5.00	0.00	
26	2.00	5.00	20.00	
27	2.00	5.00	40.00	
28	2.00	5.00	60.00	
29	2.00	5.00	80.00	
30	2.00	5.00	100.00	
31	2.00	3.00	0.00	
32	2.00	3.00	20.00	
33	2.00	3.00	40.00	
34	2.00	3.00	60.00	
35	2.00	3.00	80.00	
36	2.00	3.00	100.00	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11. Plan experimental.

N° Prueba	Variables Independientes			Variable Dependiente
	Intensidad de Corriente	pH	Concentración de Biosurfactante, ppm	% Flotabilidad
37	3.00	7.00	0.00	
38	3.00	7.00	20.00	
39	3.00	7.00	40.00	
40	3.00	7.00	60.00	
41	3.00	7.00	80.00	
42	3.00	7.00	100.00	
43	3.00	5.00	0.00	
44	3.00	5.00	20.00	
45	3.00	5.00	40.00	
46	3.00	5.00	60.00	
47	3.00	5.00	80.00	
48	3.00	5.00	100.00	
49	3.00	3.00	0.00	
50	3.00	3.00	20.00	
51	3.00	3.00	40.00	
52	3.00	3.00	60.00	
53	3.00	3.00	80.00	
54	3.00	3.00	100.00	

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Para el cálculo de la flotabilidad de hematita primero se elaboró una curva de calibración entre la concentración del mineral hematita versus turbiedad. Para lograr esto se prepararon diferentes soluciones del mineral hematita con diferentes concentraciones, y se midió la turbiedad de cada una de las soluciones. En la Tabla 12 se muestran los datos obtenidos y en la Figura 9 se muestra la curva de calibración.

Tabla 12. Datos de la Curva de Calibración.

Turbiedad/NTU	Concentración Hematita (g/L)
200.27	0.8751
191.00	0.75
172.33	0.65
160.64	0.55
143.08	0.45
119.13	0.35
97.27	0.25
67.48	0.15
24.37	0.05
0	0

Nota. Fuente: Elaboración Propia

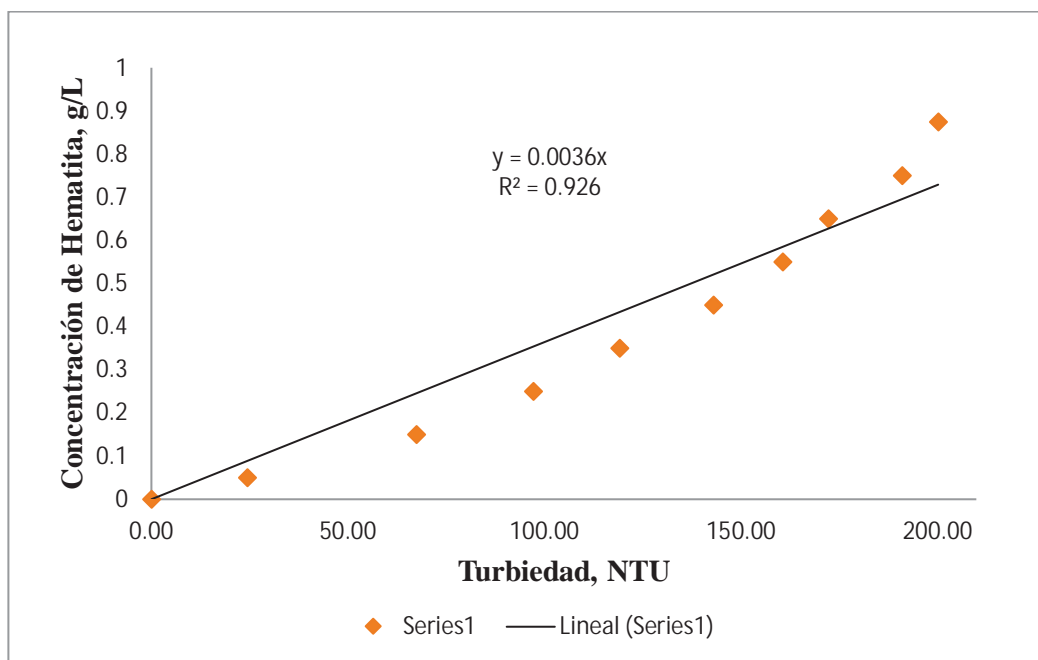


Figura 9. Curva de calibración concentración del mineral hematita versus turbiedad.

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Una vez elaborada la curva de calibración, de cada ensayo de electroflotación se midió la turbiedad de la solución que queda en la celda después de la electroflotación. Utilizando la curva de calibración se hizo una correlación para calcular la concentración del mineral hematita en la solución que queda después de la electroflotación. La correlación turbiedad versus concentración de hematita se realiza con la Ecuación 3.1. A continuación, se calculó el

porcentaje de mineral hematita que no flotó, con la Ecuación 3.2; y finalmente se calculó el porcentaje de flotabilidad de la hematita con la Ecuación 3.3.

$$0.0036 \times \text{Turbiedad} = [\text{Hes}] \quad (3.1)$$

$$\frac{[\text{Hes}]}{0.8571} \times 100 = [\text{He}] \quad (3.2)$$

$$100 - [\text{He}] = \% \text{Flotabilidad de la Hematita} \quad (3.3)$$

3.10 INTERACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO EN LAS PARTÍCULAS DE HEMATITA

Descripción del procedimiento de caracterización de grupos funcionales de la hematita después de interactuar con el biosurfactante crudo

- Se pesó 0.5 gr de hematita pura.
- Se midió en un vaso precipitado 25 ml del biosurfactante crudo a una concentración de 100 ppm.
- Las partículas de hematita fueron sumergidas en una solución de biosurfactante crudo durante 5 minutos.
- Posteriormente fue filtrada con papel filtro.
- Después fue secada en una estufa en 5 placas petri a una temperatura de 40° C por un periodo de tiempo de 12 horas, antes del análisis FTIR.
- Una vez cumplido el tiempo indicado, se sacó las placas Petri de la estufa para luego raspar la costra de biosurfactante crudo y seguidamente ser molido.
- Una vez obtenida la muestra, fue llevada al laboratorio de Orgánica de la Escuela Profesional de Química para ver los grupos funcionales de esta haciendo un análisis FTIR (Espectroscopia Infrarroja con Transformadas de Furier), para esta etapa tampoco se utilizó la matriz de KBr.
- Después del análisis realizado se podrá observar como el biosurfactante crudo fue absorbida por la hematita.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ANALISIS ELEMENTAL DEL MINERAL HEMATITA

La Tabla 13 muestra los resultados de la composición porcentual de la hematita, evidentemente la muestra está compuesta principalmente por hierro con un porcentaje de 74.48%, con lo que se comprueba su naturaleza.

Tabla 13. *Composición del mineral hematita.*

ELEMENTO	COMPOSICIÓN %	COMPOSICIÓN [ppm]
Fe	74.48%	-
LE	16.40%	-
Si	4.008%	-
Mg	2.07%	-
Al	2.03%	-
Ca	-	3248
Pb	-	1530
Bi	-	1345
S	-	1136
Cr	-	859
P	-	759
Cu	-	665
Rb	-	180
U	-	160
Mn	-	140
Mo	-	82
Sr	-	20

Nota. Fuente: Elaboración Propia

LE: Elementos livianos, carbón, sodio, hidrógeno, oxígeno y litio.

4.2 EXTRACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO

En la Tabla 14 se observan los resultados del rendimiento de extracción del biosurfactante bajo diferentes condiciones de operación.

Tabla 14. Rendimiento del proceso de extracción de biosurfactante crudo a partir de la levadura *Sacharomyces Cerevisae* bajo diferentes condiciones de extracción.

Rendimiento del biosurfactante (g/g)		
Tiempo	Temperatura	
	180°C	150°C
3hrs	0.51	0.38
4hrs	0.65	0.43

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Se observó que a temperaturas menores de 180°C, el rendimiento del biosurfactantes fue menor a 0.50g/g de biosurfactante por peso de levadura desecada *Sacharomyces Cerevisae*, la concentración del biosurfactante extraído era en promedio 9000ppm. A temperaturas mayores a 180° C, el rendimiento del biosurfactante fue mayor a 0.5g/g con una concentración de 17500 ppm. Las condiciones óptimas para la extracción del biosurfactante se dieron a 180°C por 4 horas. En la Tabla 15 se muestra los resultados por triplicado del rendimiento del biosurfactante bajo las condiciones óptimas de extracción. El protocolo de extracción propuesto se muestra en la Figura 10.

Tabla 15. Rendimiento del proceso de extracción de biosurfactante crudo a partir de la levadura *Sacharomyces Cerevisae* bajo las condiciones óptimas de extracción.

Rendimiento del Proceso de Extracción de Biosurfactante			
Peso de levadura (g)	28.4	30	25
Peso obtenido de biosurfactante crudo (g)	19	21	16
Rendimiento (g/g)	0.67	0.70	0.64
Rendimiento Promedio	0.67		

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

El rendimiento en la extracción de biosurfactante fue de 0.67 g/g de biosurfactante por peso de levadura seca de *Sacharomyces Cerevisae* (levadura para panadería). Este rendimiento es mayor al que obtuvo Dikit *et al.*, (2010) debido a las diferentes fuentes de carbón utilizadas, de acuerdo a Amaral *et al.*, 2010.

El biosurfactante extraído, fue un biosurfactante crudo con una concentración promedio de 17500 ppm. Este biosurfactante fue utilizado en los ensayos de electroflotación.

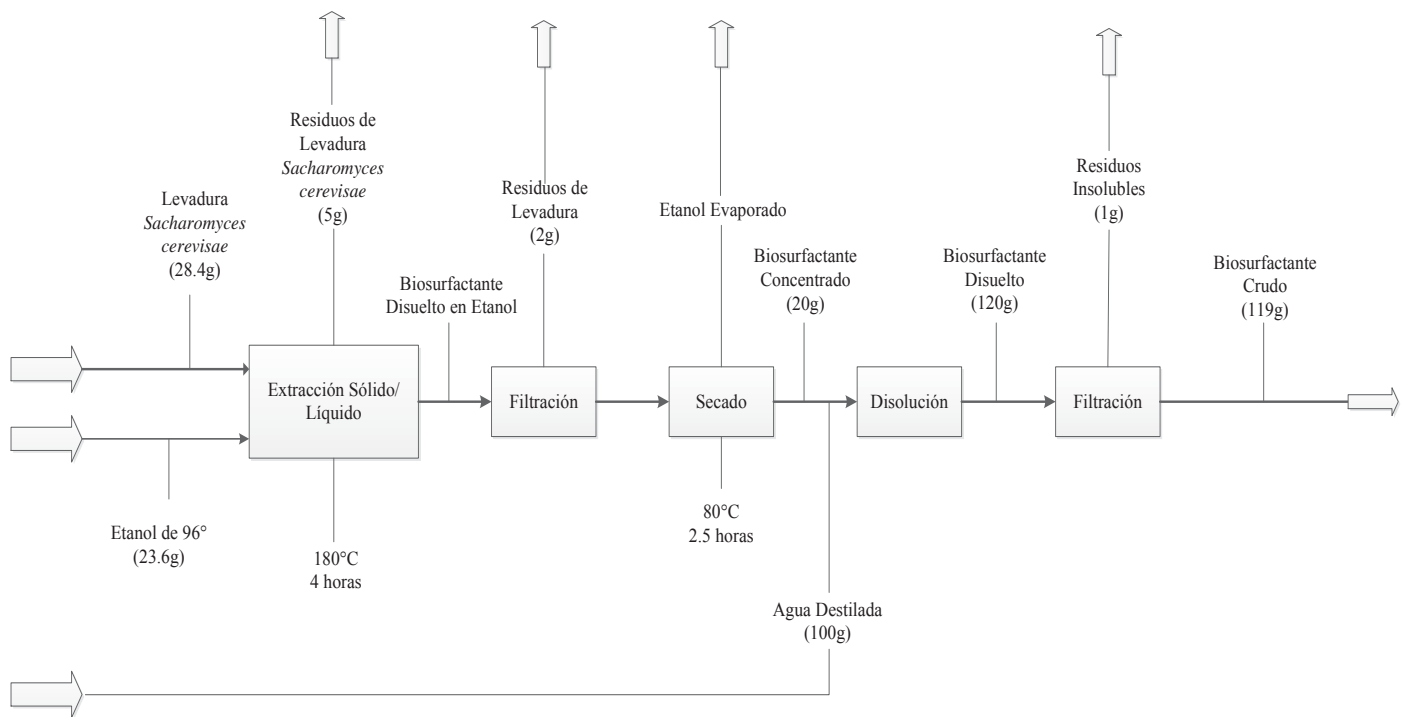


Figura 10. Diagrama de bloques del protocolo de extracción del biosurfactante de la levadura *Sacharomyces Cerevisiae*.
 Nota. Fuente Elaboración Propia.

4.3 CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS FUNCIONALES DEL BIOSURFACTANTE CRUDO

La Figura 11, muestra los grupos funcionales presentes en el biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces Cerevisae*. De la figura se observa el pico correspondiente a 3429.4 cm^{-1} que es un estiramiento de -OH característico de los grupos funcionales hidroxilo (intervalo de frecuencia: $3100\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$), que conforman estructuras de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos, lo que se confirma con el grupo hidroxilo unido a un átomo de carbono (C-OH) en el pico 1200 y 1400 cm^{-1} . El pico correspondiente a 1652.7 cm^{-1} corresponde a un doble enlace de carbono (C=C) indicando que en la parte hidrofóbica del biosurfactante existen insaturaciones. En la Tabla 16 se resumen los resultados.

Tabla 16. Grupos funcionales identificados por el espectro FTIR del biosurfactante crudo.

Frecuencia (cm^{-1})	Grupo funcional
3100-3500	-OH
2840-3000	C-H
1314	Grupos de carbohidratos
1200-1400	C-OH
1000-1300	C-O

Nota. Fuente: Elaboración Propia

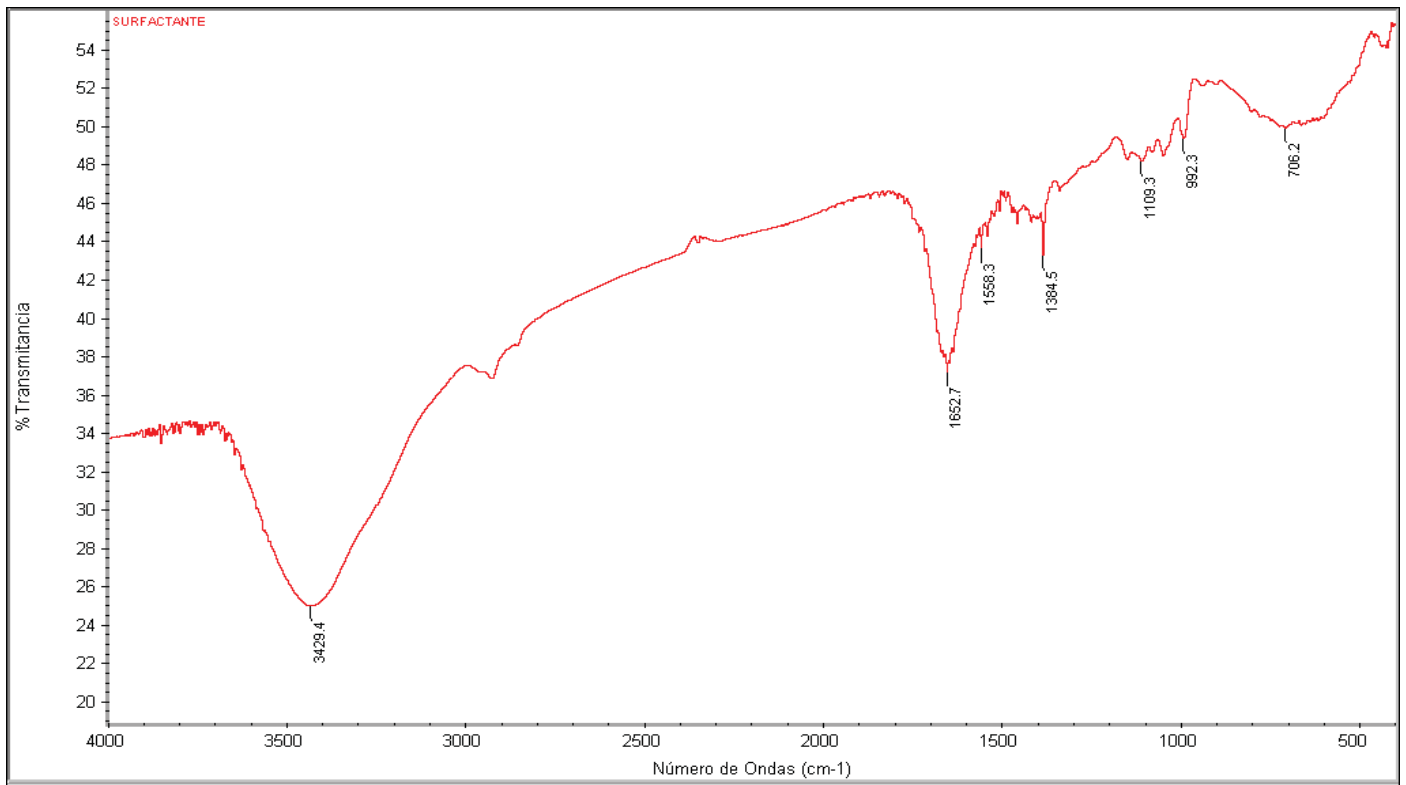


Figura 11. Espectro FTIR del biosurfactante crudo.
Nota. Fuente: Elaboración Propia

4.4 ENSAYOS DE ELECTROFLOTACIÓN

En las Tablas 17 y 18 se muestran los resultados del porcentaje de flotabilidad de la hematita.

Tabla 17. Porcentaje de flotabilidad de hematita bajo diferentes condiciones.

N° Prueba	Variables Independientes			Variable Dependiente
	Intensidad de Corriente	pH	Concentración de Biosurfactante, ppm	% Flotabilidad
1	1.00	7.00	0.00	0.00
2	1.00	7.00	20.00	48.25
3	1.00	7.00	40.00	60.35
4	1.00	7.00	60.00	75.05
5	1.00	7.00	80.00	71.31
6	1.00	7.00	100.00	62.24
7	1.00	5.00	0.00	0.00
8	1.00	5.00	20.00	73.54
9	1.00	5.00	40.00	77.74
10	1.00	5.00	60.00	84.21
11	1.00	5.00	80.00	72.95
12	1.00	5.00	100.00	63.71
13	1.00	3.00	0.00	0.00
14	1.00	3.00	20.00	73.87
15	1.00	3.00	40.00	83.12
16	1.00	3.00	60.00	86.52
17	1.00	3.00	80.00	81.31
18	1.00	3.00	100.00	78.03
19	2.00	7.00	0.00	0.00
20	2.00	7.00	20.00	66.65
21	2.00	7.00	40.00	80.26
22	2.00	7.00	60.00	83.75
23	2.00	7.00	80.00	74.84
24	2.00	7.00	100.00	69.34
25	2.00	5.00	0.00	0.00
26	2.00	5.00	20.00	80.76
27	2.00	5.00	40.00	83.16
28	2.00	5.00	60.00	85.77
29	2.00	5.00	80.00	78.62
30	2.00	5.00	100.00	67.36
31	2.00	3.00	0.00	0.00
32	2.00	3.00	20.00	78.96
33	2.00	3.00	40.00	80.93
34	2.00	3.00	60.00	88.24
35	2.00	3.00	80.00	85.47
36	2.00	3.00	100.00	79.84

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Tabla 18. Porcentaje de flotabilidad de hematita bajo diferentes condiciones.

N° Prueba	Variables Independientes			Variable Dependiente
	Intensidad de Corriente	pH	Concentración de Biosurfactante, ppm	% Flotabilidad
37	3.00	7.00	0.00	0.00
38	3.00	7.00	20.00	80.26
39	3.00	7.00	40.00	91.22
40	3.00	7.00	60.00	91.64
41	3.00	7.00	80.00	84.88
42	3.00	7.00	100.00	79.84
43	3.00	5.00	0.00	0.00
44	3.00	5.00	20.00	86.48
45	3.00	5.00	40.00	92.86
46	3.00	5.00	60.00	95.80
47	3.00	5.00	80.00	88.66
48	3.00	5.00	100.00	82.36
49	3.00	3.00	0.00	0.00
50	3.00	3.00	20.00	84.29
51	3.00	3.00	40.00	88.11
52	3.00	3.00	60.00	91.47
53	3.00	3.00	80.00	87.40
54	3.00	3.00	100.00	83.20

Haciendo un análisis de estos resultados en función de los pH estudiados resultan las Figuras 12-14. En estas figuras se observó que a cualquier valor de pH, un aumento en la intensidad de corriente favorece la flotabilidad de hematita. A 3 amperios de intensidad de corriente hay mayor flotabilidad de hematita que a 2 y 1 amperios. También, se observó que a pH entre 5 y 3 existe mayor flotabilidad de hematita que a pH 7. Por otro lado, a concentraciones de biosurfactante entre 20 ppm y 40ppm la flotabilidad de hematita es aproximadamente un 70 %, a 60ppm de concentración de biosurfactante a flotabilidad de hematita es máxima de aproximadamente un 96%, y a 80ppm y 100ppm de concentración de biosurfactante la flotabilidad de hematita disminuye.

Así mismo, cabe resaltar que cualitativamente se observa que la intensidad de corriente no afecta de manera significativa la flotabilidad de la hematita.

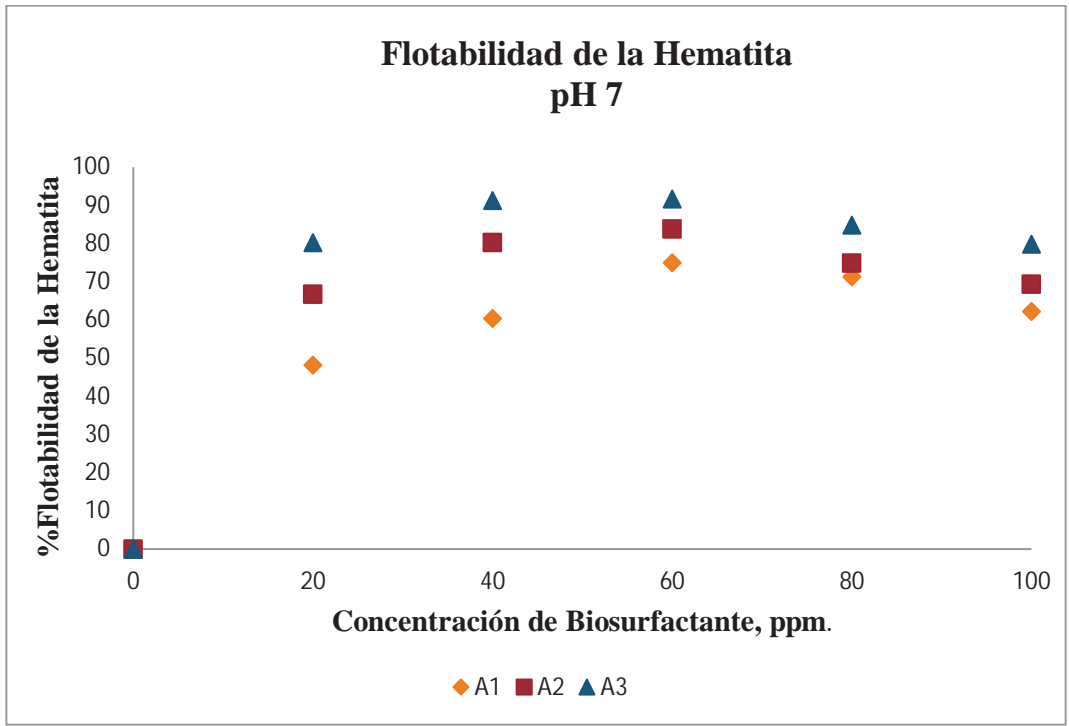


Figura 12. Flotabilidad de Hematita a pH 7.
 Nota. Fuente: Elaboración Propia.

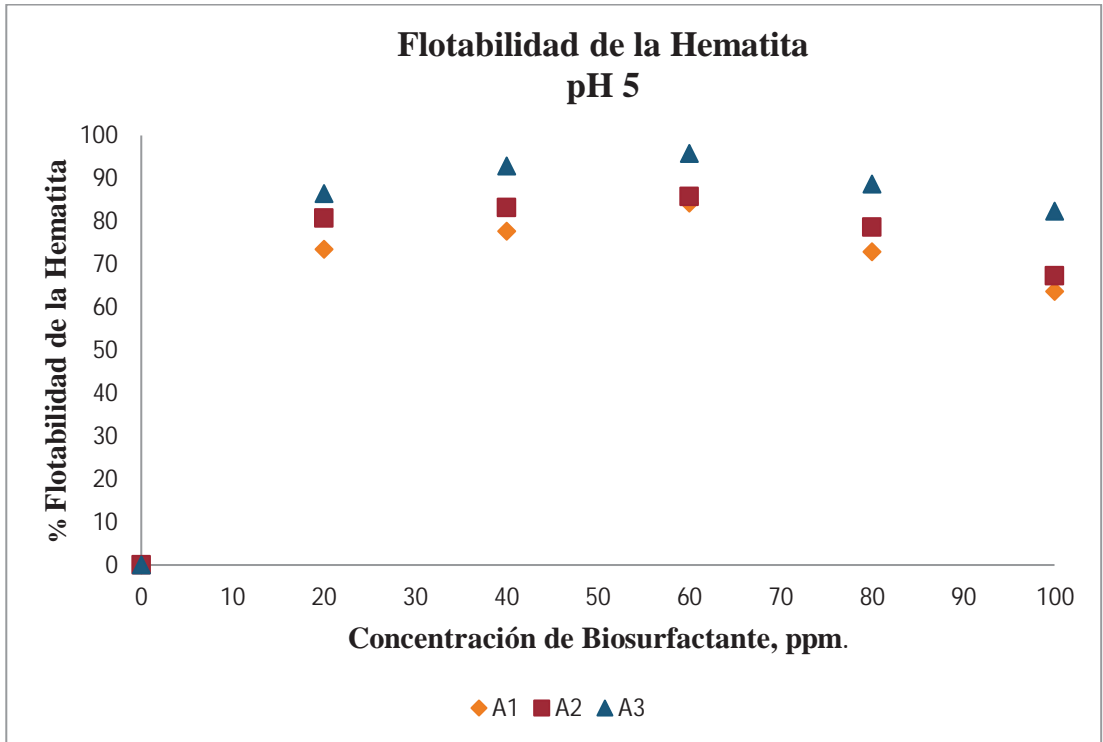


Figura 13. Flotabilidad de Hematita a pH 5.
 Nota. Fuente: Elaboración Propia.

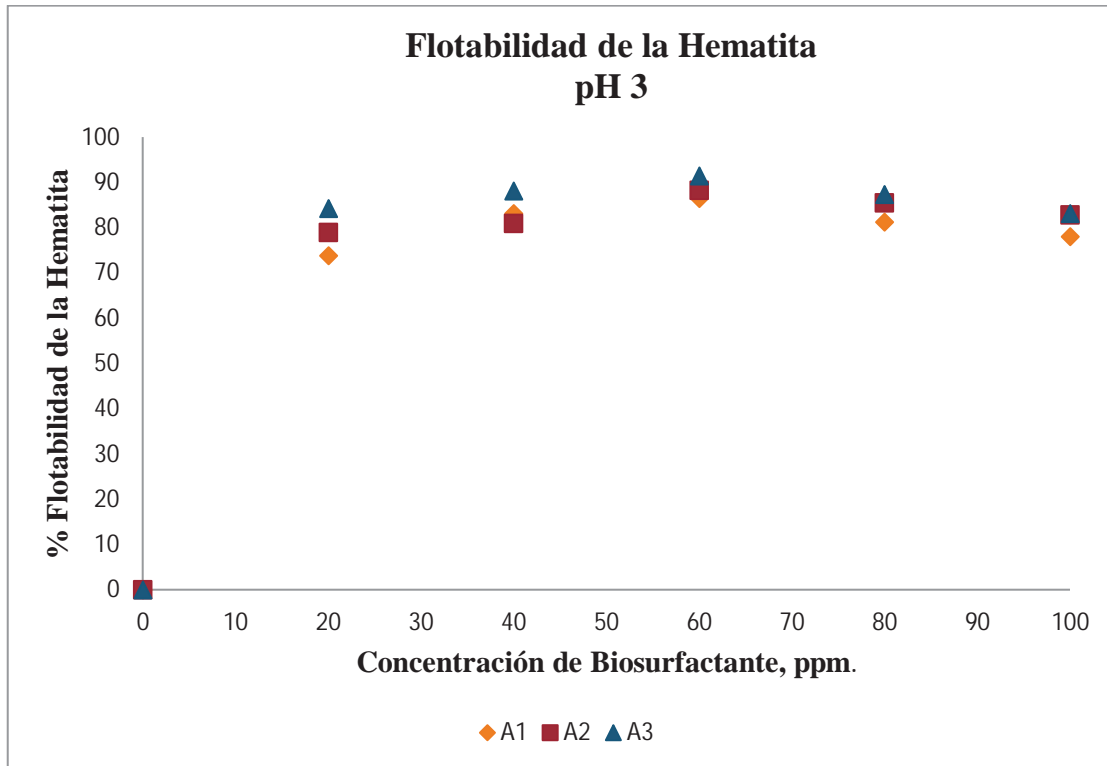


Figura 14. Flotabilidad de Hematita a pH 3.
 Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Lo más contrastante de los resultados con los trabajos citados es que la recuperación máxima de hematita se alcanzó a pH 5 a pH ácido; al igual que Yang et al., (2013), Soto (2016), Mesquita et al., (2003), López et al., (2015) y Hacha et al., (2016). En adición, la recuperación máxima de hematita fue de 95.80% en la presente investigación; mientras para Yang et al., (2013), Mesquita et al., (2003), López et al., (2015) y Hacha et al., (2016) la máxima recuperación de hematita fue de 90%. De acuerdo a los antecedentes, a pH ácido existe mayor atracción electrostática entre el mineral y el biosurfactante, lo cual favorece la electroflotación del mineral hematita.

Efecto de la intensidad de corriente en la electroflotación de hematita usando *Sacharomyces cerevisiae* como biosurfactante

La Tabla 19 muestra una correlación de la densidad de corriente con la intensidad de corriente.

Tabla 19. Correlación de la densidad de corriente con la Intensidad de Corriente

Área del cátodo (cm ²)	16.82412
Intensidad de corriente (Amperios)	Densidad de corriente (mA/cm ²)
1	59.44
2	118.88
3	178.32

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 15, 16 y 17 se muestran el efecto de la intensidad de corriente sobre la recuperación de hematita.

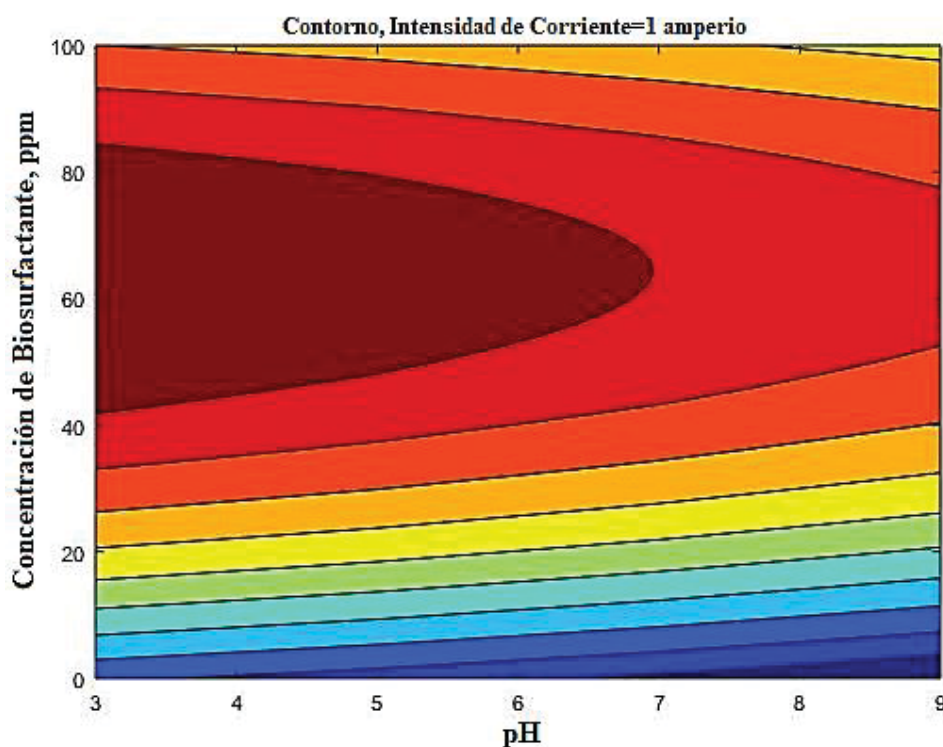


Figura 15. Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.

Nota. Intensidad de Corriente A=1 amperio. Fuente: Elaboración Propia.

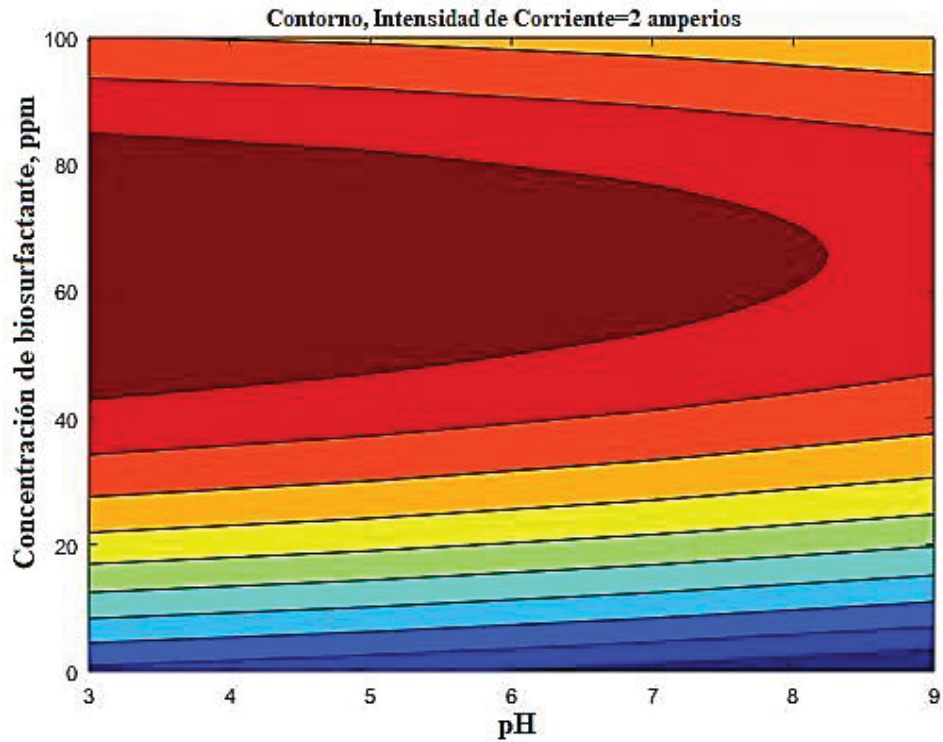


Figura 16. Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.
Nota. Intensidad de Corriente A=2 amperios. Fuente: Elaboración Propia.

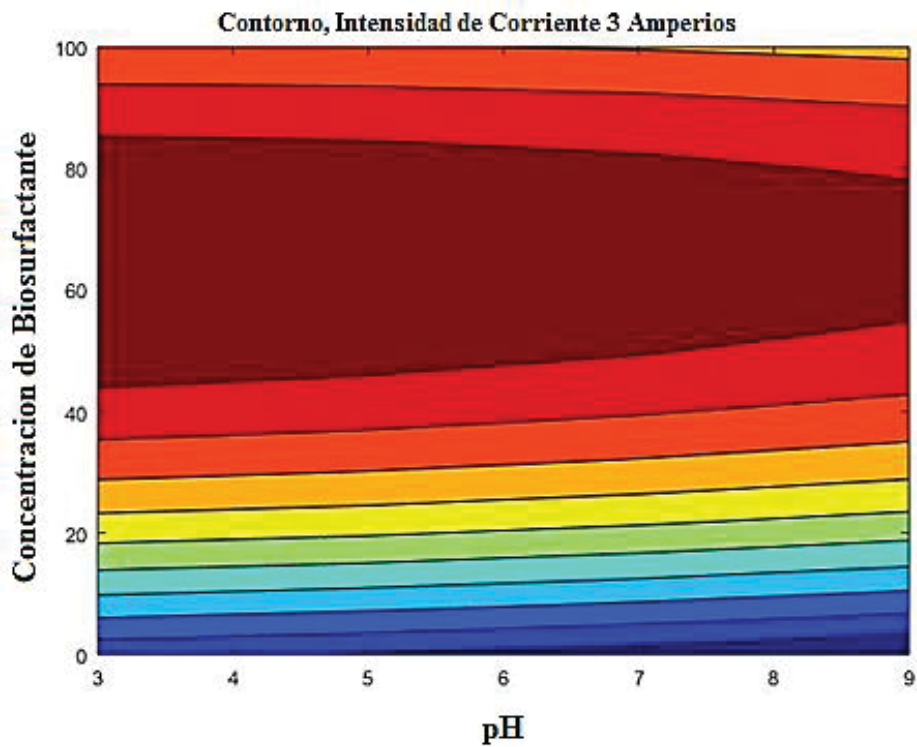


Figura 17. Efecto de la intensidad de corriente sobre la flotabilidad de hematita.
Nota. Intensidad de Corriente A=3 amperios. Fuente: Elaboración Propia.

Las Figuras 15, 16 y 17 muestran que, la parte de color rojo a rojo oscuro es la zona de mayor recuperación de hematita y la zona azul es la región en la que se obtiene menor recuperación de hematita. La Figura 15 muestra que a una densidad de corriente de 59.44 mA/cm^2 se alcanza aproximadamente una recuperación máxima de hematita de 80%, a pH ácido menor a 5, y concentración de biosurfactante entre 40 ppm y 70 ppm. La Figura 16 muestra que a densidad de corriente de 118.88 mA/cm^2 se alcanza una recuperación máxima de hematita de 80%, a pH ácido entre 3 y 6, y concentración de biosurfactante entre 50 ppm y 70 ppm. El porcentaje de flotabilidad de la hematita incrementa con el aumento de la densidad de corriente. La Figura 17 muestra que a una densidad de corriente de 178.32 mA/cm^2 se alcanza una flotabilidad de hematita máxima de 90%, aproximadamente, a pH entre 3.5 a 7, y concentración de biosurfactante entre 40 ppm y 70 ppm. Entonces, a mayor intensidad de corriente el porcentaje de flotabilidad de la hematita es mayor; esto se debe a que cuanto mayor es la intensidad de corriente, la tasa de nucleación aumenta y se producen burbujas más pequeñas y en mayor cantidad; tal como se explica en los trabajos de: Hacha et al., (2016), Rahmani et al., 2013, Ketkar et al., 1991; Jiménez et al., 2010; Sun et al., 2011 y Alam, 2015, Jones et al., 1999; Maris, 2006; Jo et al., 2014, Gupta & Ali, 2012; Sarkar et al., 2011.

Efecto del pH en la electroflotación de hematita usando *Sacharomyces cerevisiae* como biosurfactante

Las Figuras 18, 19, y 20 muestran la influencia del pH sobre la flotabilidad de hematita.

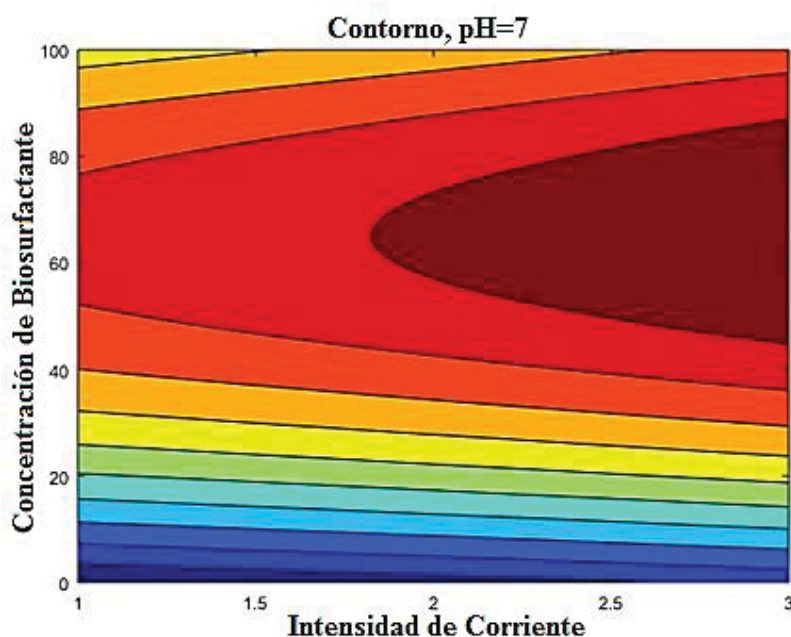


Figura 18. Flotabilidad de hematita a pH 7.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

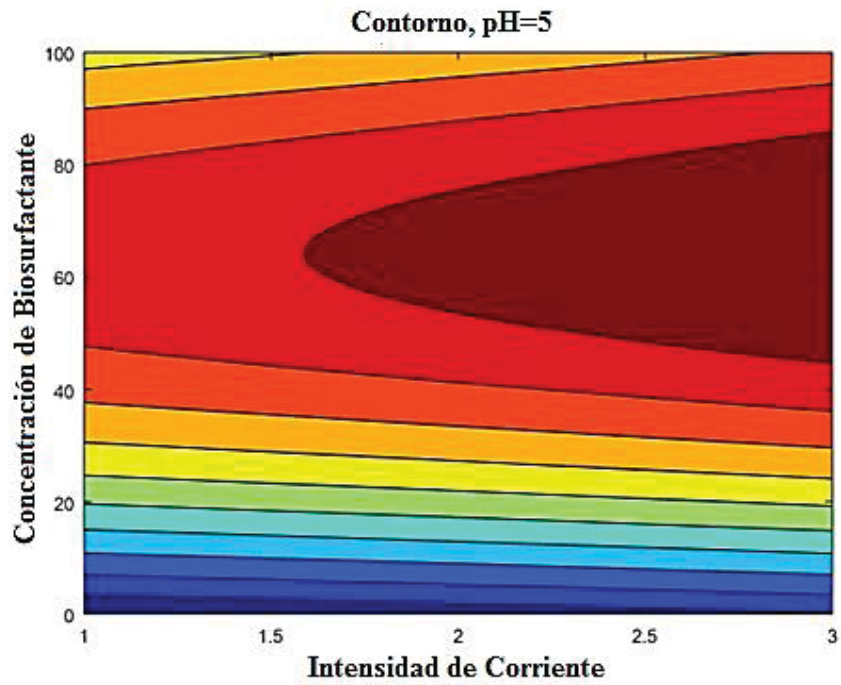


Figura 19. Flotabilidad de hematita a pH 5.
Nota. Fuente: Elaboración Propia.

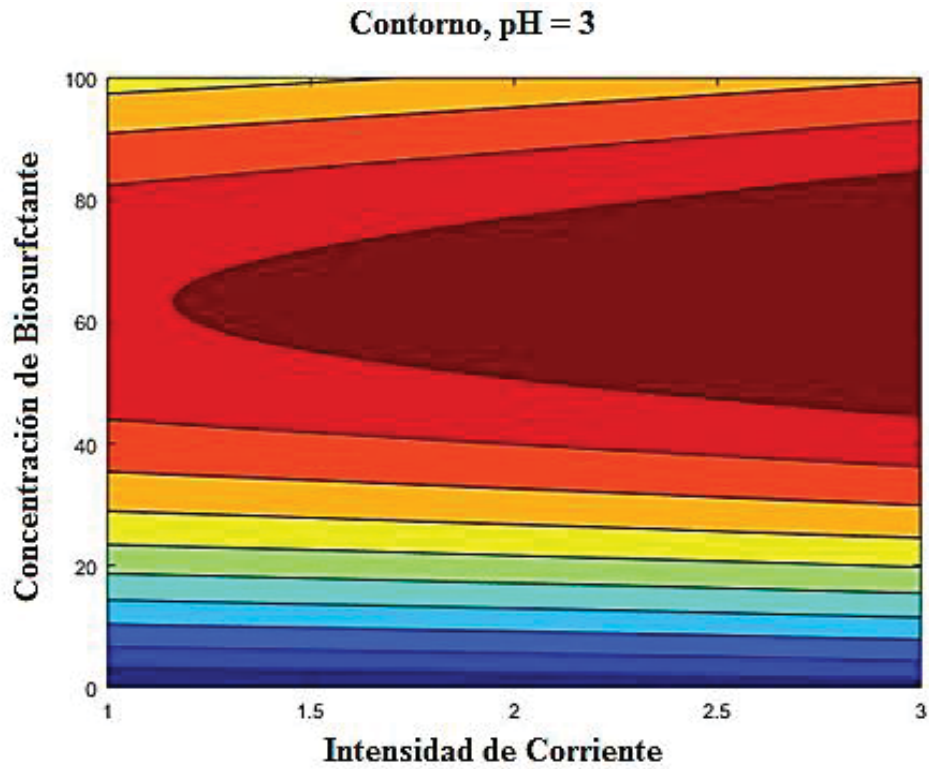


Figura 20. Flotabilidad de hematita a pH 3.
Nota. Fuente: Elaboración Propia.

En la Figura 18 se observa que existe una flotabilidad de hematita de aproximadamente 80% para pH 7 a una intensidad de corriente entre 2.5 y 3 amperios, para una concentración de biosurfactante entre 50ppm y 70ppm. En la Figura 19 se observa que existe una recuperación de hematita de aproximadamente 90% para pH 5 a una intensidad de corriente entre 1 y 3 amperios, para una concentración de biosurfactante entre 50ppm y 70ppm. En la Figura 20 se observa que existe una recuperación de hematita de aproximadamente 90% para pH 3 e intensidad de corriente entre 1 y 3 amperios, para una concentración de biosurfactante entre 60ppm y 70ppm.

De acuerdo a los resultados la mayor recuperación de hematita se alcanzó a pH 5, aproximadamente 96% de flotabilidad de hematita.

Comparando estos resultados con los de una flotación convencional utilizando surfactante sintéticos, se observa que los biosurfactantes tienen un comportamiento similar parecido al dodecil sulfato de sodio, el cual fue usado para flotar hematita obteniendo una flotabilidad de 95% a pH ácido. Sin embargo, esta no es una comparación precisa ya que las condiciones de trabajo no son iguales. Por otro lado, el biosurfactante adsorbido en la superficie del mineral hematita funciona como contra iones en la doble capa eléctrica. De acuerdo a Soto., 2016 la hematita tiene un punto isoeléctrico de 7.1, por lo tanto, a pH ácidos habrá mayor adhesión o atracción electrostática entre el mineral hematita y el biosurfactante de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*; resultando en una mayor flotabilidad de hematita. El mismo resultado se observó en los trabajos de Bueno et al., 2008 y Kim et al., 2015.

Efecto de la concentración de biosurfactante extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae* en la electroflotación de hematita.

El efecto de la concentración del biosurfactante en la electroflotación del mineral fino de hematita se presenta en las Figuras 21- 25.

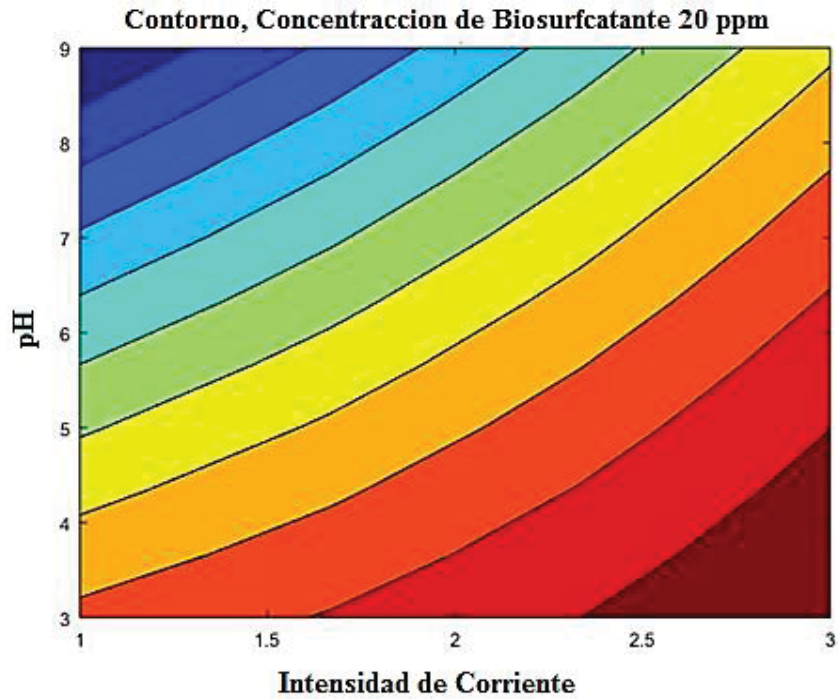


Figura 21. Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 20ppm.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

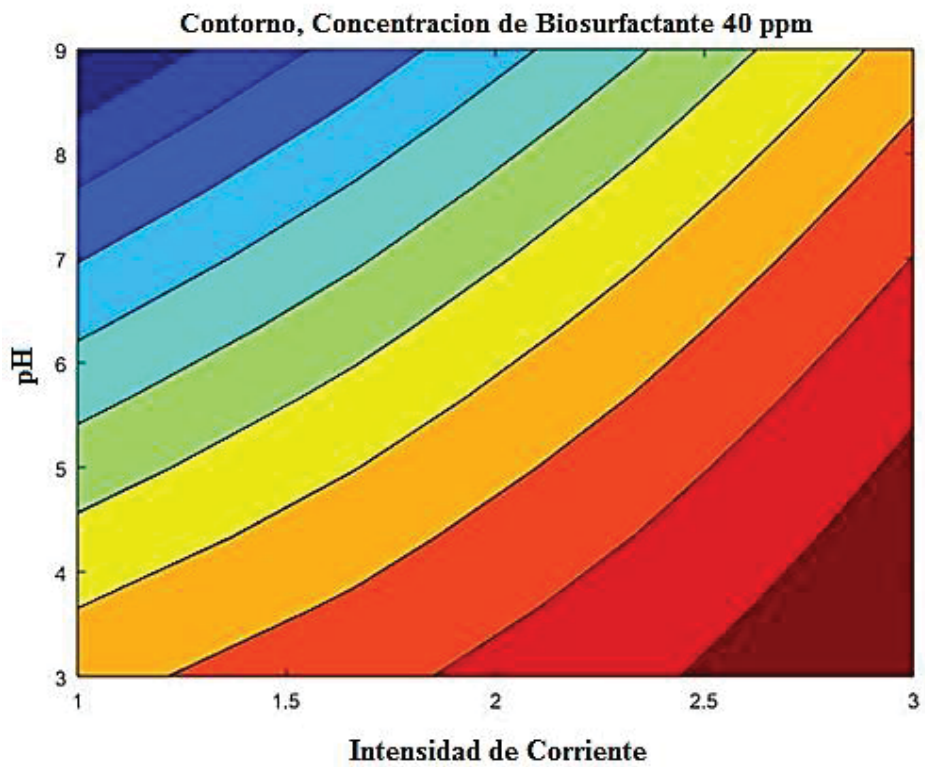


Figura 22. Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 40ppm.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

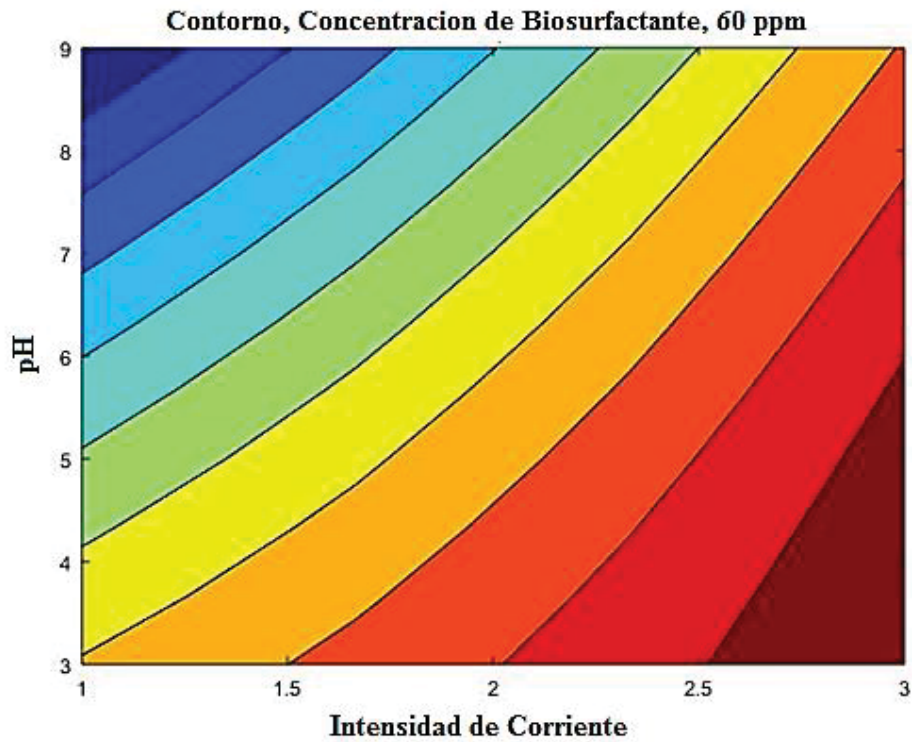


Figura 23. Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 60ppm.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

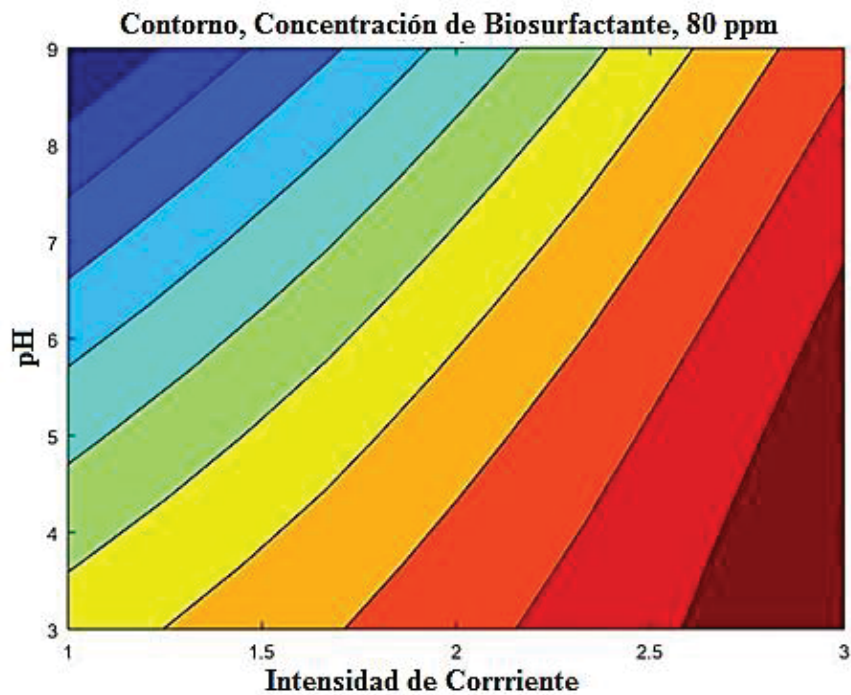


Figura 24. Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 80ppm.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

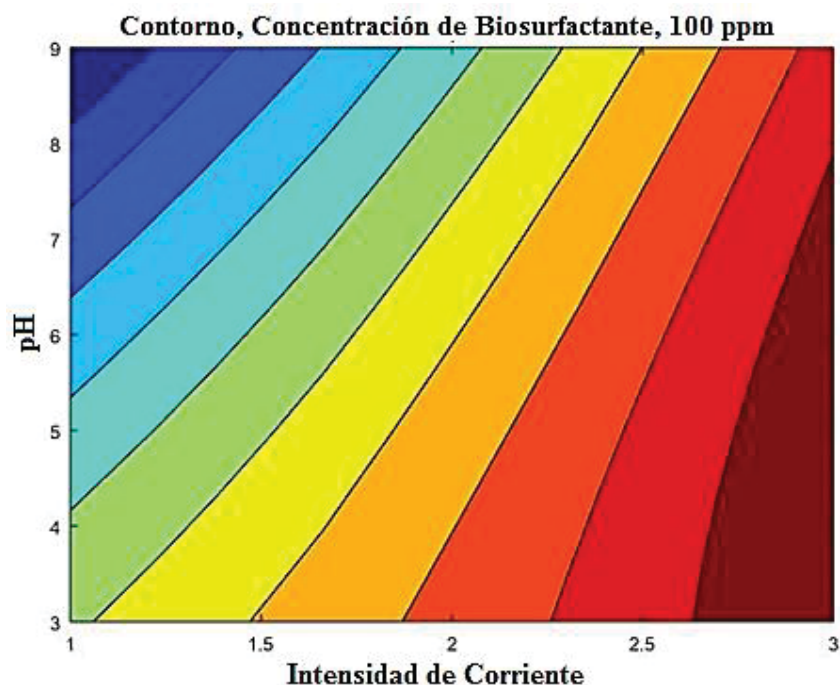


Figura 25. Efecto de la concentración de biosurfactante sobre la flotabilidad de hematita. Concentración de biosurfactante, 100ppm.
Nota. Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras del 21- 25, la máxima flotabilidad de hematita se obtiene en la región que va desde el color rojo hasta la región de rojo oscuro. La región azul representa la región donde la recuperación de hematita es mínima. Para la concentración de biosurfactante de 20ppm, la máxima flotabilidad de hematita alcanzada fue de 60% de acuerdo a la Figura 21, entre un rango de pH de 4-3 y densidad de corriente de 1 a 3 amperios.

En la Figura 22, la máxima flotabilidad de hematita alcanzada fue de 85%, a pH 3 e intensidad de corriente de 1.5-3 amperios. En esta figura se puede observar que existe mayor probabilidad de flotabilidad de hematita por debajo de un pH 6.

La Figura 23, muestra que la flotabilidad máxima de hematita con 60ppm de biosurfactante es aproximadamente cercana al 96% entre un rango de pH de 3.5-3 e intensidad de corriente de 1.5-3 amperios. De acuerdo a los resultados, se sabe que la mayor flotabilidad de hematita se alcanzó con 60 ppm de biosurfactante, por encima de 60 ppm de concentración de biosurfactante la flotabilidad de la hematita comienza a disminuir.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se observa que a concentraciones de 20ppm de biosurfactante la flotabilidad de hematita es de 40%, esto se debe a que la atracción partícula/biosurfactante no es muy fuerte. Sin embargo a 60ppm de biosurfactante el mineral con el biosurfactante forman micelas que hacen que la flotabilidad de hematita sea óptima. A

concentraciones de biosurfactante mayores a 70ppm, la flotabilidad disminuye debido a la formación de una tercera capa en el doble capa eléctrica que hace que exista atracción entre el mineral y la solución, desfavoreciendo al electroflotación del mineral hematita; de acuerdo a: Ekmekyapar et al., 2006, y Hacha et al., 2016.

4.4.1 MODELO DE PREDICCIÓN

Los resultados obtenidos se procesaron en un software de regresión trivariable en Matlab donde se analizaron, de acuerdo al criterio del valor – p, las interacciones entre la intensidad de corriente X_1 , pH X_2 , y concentración de biosurfactante X_3 , sobre la recuperación de hematita; y los comportamientos lineales y cuadráticos de esta experimentación.

La Tabla 20 muestra los coeficientes estimados del modelo estadístico, con su respectivo valor – p. De acuerdo al criterio del valor - p todos los términos mayores a 0.05 son descartados. Entonces, se obtiene que los términos X_1 , X_2^2 , X_1^2 , X_2X_3 , y X_1X_3 , no afectan significativamente la recuperación de hematita y pueden ser descartados del modelo.

Tabla 20. Coeficientes de la regresión polinómica.

Coeficientes	Estimado	Valor-p
<i>Intercepción</i>	20.7321	0.2650
X_1	-0.5955	0.9612
X_2	-2.761	1.85E-06
X_3	2.4374	1.17E-18
X_1^2	0.2098	0.9398
X_2^2	-0.1056	0.7471
X_3^2	-0.0198	1.58E-22
X_1X_2	0.7456	1.01E-03
X_1X_3	0.0287	0.5416
X_2X_3	0.0125	0.4668

Nota. Fuente: Elaboración Propia

El modelo ajustado tiene un coeficiente de determinación ajustado (R^2) de 87.98%, cuyos estimados y valor –p respectivos se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21. Coeficientes de la regresión polinómica ajustada.

Coefficientes	Estimado	Valor-p
<i>Intercepción</i>	20.0431	2.36E-05
X_2	-3.8947	1.85E-06
X_3	2.5699	3.03E-29
X_3^2	-0.0198	5.18E-24
X_1X_2	0.9913	1.17E-04

Nota. Fuente: Elaboración Propia

El modelo empírico se muestra en la Ecuación 4.1.

$$R = 20.04 - 3.89X_2 + 2.56X_3 - 0.02X_3^2 + 0.99X_1X_2 \quad (4.1)$$

El presente modelo polinómico con un coeficiente de determinación ajustado de 87.98%, confirma que es posible predecir la flotabilidad de la hematita a determinado pH (X_2), concentración de biosurfactante (X_3), e intensidad de corriente (X_1). Además, el modelo estadístico es cuadrático, para la electroflotación del mineral hematita usando un biosurfactante extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae* e incluye la variables más significativas. La variable concentración de biosurfactante está afectada de manera cuadrática, y la variable pH está afectada de manera lineal. También, es necesario resaltar que de acuerdo al modelo estadístico, la concentración de biosurfactante tiene un efecto significativo en la recuperación de hematita. Por otro lado, cuantitativamente se demuestra que la variable intensidad de corriente en combinación con el pH, tiene efecto mínimo sobre la electroflotación del mineral hematita.

En base a los resultados del trabajo de Makhija et al. (2014), se decidió aceptar en el presente trabajo el modelo estadístico cuadrático.

4.5 INTERACCIÓN DEL BIOSURFACTANTE CRUDO EN LAS PARTÍCULAS DE HEMATITA

En la Figura 26 los picos 550 a 400 cm^{-1} corresponde a la vibración de la banda de los óxidos de hierro (Haile et al., 2015).

La Figura 27 muestra la transmitancia del espectro FTIR de la hematita después de interactuar con el biosurfactante.

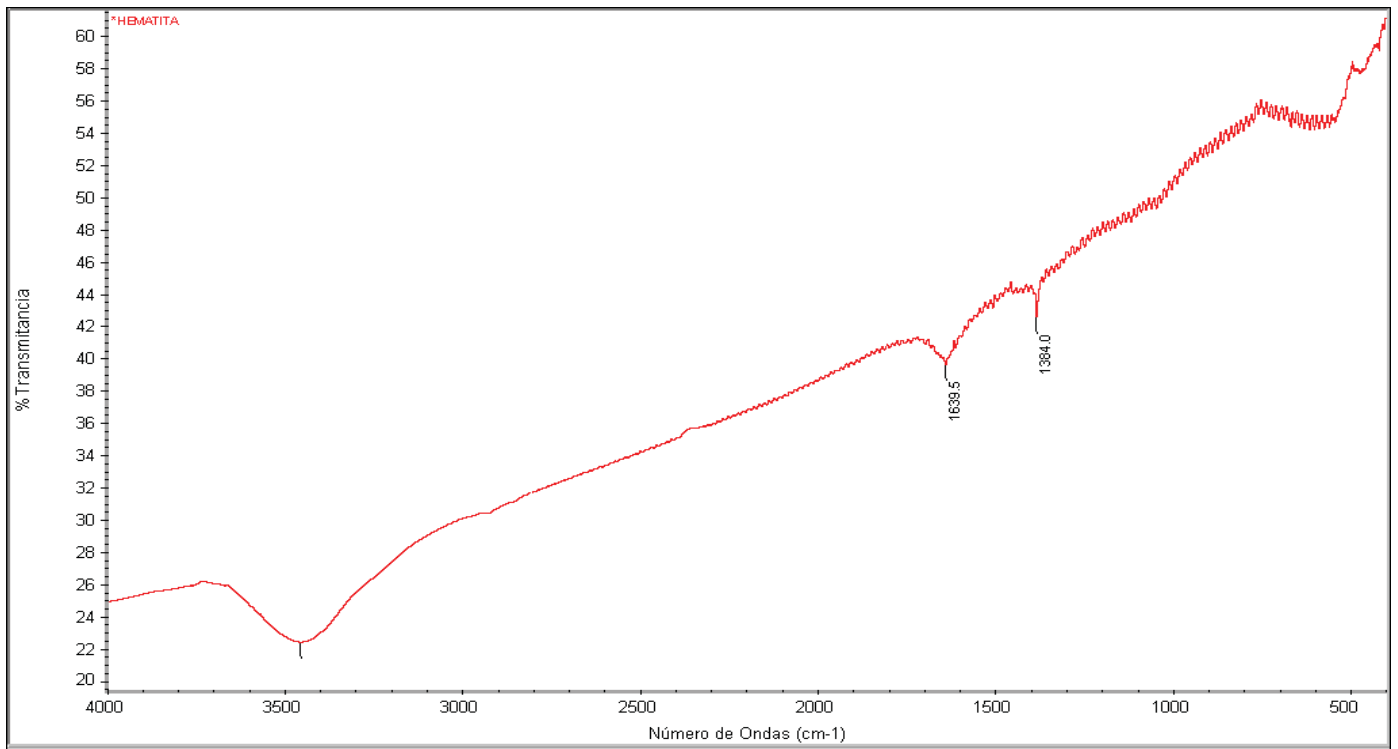


Figura 26. Espectro FTIR de la hematita.
Nota. Fuente: Elaboración Propia.

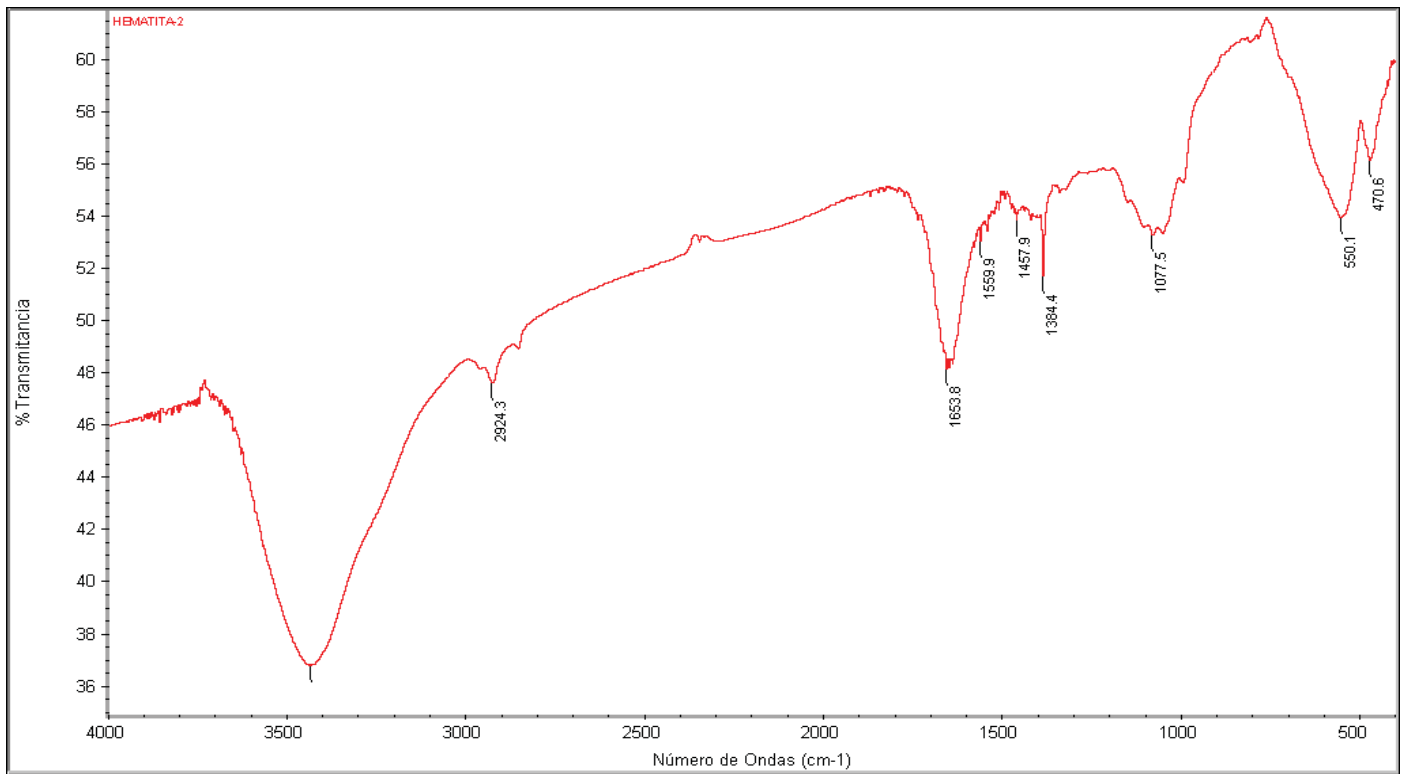


Figura 27. Espectro FTIR de la hematita después de interactuar con el biosurfactante.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 27 se observa que el pico que corresponde al alcohol primario (3450 cm^{-1}) se ha consumido, ello probablemente por la interacción entre el -OH y la hematita. Un grupo característico de los grupos carbohidratos son los presentes en el rango de frecuencia de 1200 a 1400 cm^{-1} . Se aprecia del espectro que hay un consumo de la señal que corresponde al grupo C-OH del biosurfactante (entre 1380 y 1400 cm^{-1}). En la zona de identificación se aprecia un consumo de grupos -OH (3450 cm^{-1}) y esto se corrobora en la zona de confirmación, donde hay consumo de las señales correspondientes a C-OH ($1380 - 1400\text{ cm}^{-1}$) debido a la interacción de los grupos hidroxilo presentes en el biosurfactante con la hematita durante la electroflotación del mineral.

Finalmente, en la Figura 28 se muestra la superposición de los espectros FTIR del biosurfactante crudo, de la hematita y de la hematita después de la interacción con el biosurfactante. En esta figura se observa que los picos de la hematita se mantienen constantes, 550 y 400cm^{-1} . De acuerdo al espectro FTIR de la interacción de la hematita con el biosurfactante se confirma que el pico que corresponde al alcohol primario (3450 cm^{-1}) se ha consumido, ello debido a la interacción entre el grupo -OH del biosurfactante y la hematita.

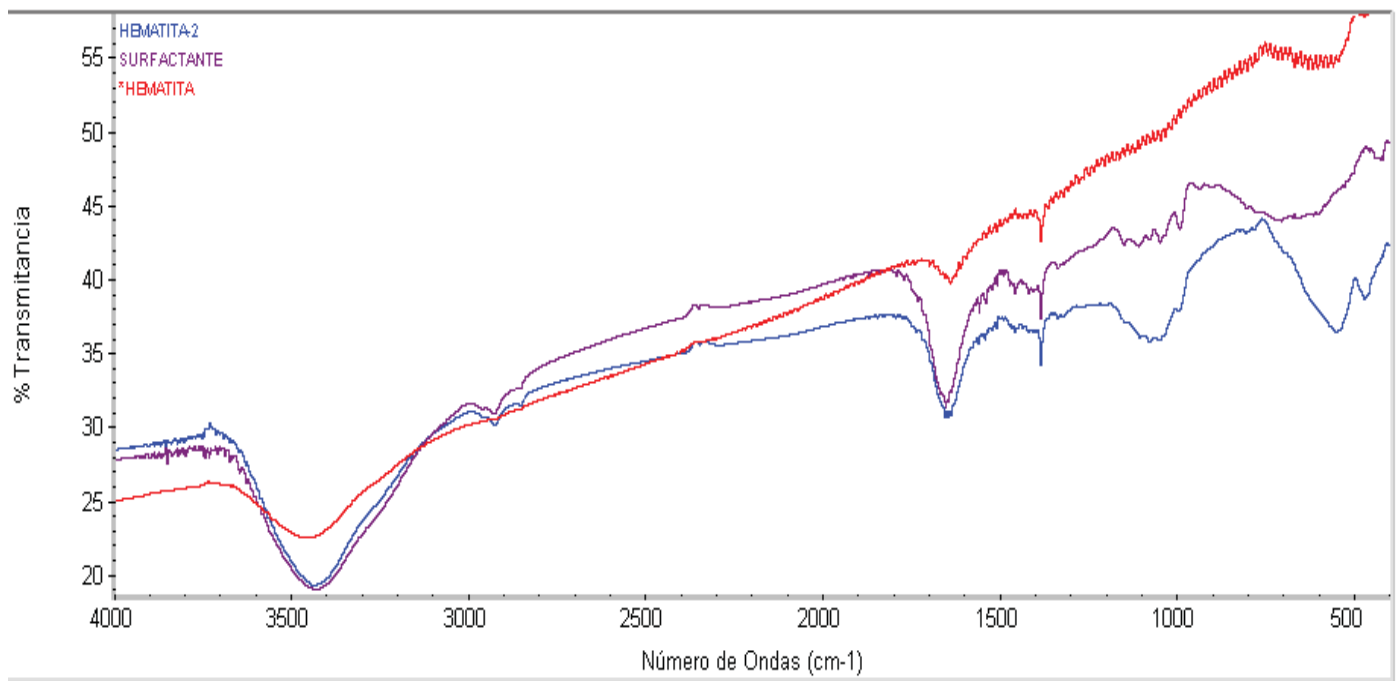


Figura 28. Superposición de los espectros FTIR del biosurfactante crudo, de la hematita y de la hematita después de la interacción con el biosurfactante.
Nota. Fuente: Elaboración Propia.

4.6 PARÁMETROS DE ELECTROFLOTACIÓN

Los valores de las variables que lograron el mayor porcentaje de electroflotación del mineral hematita se muestra en la Tabla 22. Estos constituyen los parámetros del proceso.

Tabla 22. Parámetros del Procesos.

Variable	Parámetro
Intensidad de Corriente	3 amperios
pH	5
Concentración de Biosurfactante	60 ppm

Nota. Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

1. La hematita se caracterizó mediante un análisis por fluorescencia de rayos X, obteniendo los siguientes resultados: 74.48% de hierro; 16.8% de elementos livianos, 4% de silicio, 2% de magnesio y 2% de aluminio.
2. El protocolo de extracción del biosurfactante crudo permite extraer sustancias hidrofóbicas de la célula. Estas sustancias al ser adsorbidas por el mineral actúan como contra iones, haciendo posible la flotación de hematita. El rendimiento del biosurfactante fue de 0.67g/g de biosurfactante por peso de levadura *Sacharomyces cerevisiae*.
3. El biosurfactante crudo se caracterizó mediante el análisis FTIR. Este análisis permitió identificar tres grupos funcionales principales en el biosurfactante. Un pico de 3429.4 cm^{-1} , el cual corresponde a las vibraciones del grupo de los hidroxilos –OH. Los picos entre 1200 y 1400 cm^{-1} corresponden a un grupo hidroxilo unido a un átomo de carbono (C-OH) y el pico de 1652.7 cm^{-1} corresponde a un doble enlace de carbono (C=C).
4. Los ensayos de electroflotación demostraron que el biosurfactante crudo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae* tiene la capacidad de flotar partículas finas de hematita. Los resultados obtenidos de los estos ensayos fueron ajustados a un modelo polinómico de 2^{do} orden para la concentración de biosurfactante, y de primer orden para la intensidad de corriente y pH; obteniendo un coeficiente de correlación ajustado de 87.98%. La recuperación máxima de hematita fue de 95.80% a pH 5, 60ppm de concentración de biosurfactante e intensidad de corriente de 3 amperios.
5. El biosurfactante crudo interactúa con la hematita a través de la adsorción de dos grupos funcionales en la superficie de la hematita. En los picos entre 1380 cm^{-1} y 1400 cm^{-1} hay un consumo de la señal que corresponde al grupo C-OH del biosurfactante y en el pico notable de 3450 cm^{-1} se aprecia el consumo de grupos –OH. En consecuencia, la electroflotación de hematita se debe a la adsorción de los grupos mencionados sobre la superficie del mineral.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar trabajos de investigación con otros minerales, como el cobre, el oro y la plata; aplicando la técnica de la electroflotación. Así mismo, el uso de otros biosurfactantes abrirá el camino en el área de la electroflotación para evaluar el comportamiento de otros biosurfactantes sobre la recuperación de minerales.
- Probar el biosurfactante crudo de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*, en una celda de flotación a gran escala para entender su comportamiento.
- Implementar en los procesos de flotación de las industrias mineras del Perú el uso del biosurfactante crudo extraído de la levadura *Sacharomyces cerevisiae*.

BIBLIOGRAFÍA

- Alam, R. (2015). Fundamentals of electro-flotation and electrophoresis and applications in oil sand tailings management.
- Amaral, P. F., Coelho, M. A. Z., Marrucho, I. M., & Coutinho, J. A. (2010). Biosurfactants from yeasts: characteristics, production and application. In *Biosurfactants* (pp. 236-249). Springer, New York, NY.
- Anonymous, (2003). Yeast from the east, *Mitsubishi Monitor*. 17 (4): <http://www.mitsubishi.or.jp/e/0308/NP.html#f>. Accessed Aug. 17. 2006.
- Araújo, A. C. D., & Peres, A. E. C. (1995). Froth flotation: relevant facts and brazilian case.
- Araujo, A. C., Amarante, S. C., Souza, C. C., & Silva, R. R. R. (2003). Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 112(1), 54-64.
- Arima K., Kakinuma A. y Tamura G. (1968). Surfactin, a crystalline peptidolipid surfactant produced by *Bacillus subtilis*: isolation, characterization and its inhibition of fibrin clot formation. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 31, 488–494.
- Arvidson, B. R., & Barnea, E. (1982, October). Recent Advances in Dry High-Intensity Permanent-Magnetic Separator Technology. In *XIVth International Mineral Processing Congress, Toronto, Canada*.
- Aurbach, D., Markovsky, B., Shechter, A., Ein Eli, Y., & Cohen, H. (1996). A comparative study of synthetic graphite and Li electrodes in electrolyte solutions based on ethylene carbonate-dimethyl carbonate mixtures. *Journal of The Electrochemical Society*, 143(12), 3809-3820.
- Avalos R, L., & Chale L, F. (2006). Adsorción de moléculas en superficies. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Materia Condensada, México.
- Bagotsky, V. S. (2006). Fundamentals of electrochemistry. Segunda Edición. P. 321-326.
- Banat, I. M., Makkar, R. S., & Cameotra, S. S. (2000). Potential commercial applications of microbial surfactants. *Applied microbiology and biotechnology*, 53(5), 495-508.
- Banat, I., Franzetti, A., Gandolfi, I., Besteti, G., & Martinotti, M. (2010). Microbial biosurfactants production, application and future potential.
- Banat, I., Makkar, R., & Cameotra, S. (2000). Potential commercial application of microbial surfactants.

- Bellido, E. (1974). Depósitos de hierro en el Perú.
- Benincasa, M. (2007). Rhamnolipid produced from agroindustrial wastes enhances hydrocarbon biodegradation in contaminated soil. *Current microbiology*, 54(6), 445-449.
- Bhaskar Raju, G., Prabhakar, S., & Khangaonkar, P. (1987). Separation of mineals by electroflotation. India, Madras. biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms. *Biochemical Engineering Journal*.
- Bockris, J., & Reddy, A. (1998). *Modrn electrochemistry 1* (2 ed., Vol. 1). New Your: Kluwer academic publishers.
- Bognolo, G. (1999). Biosurfactants as emulsifying agents for hydrocarbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 152(1-2), 41-52.
- Bohumil Volesky; Sorption and Biosorption; Primera edición; Editorial McGillUniversity; Montreal, Canadá, 2003; ISBN: 0-9732983-0-8; pp. 1, 3, 7, 10, 14-15,17, 29, 35-46, 48, 59-60, 72, 88-89, 91-93, 97-99, 103-106.
- Brown, M. J. (1991). Biosurfactants for cosmetic applications. *International journal of cosmetic science*, 13(2), 61-64.
- Bueno, B. Y. M., Torem, M. L., Molina, F. A. L. M. S., & De Mesquita, L. M. S. (2008). Biosorption of lead (II), chromium (III) and copper (II) by *R. opacus*: Equilibrium and kinetic studies. *Minerals engineering*, 21(1), 65-75.
- Cameotra, S. S., & Makkar, R. S. (2004). Recent applications of biosurfactants as biological and immunological molecules. *Current opinion in microbiology*, 7(3), 262-266.
- Cameron, D. R., Cooper, D. G., & Neufeld, R. J. (1988). The mannoprotein of *Saccharomyces cerevisiae* is an effective bioemulsifier. *Appl. Environ. Microbiol.*, 54(6), 1420-1425.
- Carro Pérez, M. E. (2009). *Remediación de aguas con arsénico mediante mecanismos de adsorción y floculación*. Universidad Nacional de Córdoba, 157.
- Castellaños-Estupiñana, M. A., Sánchez-Galvisa, E. M., García-Martínezb, J. B., Barajas-Ferreirab, C., Zuorroc, A., & Barajas-Solano, A. F. (2018). Design of an Electroflotation System for the Concentration and Harvesting of Freshwater Microalgae. *Chemical Engineering*, 64.
- Chen, G., Chen, X., & Yue, P. L. (2000). Electrocoagulation and electroflotation of restaurant wastewater. *Journal of environmental engineering*, 126(9), 858-863.

- Chen, W. C., Juang, R. S., & Wei, Y. H. (2015). Applications of a lipopeptide biosurfactant, surfactin, produced by microorganisms. *Biochemical engineering journal*, 103, 158-169.
- Chevalier, Y., & Zemb, T. (1990). The structure of micelles and microemulsions. *Reports on Progress in Physics*, 53(3), 279-371.
- Christova, N., & Stoineva, I. (2014). Trehalose biosurfactants. *Biosurfactants—recent trends and applications*. CRC, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 197-216.
- Cooper, D. G., & Goldenberg, B. G. (1987). Surface-active agents from two *Bacillus* species. *Applied and environmental microbiology*, 53(2), 224-229.
- Cruz, J. (2014). Superficies sólidas: adsorción y catálisis heterogénea. Universidad de Valencia, Química Física, España.
- Das, k., & Murkherjee, A. (2007). Differential utilization of pyrene as the sole source of carbon by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains. Role of biosurfactants in enhancing bioavailability. *Microbiol*, 195-203.
- Davis, D.A. et al. (2001) The application of foaming for recovery of surfactin from *B. subtilis* ATCC 21332. *Enzyme Microb. Technol.* 28, 346–354.
- Davis, T. A., Volesky, B., & Mucci, A. (2003). A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae. *Water research*, 37(18), 4311-4330.
- Davy, R. (1983). Part A. A contribution on the chemical composition of Precambrian iron-formations. In *Developments in Precambrian Geology* (Vol. 6, pp. 325-343). Elsevier.
- De Mesquita, L. M. S., Lins, F. F., & Torem, M. L. (2003). Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite–quartz flotation system. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1-4), 31-44.
- Desai, J.D., Banat, I.M., 1997. Microbial production of surfactants and their comercial potential. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 61, 47-64.
- Dhanarajan, G., Sen, R. (2014). Amphiphilic molecules of microbial origin. In *Biosurfactants Research Trends and Applications*, 31-38, CRC Press, Boca Raton, 175–180.
- Didyk, A. M., & Sadowski, Z. (2012). Flotation of serpentinite and quartz using biosurfactants. *Physicochem Probl Miner Process*, 48(2), 607-618.
- Dikit, P., Maneerat, S., Musikasang, H., & H-kittikun, A. (2010). Emulsifier properties of the mannoprotein extract from yeast isolated from sugar palm wine. *Science Asia*, 36, 312-318.

- Dimas, G. (2011). Estudio de la interacción de metales pesados (Pb, Cd, Zn y Cr) en solución, en el proceso de biosorción por tres tipos de biomasa. Universidad Autónoma de Nuevo León, facultad de Ciencias Químicas.
- Drew, M. (1990). *Surfaces, Interfaces and Colloids*. New York: Wiley-veh.
- Driss, A. (2010). Aprovechamiento de huesos de aceituna, biosorción de iones metálicos. Universidad de Granada.
- Dubeau, D., Déziel, E., Woods, D. E., & Lépine, F. (2009). Burkholderia thailandensis harbors two identical rhl gene clusters responsible for the biosynthesis of rhamnolipids. *BMC microbiology*, 9(1), 263.
- Dubel, J., Smith, R. W., Misra, M., & Chen, S. (1992). Microorganisms as chemical reagents: the hematite system. *Minerals Engineering*, 5(3-5), 547-556.
- Dubey, K.V. et al. (2005) Adsorption–desorption process using woodbased activated carbon for recovery of biosurfactant from fermented distillery wastewater. *Biotechnol. Prog.* 21, 860–867.
- Dwyer, R., Bruckard, W. J., Rea, S., & Holmes, R. J. (2012). Bioflotation and bioflocculation review: microorganisms relevant for mineral beneficiation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 121(2), 65-71.
- Ebadi, A., Mohammadzadeh, J. S. S., & Khudiev, A. (2009). What is the correct form of BET isotherm for modeling liquid phase adsorption? *Adsorption*, 15(1), 65-73.
- Ekmekyapar, F., Aslan, A., Bayhan, Y. K., & Cakici, A. (2006). Biosorption of copper (II) by nonliving lichen biomass of *Cladonia rangiformis* hoffm. *Journal of Hazardous Materials*, 137(1), 293-298.
- El-Midany, A. A., & Abdel-Khalek, M. A. (2014). Reducing sulfur and ash from coal using *Bacillus subtilis* and *Paenibacillus polymyxa*. *Fuel*, 115, 589-595.
- Erikson, R. (1976). Industrial applications of the bacilli: A review and prospectus. *Microbiology American Society for Microbiology*, 406-419.
- Fakruddin, M.D. 2012. Biosurfactant: Production and Application. *Pet Environ Biotechnol.*
- Falagas, M. E., & Makris, G. C. (2009). Probiotic bacteria and biosurfactants for nosocomial infection control: a hypothesis. *Journal of Hospital Infection*, 71(4), 301-306.
- Farrokhpay, S. (2011). The significance of froth stability in mineral flotation—A review. *Advances in colloid and interface science*, 166(1-2), 1-7.
- Finch, J. A., & Smith, G. W. (1979). Contact-angle and wetting. *Minerals Science and Engineering*, 11(1), 36-63.

- Finnerty, W. R. (1994). Biosurfactants in environmental biotechnology. *Current Opinion in Biotechnology*, 5(3), 291-295.
- Fuerstenau, D. W. (2005). Zeta potentials in the flotation of oxide and silicate minerals. *Advances in colloid and interface science*, 114, 9-26.
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2002). Metal-surfactant precipitation and adsorption in froth flotation. *Journal of colloid and interface science*, 256(1), 175-182.
- Fuerstenau, M. C., & Somasundaran, P. (2003). Flotation *Principles of Mineral Processing*. SME, Littleton, CO, p. 245-306.
- Gonzales, L. G. V., Pino, G. A. H., & Torem, M. L. (2013). Electroflotation of casiterite fines using a hydrophobic bacterium strain. *Rem: Revista Escolar de Minas*, 66(4), 507-512.
- Gonzales, L. G. V., Pino, G. A. H., & Torem, M. L. (2013). Electroflotation of cassiterite fines using a hydrophobic bacterium strain. *Rem: Revista Escola de Minas*, 66(4), 507-512.
- Gordon, R., & Seely, B. E. (1998). American Iron, 1607-1900. *Technology and Culture*, 39(2), 301-302.
- Grangemard, I., Wallach, J., Maget-Dana, R., & Peypoux, F. (2001). Lichenysin. *Applied biochemistry and biotechnology*, 90(3), 199-210.
- Gregg, S. J., Sing, K. S. W., & Salzberg, H. W. (1967). Adsorption surface area and porosity. *Journal of The Electrochemical Society*, 114(11), 279C-279C.
- Gupta, V. K., & Ali, I. (2012). *Environmental water: advances in treatment, remediation and recycling*. Newnes.
- Hacha, R. R., Leonardo Torem, M., Merma, A. G., & da Silva Coelho, V. F. (2016). Electroflotation of fine hematite particles with *Rhodococcus opacus* as a biocollector in a modified Partridge-Smith cell. *Minerals Engineering*, 126, 105-115.
- Haferburg, D., Hommel, R., Kleber, H. P., Kluge, S., Schuster, G., & Zschiegner, H. J. (1987). Antiphytovirale aktivität von rhamnolipid aus *Pseudomonas aeruginosa*. *Acta biotechnologica*, 7(4), 353-356.
- Haile, L. H., Abi, T., & Kebede, T. (2015). Synthesis, characterization and photocatalytic activity of MnO₂/Al₂O₃/Fe₂O₃ nanocomposite for degradation of malachite green. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 9(11), 211-222.
- Harvey, P. A., Nguyen, A. V., Jameson, G. J., & Evans, G. M. (2005). Influence of sodium dodecyl sulphate and Dowfroth frothers on froth stability. *Minerals engineering*, 18(3), 311-315.

- Herbst, J. A., Lo, Y. C., & Flintoff, B. (2003). Size reduction and liberation. *Principles of mineral processing*, 61-118.
- Hoar, T. P., & Schulman, J. H. (1943). Transparent water-in-oil dispersions: the oleopathic hydro-micelle. *Nature*, 152(3847), 102-103.
- Huang, L. Z., Zeng, G. M., Huang, D. L., Li, L. F., Du, C. Y., & Zhang, L. (2010). Biosorption of cadmium (II) from aqueous solution onto *Hydrilla verticillata*. *Environmental Earth Sciences*, 60(8), 1683-1691.
- Huang, L. Z., Zeng, G. M., Huang, D. L., Li, L. F., Huang, P. M., & Xia, C. B. (2009). Adsorption of lead (II) from aqueous solution onto *Hydrilla verticillata*. *Biodegradation*, 20(5), 651-660.
- Hunter, R. J. (1981). *Zeta potential in colloid science: principles and applications* (Vol. 1). Academic press.
- Hunter, T. N., Pugh, R. J., Franks, G. V., & Jameson, G. J. (2008). The role of particles in stabilising foams and emulsions. *Advances in colloid and interface science*, 137(2), 57-81.
- İrdemez, Ş., Yildiz, Y. Ş., & Tosunoğlu, V. (2006). Optimization of phosphate removal from wastewater by electrocoagulation with aluminum plate electrodes. *Separation and purification Technology*, 52(2), 394-401. Colombia.
- Izquierdo, J. F., Cunill, F., Tejero, J., Iborra, M., & Fite, C. (2004). Cinética de las Reacciones Químicas. Universidad de Barcelona, España.
- James, H. L. (1954). Sedimentary facies of iron-formation. *Economic Geology*, 49(3), 235-293.
- Jianlong, W. (2002). Biosorption of copper (II) by chemically modified biomass of *Saccharomyces cerevisiae*. *Process Biochemistry*, 37(8), 847-850.
- Jiménez Islas, D., Medina Moreno, S. A., & Gracida Rodríguez, J. N. (2010). Propiedades, aplicaciones y producción de biotensioactivos: una revisión. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 26(1), 65-84.
- Jiménez, C., Sáez, C., Cañizares, P., & Rodrigo, M. A. (2016). Optimization of a combined electrocoagulation-electroflotation reactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(10), 9700-9711.
- Jimenez, C., Talavera, B., Saez, C., Cañizares, P., & Rodrigo, M. A. (2010). Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(10), 1368-1373.

- Jo, H., Kaviany, M., Kim, S. H., & Kim, M. H. (2014). Heterogeneous bubble nucleation on ideally-smooth horizontal heated surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 149-157.
- Jones, S. F., Evans, G. M., & Galvin, K. P. (1999). Bubble nucleation from gas cavities—a review. *Advances in colloid and interface science*, 80(1), 27-50.
- Kanga, S. A., Bonner, J. S., Page, C. A., Mills, M. A., & Autenrieth, R. L. (1997). Solubilization of naphthalene and methyl-substituted naphthalenes from crude oil using biosurfactants. *Environmental science & technology*, 31(2), 556-561.
- Katz, J. (2011). *Materiales y materias primas. Minerales de Hierro*, 9-25.
- Ketkar, D. R., Mallikarjunan, R., & Venkatachalam, S. (1991). Electroflotation of quartz fines. *International Journal of Mineral Processing*, 31(1-2), 127-138.
- Kim, G., Park, K., Choi, J., Gomez-Flores, A., Han, Y., Choi, S. Q., & Kim, H. (2015). Bioflotation of malachite using different growth phases of *Rhodococcus opacus*: Effect of bacterial shape on detachment by shear flow. *International Journal of Mineral Processing*, 143, 98-104.
- Kim, P. I., Bai, H., Bai, D., Chae, H., Chung, S., Kim, Y., & Chi, Y. T. (2004). Purification and characterization of a lipopeptide produced by *Bacillus thuringiensis* CMB26. *Journal of applied microbiology*, 97(5), 942-949.
- King, R. P. (2012). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier.
- Kitamoto, D., Isoda, H., Nakahara, T. (2002). Functions and potential application of glycolip biosurfactants from energy saving materials. *Oleosience* 1:17-31.
- Kolahdoozan, M., Tabatabaei, Y.S.M., Yen, W.T., Hosseini, T.R., Shahverdi, A.R., Oliazadeh, M., Noaparast, M., Eslami, A., and Manafi, Z., 2004, “Bioflotation of low grade Sarcheshmeh copper sulfide.” *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 57, pp. 485–490.
- Kosaric, N. (2001). Biosurfactants and their applications for soil bioremediation. *Food Technol Biotech.* 39,295-304.
- Kuyukina, M.S. et al. (2001) Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl tertiary-butyl ether extraction. *J. Microbiol. Meth.* 46, 149–156.
- Kuyumcu, H. Z., Bielig, T., Vilinska, A., & Rao, K. H. (2009). Biocoagulation and its application potentials for mineral bioprocessing. *Open Mineral Processing Journal*, 2, 1-11.
- Kyzas, G. Z., & Matis, K. A. (2016). Electroflotation process: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 220, 657-664.

- Landolt, D., Acosta, R., Muller, R. H., & Tobias, C. W. (1970). An Optical Study of Cathodic Hydrogen Evolution in High- Rate Electrolysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 117(6), 839-845.
- Laskowski, J. (1986). The relationship between floatability and hydrophobicity. In *Advances in mineral processing: A half century of progress in application of theory and practice*.
- Lazo, J. F., Navarro, A. E., Sun-Kou, M. R., & Llanos, B. P. (2008). Síntesis y caracterización de arcillas organofílicas y su aplicación como adsorbentes del fenol. Peru.
- Lins, F. A. F. (2010). Concentração gravítica. CETEM/MCT.
- Lipke, P & Ovalle, R. (1998). MINIREVIEW Cell Wall Architecture in Yeast: New Structure and New Challenges; *Journal of Bacteriology*, 180: 3735-3740.
- Lopez, L. Y., Merma, A. G., Torem, M. L., & Pino, G. H. (2015). Fundamental aspects of hematite flotation using the bacterial strain *Rhodococcus ruber* as bioreagent. *Minerals Engineering*, 75, 63-69.
- Lozano-Rivas, W. A. (2012). Fundamentos de diseño de plantas depuradoras de aguas residuales. *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (pág. 49)*. Bogotá-Colombia.
- Lubetkin, S. D. (1994). *Bubble nucleation and growth* (pp. 159-190). Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford.
- Lumanauw, D. (2000). Hydrogen bubble characterization in alkaline water electrolysis. *Mster Thesis. University of Toronto*.
- Ma, M. Iron Ore Flotation. Copyright ©. All rights Reserved, 2012.
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2004). *Biología de los microorganismos*. Décima edición; Pearson Education; Montreal, Madrid, ISBN: pp. 84-205.
- Makhija, D., Patra, A. S., & Mukherjee, A. K. (2014). Statistical Analysis of the Role of Flotation Frother and Its Optimization for Selective Recovery of Iron Minerals. *Journal of Ore Dressing*, 16(31).
- Makkar, R. S., Cameotra, S. S., & Banat, I. M. (2011). Advances in utilization of renewable substrates for biosurfactant production. *AMB express*, 1(1), 5.
- Makkar, R., & Cameotra, S. (2002). An update on the use of unconventional substrates for biosurfactant production and their new applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 58(4), 428-434.

- Mansour, L. Ben; Kesentini, I. Treatment of effluents from cardboard industry by coagulation–electroflotation. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, vol. 153, no 3, p. 1067-1070.
- Maris, H. J. (2006). Introduction to the physics of nucleation. *Comptes Rendus Physique*, 7(9-10), 946-958.
- Marsden, R.W. (1982). Iron-bearing rocks of the Precambrian and their mining development. In: *The Development Potential of Precambrian Mineral Deposits*, p 75-89.
- Martínez Aguilar, M. (2014). Obtención de un biosurfactante para el recobro mejorado de petróleo (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).
- Masterton, W. L., & Hurley, C. N. (2015). *Chemistry: principles and reactions*. Cengage Learning.
- Matis, K. A., & Mavros, P. (1991). Foam/froth flotation. *Separation and Purification Methods*, 20(2), 163-198.
- Matis, K. A., & Zouboulis, A. I. (1995). Electrolytic flotation: an unconventional technique. *Flotation Science and Engineering*, 385-413.
- Merma, A. G., Torem, M. L., Morán, J. J., & Monte, M. B. (2013). On the fundamental aspects of apatite and quartz flotation using a Gram positive strain as a bioreagent. *Minerals Engineering*, 48, 61-67.
- Mesquita, L. M. S., Lins, F. F., & Torem, M. L. (2003). Interaction of a hydrophobic bacterium strain in a hematite–quartz flotation system. *International Journal of Mineral Processing*, 71(1-4), 31-44.
- Miettinen, T. (2007). Flotacion de Particulas Finas. Australia.
- Mohan, P. K., Nakhla, G., & Yanful, E. K. (2006). Biokinetics of biodegradation of surfactants under aerobic, anoxic and anaerobic conditions. *Water Research*, 40(3), 533-540.
- Mousalli-Kayat, G. (2015). Métodos y diseños de investigación cuantitativa. Revista researchgate. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/303895876_Metodos_y_Disenos_de_Investigacion_Cuantitativa.
- Mukherjee, S., Das, P., & Sen, R. (2006). Towards commercial production of microbial surfactants. *TRENDS in Biotechnology*, 24(11), 509-515.
- Müller, M. M., Kügler, J. H., Henkel, M., Gerlitzki, M., Hörmann, B., Pöhnlein, M., & Hausmann, R. (2012). Rhamnolipids—next generation surfactants?. *Journal of biotechnology*, 162(4), 366-380.

- Mulligan, C. N. (2005). Environmental applications for biosurfactants. *Environmental pollution*, 133(2), 183-198.
- Mulligan, C. N., & Sharma, S. K. (2014). *Biosurfactants: Research Trends and Applications*. New York.
- Muthusamy, K., Gopalakrishnan, S., Ravi, T. K., & Sivachidambaram, P. (2008). Biosurfactants: properties, commercial production and application. *Current science*, 736-747.
- Myers, C. Y., & Read, R. B. (1991). U.S. Patent No. 5,022,983. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Neagu, C., Jansen, H., Gardeniers, H., & Elwenspoek, M. (2000). The electrolysis of water: an actuation principle for MEMS with a big opportunity. *Mechatronics*, 10(45), 571-581.
- Nitschke, M. and Pastore, G. (2003) Cassava flour wastewater as a substrate for biosurfactant production. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 105–108, 295–301.
- Nitschke, M., & Costa, S. G. V. A. O. (2007). Biosurfactants in fo industry. *Trends in Food Science & Technology*, 18(5), 252-259.
- Noah, K.S. et al. (2002) Development of continuous surfactin production from potato process effluent by *Bacillus subtilis* in an airlift reactor. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 98–100, 803–813.
- Nuvia, L., Sánchez-Salinas, E., & Ortiz-Hernández, M. L. (2013). Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 4(1), 1-21.
- Ocón, J., & Barreiro, G. T. (1970). *Problemas de ingeniería química: operaciones básicas*. Aguilar.
- Oriol, E, (2004). Origen, producción y análisis. CD in VI seminario internacional (Microbiología aplicada a Nutrición Animal). Lesaffre Feed Additives/Saf Agri. Veracruz, Mexico.
- Paredes, D. A. (2011). Estudio de la adsorción de compuestos aromáticos mediante carbon activado preparado a partir de la cascara de castaña. Lima.
- Pavez, Osvaldo. (2000). Apuntes de concentración de minerales I. Universidad de Atacama Facultad de Ingeniería Departamento de Metalurgia, Atacama-Chile.
- Pellerin, N., Staley, J. T., Ren, T., Graff, G. L., Treadwell, D. R., & Aksay, I. A. (1990). Acidic biopolymers as dispersants for ceramic processing. *MRS Online Proceedings Library Archive*, 218: 123-128

- Petterson, J. (1985). En J. Petterson, *Industrial Wastewater Treatment Technology*. (segunda edición ed., págs. 273-302). Stoneham.
- Philp, J.C. et al. (2002) Alkanotropic *Rhodococcus ruber* as a biosurfactant producer. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 59, 318–324.
- Pradelles, R., Alexandre, H., Ortiz-Julien, A., & Chassagne, D. (2008). Effects of yeast cell-wall characteristics on 4-ethylphenol sorption capacity in model wine. *Journal of agricultural and food chemistry*, 56(24), 11854-11861.
- Quast, K. (2015). Effects of solution ageing on the zeta potential characteristics of a hematite ore. *Advanced Powder Technology*, 26(4), 1219-1224.
- Quast, K. (2016). The use of zeta potential to investigate the interaction of oleate on hematite. *Minerals Engineering*, 85, 130-137.
- Quast, K. B. (2000). A review of hematite flotation using 12-carbon chain collectors. *Minerals Engineering*, 13(13), 1361-1376.
- Rahman, P. K., & Gakpe, E. (2008). Production, characterisation and applications of biosurfactants-Review. *Biotechnology*.
- Raiger Iustman, L. J., & López, N. I. (2009). Los biosurfactantes y la industria petrolera. *Química viva*, 8(3): 146-161.
- Rajeshwar, K., & Ibanez, J. G. (1997). *Environmental electrochemistry: Fundamentals and applications in pollution sensors and abatement*. Elsevier.
- Raju, G. B., & Khangaonkar, P. R. (1982). Electro-flotation of chalcopyrite fines. *International Journal of Mineral Processing*, 9(2), 133-143.
- Raju, G. B., & Khangaonkar, P. R. (1984). Electroflotation of chalcopyrite fines with sodium diethyldithiocarbamate as collector. *International Journal of Mineral Processing*, 13(3), 211-221.
- Ramnani, P. et al. (2005) Concomitant production and downstream processing of alkaline protease and biosurfactant from *Bacillus licheniformis* RG1: bioformulation as detergent additive. *Process Biochem.* 40, 3352–3359.
- Ramón, G. (2016). Diseños experimentales Apuntes de clase del curso Seminario Investigativo VI.
- Rao, K. H., & Subramanian, S. (2007). Bioflotation and bioflocculation of relevance to minerals bioprocessing. In *Microbial processing of metal sulfides* (pp. 267-286). Springer, Dordrecht.
- Reiling, H.E. et al. (1986) Pilot plant production of rhamnolipid biosurfactant by *Pseudomonas aeruginosa*. *Appl. Environ. Microbiol* 51, 985–989.

- Restrepo, A., Arango, A., & Garcés, L. (2006). La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción limpia*, 1(2), 58-77.
- Rodrigues, L., Banat, I. M., Teixeira, J., & Oliveira, R. (2006). Biosurfactants: potential applications in medicine. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, 57(4), 609-618.
- Rojas, R. (2016). Electroflotacao de particulas finas de hematita em célula modificada de Prtridge Smith usando *Rhodococcus opacus* como biorreagente. Tese de Doutorado.
- Ron, E. Z., & Rosenberg, E. (2001). Natural roles of biosurfactants Minireview. *Environmental microbiology*, 3(4), 229-236.
- Ron, E., & Rosenberg, E. (2002). Biosurfactants and oil biorremediation. *Biotechnol*, 312-116.
- Rosenberg, E. (2010). Microbial biosurfactants. *Biotechnol*.
- Rosenberg, E., Ron, E.Z. (1997). Bioemulsans: microbial polymeric emulsifiers. *Curr Opin Biotechnol* 8:313-316.
- Rubio, J., & Hoberg, H. (1993). The process of separation of fine mineral particles by flotation with hydrophobic polymeric carrier. *International journal of mineral processing*, 37(1-2), 109-122.
- Ruiz, Á. A. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de investigación*, 2(1), 49-56.
- Salager, J., & Fernández, A. (2002). Cuaderno FIRP S300-A: Surfactantes; tipos y usos. Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales, Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela.
- Salager, J., & Forgiarini, A. (2007). Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos. Mérida-Venezuela: Universidad de los Andes-Facultad de Ingeniería-Escuela de Ingeniería Química.
- Salopek, B., Krasic, D., & Filipovic, S. (1992). Measurements and Application of Zeta - Potential. *Strucni clanak*, 147-151.
- Sampaio, J. A., Luz, A. B. D., França, S. C. A., & Gonzaga, L. M. (2018). Separação magnética e eletrostática. CETEM/MCTIC.
- Sánchez MM, (2010), Propiedades bioquímicas y biofísicas de ramnolípidos biotensioactivos. Tesis de doctorado, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular Universidad de Murcia.
- Sanwani, E., Chaerun, S., Mirahati, R., & Wahyuningsih, T. (2016). Bioflotation: bacteria-mineral interaction for eco-friendly and sustainable mineral processing. *Procedia Chemistry*, 19, 666-672.

- Sarkar, M. S. K. A., Donne, S. W., & Evans, G. M. (2011). Utilization of hydrogen in electroflotation of silica. *Advanced Powder Technology*, 22(4), 482-492.
- Sarkar, M. S. K. A., Evans, G. M., & Donne, S. W. (2010). Bubble size measurement in electroflotation. *Minerals Engineering*, 23(11-13), 1058-1065.
- Schmickler, W., & Santos, E. (2010). Interfacial electrochemistry. Springer Science & Business Media. Aleminia.
- Schramm, L. L. (Ed.). (2000). Surfactants: fundamentals and applications in the petroleum industry. Cambridge University Press.
- Seader, J., & Henley E, J. (2006). Separation Process Principales (Vol. Segunda bedicion).
- Sen, R. (1997). Response surface optimization of the critical media components for production of surfactin. *J. Chem. Tech. Biotechnol.* 68, 263–270.
- Sen, R. (2010). Surfactin: biosynthesis, genetics and potential applications. In Biosurfactants (pp. 316-323). Springer, New York, NY.
- Sen, R. and Swaminathan, T. (1997) Application of response-surface methodology to evaluate the optimum environmental conditions for the enhanced production of surfactin. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 47, 358–363.
- Sen, R. and Swaminathan, T. (2004) Response surface modeling and optimization to elucidate the effects of inoculum age size on surfactin production. *Biochem. Eng. J.* 21, 141–148.
- Sen, R. and Swaminathan, T. (2005) Characterization of concentration and purification parameters and operating conditions for the small-scale recovery of surfactin. *Process Biochem* 40, 2953–2958.
- Seydlová, G., & Svobodová, J. (2008). Review of surfactin chemical properties and the potential biomedical applications. *Central European Journal of Medicine*, 3(2), 123-133.
- Shabtai, Y. and Gutnick, D.L. (1986) Enhanced emulsan production in mutants of *Acinetobacter calcoaceticus* RAG-1 selected for resistance to cetyltrimethylammonium bromide. *Appl. Environ. Microbiol.* 52, 146–151.
- Shaw, D. (1970). Introduction to colloid and surface chemistry. Londres: Butterworths.
- Shaw, D. J., & Costello, B. (1991). Introduction to colloid and surface chemistry: Butterworth-Heinemann.
- Sheng, P. X., Ting, Y. P., & Chen, J. P. (2007). Biosorption of heavy metal ions (Pb, Cu, and Cd) from aqueous solutions by the marine alga *Sargassum* sp. in single-and multiple-metal systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(8), 2438-2444.

- Shepherd, R., Rockey, J., Sutherland, I. W., & Roller, S. (1995). Novel bioemulsifiers from microorganisms for use in foods. *Journal of Biotechnology*, 40(3), 207-217.
- Shrimali, K., Jin, J., Hassas, B. V., Wang, X., & Miller, J. D. (2016). The surface state of hematite and its wetting characteristics. *Journal of colloid and interface science*, 477, 16-24.
- Singh, A., Van Hamme, J. D., & Ward, O. P. (2007). Surfactants in microbiology and biotechnology: Part 2. Application aspects. *Biotechnology advances*, 25(1), 99-121.
- Singh, P., & Cameotra, S. S. (2004). Potential applications of microbial surfactants in biomedical sciences. *TRENDS in Biotechnology*, 22(3), 142-146.
- Smyth, T., Perfumo, A., McClean, S., Marchant, R., & Banat, I. (2010). Isolation and analysis of lipopeptides and high molecular weight biosurfactants. *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*, 3689-3704.
- Somasundaran, P., Healy, T. W., & Fuerstenau, D. W. (1964). Surfactant adsorption at the solid—liquid interface—dependence of mechanism on chain length. *The Journal of Physical Chemistry*, 68(12), 3562-3566.
- Soto J. (2016). Flotación de hematita usando un biosurfactante crudo extraído de *Rhodococcus opacus*. Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro.
- Sposito, G. (1998). On points of zero charge. *Environmental science & technology*, 32(19), 2815-2819.
- Stumm, W. (1992). *Chemistry of the solid-water interface: processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems*. John Wiley & Son Inc..
- Subramanian, S., Santhiya, D., & Natarajan, K. A. (2003). Surface modification studies on sulphide minerals using bioreagents. *International Journal of Mineral Processing*, 72(1-4), 175-188.
- Sun, W., Ma, L., Hu, Y., Dong, Y., & Zhang, G. (2011). Hydrogen bubble flotation of fine minerals containing calcium. *Mining Science and Technology (China)*, 21(4), 591-597.
- Supaphol, S., Jenkins, S. N., Intomo, P., Waite, I. S., & Donnell, A. G. (2011). Microbial community dynamics in mesophilic anaerobic co-digestion of mixed waste. *Bioresource Technology*, 102(5), 4021-4027.
- Syldatk, C., & Hausmann, R. (2010). Microbial biosurfactants. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(6), 615-616.
- Tacoronte, E., Martinez, V., & Quishpe, L. (2013). Electroquímica. Universidad Central de Ecuador-Ingeniería Química.

- Tadesse, B., Albijanic, B., Makuei, F., & Browner, R. (2018). Recovery of fine and ultrafine mineral particles by electroflotation—A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 1-15.
- Tavares, L., Silva, P., Junqueira, M., Mariano, D., Nogueira, F., Domont, G., y otros. (2013). Characterization of rhamnolipids produced by wild-type and engineered *Burkholderia kururiensis*. *Microbiol Biotechnol*, 1909-1921.
- Trahar, W. J. (1981). A rational interpretation of the role of particle size in flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 8(4), 289-327.
- Ullauri, P. G. (2010). Transporte de masa en extracción fase sólido-líquido. *Revista ReCiTeIA*.
- Valdiviezo Gonzales, L. G., Huaman Pino, G. A., & Torem, M. L. (2013). Electrflotacion de finos de Cassiterita utilizando una cepa bacteriana hidrofóbica. Brazil.
- Vikbjerg, A. F. (2006). Enzyme catalyzed production of phospholipids with modified fatty acid profile. PhD thesis. BioCentrum, Technical University of Denmark.
- Villas-Bôas, R. C., & Sánchez, M. (2006). Tecnologías limpias en las industrias extractivas minero-metalúrgica y petrolera. Rio de Janeiro: CETEM/MCT/CNPq/CYTED/AECI.
- Walde, P., et al., Phospholipid-based reverse micelles. *Chemistry and Physics of Lipids*, 1990. 53(4): p. 265-288.
- Wang, S., & Mulligan, C. N. (2004). An evaluation of surfactant foam technology in remediation of contaminated soil. *Chemosphere*, 57(9), 1079-1089.
- Welty, J. R., Wicks, C. E., & Wilson, R. E. (1991). Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa. 540,198.
- Whelan, P. F., & Brown, D. J. (1956). Particle-bubble attachment in froth flotation. *Bulletin of the Institute of Mining and Metallurgy*, 591, 181-192.
- Williams, K. J. (2009). Biosurfactants for cosmetic application: Overcoming production challenges. Warning: get class expects parameter 1 to be object, array given in/home/vhosts/ejournal/user-dir/htdocs/classes/cache/GenericCache. inc. php on line 63 MMG 445 Basic Biotechnology eJournal, 5(1), 78-83.
- Wills, B. A., & Napier-Munn, T. J. (2006). *Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment And Mineral Recovery*. University of Queensland.
- Yañez-Ocampo, G., & Wong-Villarreal, A. (2013). Biosurfactantes microbianos, producción potencial con residuos agroindustriales de Chiapas. *Bio Tecnología*, 17(3), 12-28.

- Yang, H., Tang, Q., Wang, C., & Zhang, J. (2013). Flocculation and flotation response of *Rhodococcus erythropolis* to pure minerals in hematite ores. *Minerals Engineering*, 45, 67-72.
- Yeh, M., Wei, Y., & Chang, J. (2005). Enhanced production of surfactin from bacillus subtilis by addition of solid carriers. *Biotechnol*, 1329-1334.
- Ying, G. G. (2006). Fate, behavior and effects of surfactants and their degradation products in the environment. *Environment international*, 32(3), 417-431.
- Zaragoza A. (2012). Propiedades bioquímicas de tensioactivos biológicos de origen bacteriano. Universidad de Murcia, Departamento de Bioquímica y Biología Molecular (A).

APÉNDICE A

MATRIZ DE CONSISTENCIA

		PROBLEMA	OBJETIVO	VARIABLES	METODOLOGÍA
GENERAL	G	¿La recuperación de partículas finas de hematita es significativa en un proceso de electroflotación usando como biolector sustancias tensoactivas extraídas de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i> ?	Evaluar el proceso de electroflotación de hematita mediante un biosurfactante crudo extraído de la levadura <i>Sacharomyces Cerevisiae</i> .	Recuperación máxima de hematita.	Ensayos de electroflotación
ESPECÍFICOS	E1	¿Cuál es la composición elemental del mineral hematita?	Caracterizar químicamente el mineral hematita.	Composición química de la hematita	Análisis por fluorescencia de rayos X en el espectrofotómetro marca OLYMPUS
	E2	¿Cómo extraer el biosurfactante crudo de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i> ?	Plantear un protocolo de extracción para la obtención del biosurfactante crudo de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i> .	Protocolo de extracción para la obtención del biosurfactante crudo de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i>	Extracción con etanol presurizado al 96%
	E3	¿Cuáles son los grupos funcionales del biosurfactante crudo extraído de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i> ?	Caracterizar químicamente el biosurfactante crudo.	Grupos funcionales del biosurfactante crudo de la levadura <i>Sacharomyces cerevisiae</i>	Análisis por espectros de adsorción infrarroja en un espectrofotómetro Nicolet FTIR 2000.
	E4	¿Qué efecto tiene el pH, intensidad de corriente y concentración de biosurfactante crudo en la recuperación de la hematita?	Estudiar el efecto del pH, intensidad de corriente y concentración de biosurfactante crudo en la recuperación de la hematita.	Recuperación de hematita	Ensayos de electroflotación con diseño factorial multinivel.
	E5	¿Existe interacción significativa entre la hematita y el biosurfactante crudo?	Mediante análisis químico demostrar la interacción del biosurfactante crudo en las partículas de hematita.	Grupos funcionales del biosurfactante absorbidos por la hematita.	Análisis por espectros de adsorción infrarroja en un espectrofotómetro Nicolet FTIR 2000.

Fuente: Elaboración Propia

APÉNDICE B

PORCENTAJE DE FLOTABILIDAD DE HEMATITA

Las siguientes tablas muestran el cálculo completo para hallar el porcentaje de flotabilidad de la hematita, haciendo uso de las ecuaciones del ápice 3.9. Las Tablas B.1- B.4, muestran la recuperación de hematita para intensidad de corriente (A) de 1 amperio.

Tabla B.1: Recuperación de Hematita a pH= 5 y A=1

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
1	0	185.42	0.8571	100	0
2	20	63	0.2268	26.461	73.539
3	40	53	0.1908	22.261	77.739
4	60	37.6	0.13536	15.793	84.207
5	80	64.4	0.23184	27.049	72.951
6	100	86.4	0.31104	36.290	63.710

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.2: Recuperación de Hematita a pH= 9 y A=1

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
7	0	185.42	0.8571	100	0
8	20	165	0.594	69.30	30.70
9	40	84.2	0.30312	35.37	64.63
10	60	57.3	0.20628	24.07	75.93
11	80	66.2	0.23832	27.81	72.19
12	100	85.4	0.30744	35.87	64.13

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.3: Recuperación de Hematita a pH= 7 y A=1

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
13	0	185.42	0.8571	100	0
14	20	123.22	0.443592	51.75	48.25
15	40	94.4	0.33984	39.65	60.35
16	60	59.4	0.21384	24.95	75.05
17	80	68.3	0.24588	28.69	71.31
18	100	89.9	0.32364	37.76	62.24

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.4: Recuperación de Hematita a pH= 3 y A=1

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
19	0	185.42	0.8571	100	0
20	20	62.2	0.22392	26.13	73.87
21	40	40.2	0.14472	16.88	83.12
22	60	32.1	0.11556	13.48	86.52
23	80	44.5	0.1602	18.69	81.31
24	100	52.3	0.18828	21.97	78.03

Fuente: Elaboración Propia

Las Tablas B.5 - B.8, muestran la recuperación de hematita para intensidad de corriente (A) de 2 amperios.

Tabla B.5: Recuperación de Hematita a pH= 9 y A=2

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
25	0	185.42	0.8571	100	0
26	20	119.27	0.429372	50.10	49.90
27	40	64.72	0.232992	27.18	72.82
28	60	45	0.162	18.90	81.10
29	80	40.8	0.14688	17.14	82.86
30	100	67.19	0.241884	28.22	71.78

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.6: Recuperación de Hematita a pH= 7 y A=2

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
31	0	185.42	0.8571	100	0
32	20	79.4	0.28584	33.35	66.65
33	40	47	0.1692	19.74	80.26
34	60	38.7	0.13932	16.25	83.75
35	80	59.9	0.21564	25.16	74.84
36	100	73	0.2628	30.66	69.34

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.7: Recuperación de Hematita a pH= 5 y A=2

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
37	0	185.42	0.8571	100	0
38	20	45.8	0.16488	19.24	80.76
39	40	40.1	0.14436	16.84	83.16
40	60	33.87	0.121932	14.23	85.77
41	80	50.9	0.18324	21.38	78.62
42	100	77.7	0.27972	32.64	67.36

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.8: Recuperación de Hematita a pH= 3 y A=2

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
43	0	185.42	0.8571	100	0
44	20	50.1	0.18036	21.04	78.96
45	40	45.4	0.16344	19.07	80.93
46	60	28	0.1008	11.76	88.24
47	80	34.6	0.12456	14.53	85.47
48	100	41	0.1476	17.22	82.78

Fuente: Elaboración Propia

Las Tablas B.9-B.12, muestran la recuperación de hematita para intensidad de corriente (A) de 3 amperios.

Tabla B.9: Recuperación de Hematita a pH= 9 y A=3

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
49	0	185.42	0.8571	100	0
50	20	110.36	0.397296	46.35	53.65
51	40	45.86	0.165096	19.26	80.74
52	60	25.68	0.092448	10.79	89.21
53	80	30	0.108	12.60	87.40
54	100	58	0.2088	24.36	75.64

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.10: Recuperación de Hematita a pH= 7 y A=3

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
55	0	185.42	0.8571	100	0
56	20	47	0.1692	19.74	80.26
57	40	20.9	0.07524	8.78	91.22
58	60	19.9	0.07164	8.36	91.64
59	80	36	0.1296	15.12	84.88
60	100	48	0.1728	20.16	79.84

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.11: Recuperación de Hematita a pH= 5 y A=3

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
61	0	185.42	0.8571	100	0
62	20	32.2	0.11592	13.52	86.48
63	40	17	0.0612	7.14	92.86
64	60	10	0.036	4.20	95.80
65	80	27	0.0972	11.34	88.66
66	100	42	0.1512	17.64	82.36

Fuente: Elaboración Propia

Tabla B.12: Recuperación de Hematita a pH= 3 y A=3

Prueba N°	Concentración de Biosurfactante (PPM)	NTU	[Hes] g/L	% [He]	% flotabilidad de hematita
67	0	185.42	0.8571	100	0
68	20	37.4	0.13464	15.71	84.29
69	40	28.3	0.10188	11.89	88.11
70	60	20.3	0.07308	8.53	91.47
71	80	30	0.108	12.60	87.40
72	100	40	0.144	16.80	83.20

Fuente: Elaboración Propia

APÉNDICE C

FOTOGRAFÍAS



Fotografía 1. Equipos y Materiales

Nota. En la fotografía se muestran: De lado derecho y de color plomo y blanco el reactor hidrotérmico, seguido de la levadura y finalmente el etanol de 96°.



Fotografía 2. Celda de electroflotación

Nota. Celda de electroflotación del modelo preliminar.



Fotografía 3. Filtración del biosurfactante.

Nota. En esta etapa se separó la parte insoluble del biosurfactante.



Fotografía 4. Pesado del papel filtro después de filtrar el biosurfactante

Nota. En esta etapa se pesó el papel filtro con la parte insoluble del biosurfactante. Este dato nos permitió calcular la concentración del biosurfactante.



Fotografía 5. Celda de electroflotación preliminar

Nota. Celda de electroflotación preliminar, durante la flotación. Se observa la generación de burbujas.



Fotografía 6. Celda de electroflotación preliminar, durante la flotación

Nota. Se observa la generación de burbujas.



Fotografía 7. Celda de electroflotación preliminar

Nota. Celda de electroflotación después 15 minutos de realizada la electroflotación.



Fotografía 8. Celda de electroflotación preliminar.

Nota. Se observa la recuperación de hematita en la superficie y el colchón de burbujas con hematita formado.



Fotografía 9. Celda de electroflotación preliminar.

Nota. Se observa la celda de electroflotación después de la electroflotación de hematita usando el biosurfactante extraído de la levadura



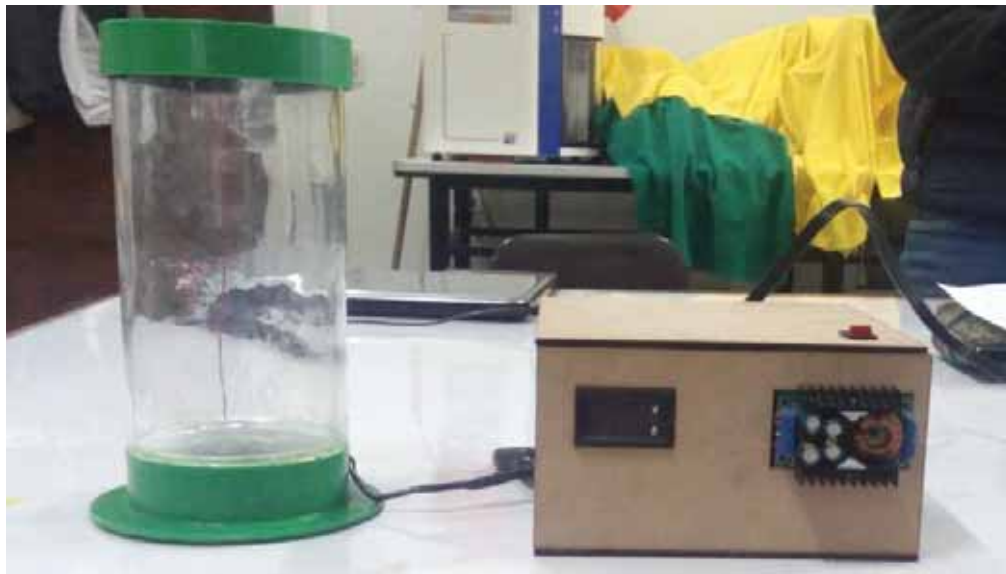
Fotografía 10. Tamiz malla 200.

Nota. Se observa la hematita de tamaño promedio de $-75\mu\text{m}$ tamizada.



Fotografía 11. Chancadora de laboratorio.

Nota. La presente fotografía muestra la chancadora de la Escuela Profesional de Metalurgia. En la presente chancadora se redujo el tamaño de la hematita hasta un tamaño promedio de $-75\mu\text{m}$.



Fotografía 12. Celda de electroflotación.

Nota. Esta celda de electroflotación tipo columna es la que se utilizó en los ensayos de electroflotación.



Fotografía 13. Celda de electroflotación.

Nota. Se observa la celda de electroflotación con la pulpa acondicionada antes de realizar la electroflotación.



Fotografía 14. Recuperación de hematita.

Nota. Se observa la recuperación de hematita durante la flotación.



Fotografía 15. Recuperación de hematita.

Nota. Se observa la recuperación de hematita después del ensayo de electroflotación.



Fotografía 16. Celda de electroflotación después del ensayo de electroflotación.

Nota. Se puede observar la pulpa restante completamente clara, esto indica buena recuperación de hematita.



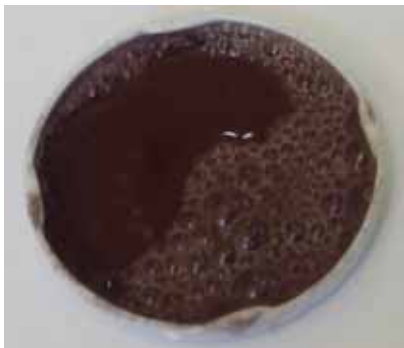
Fotografía 17. Proceso de electroflotación.

Nota. Se puede observar como la generación de cloro, le da a la pulpa un aspecto lechoso.



Fotografía 18. Pulpa después de la electroflotación de hematita.

Nota. Se observa la pulpa completamente clara, esto indica un alto porcentaje de recuperación de hematita.



Fotografía 19. Hematita recuperada.

Nota. La hematita recuperada se retira de la celda de electroflotación por rebase a recipientes previamente rotulados. La hematita mostrada esta diluida.



Fotografía 20. Hematita recuperada secada.

Nota. La hematita recuperada del proceso de electroflotación diluida después de 24 horas a la intemperie.



Fotografía 21. Recuperación de hematita.

Nota. Se observa como la hematita empieza a flotar durante el ensayo de electroflotación. A los 4 min de electroflotación.



Fotografía 22. Celdas de electroflotación.

Nota. Se observa como flota la hematita a los 12 minutos del ensayo de electroflotación.



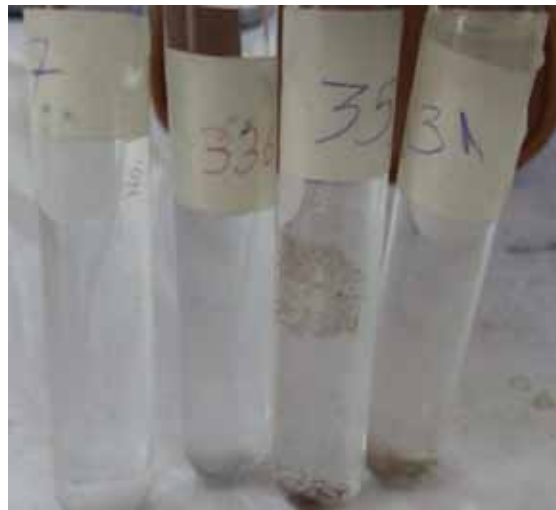
Fotografía 23. Celda de electroflotación

Nota. Se observa la hematita recuperada después del ensayo a diferentes condiciones de densidad de corriente. La figura de la derecha se realizó a densidad de corriente de 3 amperios, mientras la figura de la izquierda se realizó a una densidad de corriente de 1 amperio.



Fotografía 24. Turbidímetro digital

Nota. Se observa el Turbidímetro utilizado para medir la turbiedad de la pulpa, después del ensayo de electroflotación.



Fotografía 25. Muestras de la pulpa después de la electroflotación.

Nota. Se observa muestras de la pulpa después de realizar a flotación. Estas muestras fueron analizadas con el turbidímetro digital para calcular el valor de NTU.