

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



**“Biolixiviación del cobre de circuitos electrónicos en celulares por
Acidithiobacillus Ferrooxidans a diferentes concentraciones y
temperaturas”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO
EN BIOTECNOLOGÍA**

AUTORES:

Bach. Arroyo Achú, Gabriel Felipe
Bach. Sanchez, Castillo Carlos Samuel

ASESOR:

Ms. José Manuel Villanueva Carlos

NUEVO CHIMBOTE – PERÚ
2026

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



**“BIOLIXIVIACIÓN DEL COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN
CELULARES POR *Acidithiobacillus ferrooxidans* A DIFERENTES
CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS”**

Tesis para obtener el Título Profesional de Licenciado en Biotecnología

AUTORES:

Bach. Arroyo Achú, Gabriel Felipe
Bach. Sanchez Castillo, Carlos Samuel

Revisado y aprobado por el asesor:

.....
M Sc. Villanueva Carlos, José Manuel

DNI: 32733772

ID ORCID: 0000-0002-5056-0001

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



**“BIOLIXIVIACIÓN DEL COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN
CELULARES POR *Acidithiobacillus ferrooxidans* A DIFERENTES
CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS”**

Tesis para obtener el Título Profesional de Licenciado en Biotecnología

Revisado y aprobado por el Jurado Evaluador:

.....
M Sc. Alva Muñoz, Eterio Amaranto
DNI: 32406295
ID ORCID: 0000-0002-4113-7981

.....
M Sc. Villanueva Carlos, José Manuel
DNI: 32733772
ID ORCID: 0000-0002-5056-0001

.....
Ms. Lecca Zavaleta, Víctor Eduardo
DNI: 42636735
ID ORCID: 0000-0022-3759-8128

ACTA DE CALIFICACION DE SUSTENTACION DE LA TESIS

En el Distrito de Nuevo Chimbote, en la Universidad Nacional de Santa, en el auditorio de la facultad de Ciencias siendo las 11 horas del día 21 de Agosto de 2024, dando cumplimiento a la Resolución N° 254-2024-UNS-CFC, se reunió el jurado evaluador presidido por M Sc Eterio ALVA MUÑOZ teniendo como miembros a Dr Víctor LECCA ZAVALETA (integrante) y M Sc José Manuel VILLANUEVA CARLOS (integrante), para la sustentación de tesis a fin de optar el título de **licenciado en Biotecnología** realizado por los tesisistas Gabriel Felipe ARROYO ACHÚ y Carlos Samuel SANCHEZ CASTILLO, quienes sustentaron la tesis intitulada **Biolixivación del cobre de circuitos electrónicos en celulares por *acidithiobacillus ferrooxidans* a diferentes concentraciones y temperaturas**

Terminada la sustentación los tesisistas respondieron a las preguntas formuladas por los miembros del jurado

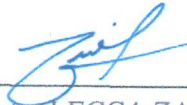
El jurado luego de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes declara la sustentación como **BUENO** asignándole un calificativo de 17 puntos, según artículo 111 del Reglamento General de Grados y Títulos vigente (Resolución N° 580-2002-CU-R-UNS)

Siendo las 12 horas del mismo día se dio por terminado el acto de sustentación firmando los miembros del jurado en señal de conformidad



M Sc: Eterio ALVA MUÑOZ

Presidente



Dr: Víctor LECCA ZAVALETA

Secretario



M Sc: José VILLANUEVA CARLOS

Integrante




Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Jose Villanueva
Título del ejercicio: TESIS
Título de la entrega: "BIOLIXIVIACIÓN DEL COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN...
Nombre del archivo: ITHIOBACILLUS_FERROOXIDANS_A_DIFERENTES_CONCENTRA...
Tamaño del archivo: 3.59M
Total páginas: 87
Total de palabras: 17,331
Total de caracteres: 101,158
Fecha de entrega: 27-dic-2025 10:46p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entrega: 2747597244

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE BIOTECNOLOGÍA



"BIOLIXIVIACIÓN DEL COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN
CELULARES POR ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS A DIFERENTES
CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS"

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE LICENCIADO
EN BIOTECNOLOGÍA

AUTORES:
Bach. Amoy Achú, Gabriel Felipe
Bach. Sánchez, Casillo Carlos Samuel

ASESOR:
Ms. José Manuel Villanueva Carlos

NUEVO CHIMBOTE - PERÚ
2024

“BIOLIXIVIACIÓN DEL COBRE DE CIRCUITOS ELECTRÓNICOS EN CELULARES POR ACIDITHIOBACILLUS FERROOXIDANS A DIFERENTES CONCENTRACIONES Y TEMPERATURAS”

INFORME DE ORIGINALIDAD

23%	6%	1%	22%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Nacional del Santa Trabajo del estudiante	22%
2	purl.org Fuente de Internet	<1%
3	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
7	triplenlace.com Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.uta.edu.ec Fuente de Internet	<1%
9	tesis.ipn.mx Fuente de Internet	<1%
10	repositorio.unc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
11	www.grafiati.com Fuente de Internet	<1%
12	repositorio.undc.edu.pe Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación se lo dedico a Dios que me dio las fuerzas para salir adelante.

A mis padres que me brindaron su apoyo para poder llegar a esta instancia de mi vida profesional.

A mis maestros, por brindarme sus conocimientos y sabiduría en el desarrollo de mi vida profesional.

A mi asesor por brindarme su apoyo y enseñanzas en este trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional del Santa por acogerme en sus aulas todo el tiempo que estudie allí.

Gabriel Felipe Arroyo Achú

Este trabajo de investigación está dedicado a mis padres, por todo su apoyo incondicional.

A familia por apoyarme a lo largo de esta etapa universitaria.

A todos mis amigos que he conocido y me acompañaron durante todos estos años, aportando conocimiento tanto profesional y como ser humano.

A mi asesor por brindarnos su tiempo, apoyo y conocimientos para realizar este trabajo de investigación.

Carlos Samuel Sanchez Castillo

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a cada profesor que hizo parte de este proceso de formación académica, a nuestro asesor Ms. José Manuel Villanueva Carlos por guiarnos y contribuir en este trabajo.

INDICE	
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
INDICE DE TABLAS.....	viii
INDICE DE FIGURAS	x
INDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Descripción del Problema	16
1.2. Formulación del Problema	17
1.3. Objetivos.....	17
1.3.1. Objetivo General	17
1.3.2. Objetivos Específicos.....	17
1.4. Formulación de Hipótesis	18
1.5. Justificación e importancia.....	18
II. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Residuos Electrónicos y su impacto ambiental.....	18
2.2. Biolixiviación y su importancia como alternativa sostenible	19
2.3.1. <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	21
2.3.1.2. Metabolismo Bacteriano	22
2.3.1.3. Aplicación en la Industria	23
2.4. Modelos Matemáticos aplicados en Biolixiviación	23
2.5. Bacterias Presentes en los Minerales	29
2.6. Aislamiento	30
2.7. Drenaje ácido de minas (DAM)	30
III. METODOLOGÍA	31

3.1. Método de Investigación	31
3.2. Población.....	31
3.3. Muestra	31
3.4. Diseño Experimental.....	31
3.5. Procedimientos	33
3.5.1. Toma de muestras de las aguas ácidas de mina	33
3.5.2. Aislamiento de <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	33
3.5.3. Diluciones seriadas	35
3.5.4. Recolección de circuitos electrónicos celulares	36
3.5.5. Ensayos de Biolixiviación	36
3.5.6. Análisis Estadístico	37
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.1. RESULTADOS	37
4.1.3. Biolixiviación de Cobre	45
4.1.4. Wolfram mathematica 10.4.....	45
4.1.5. Porcentaje de la Reducción de Cobre.....	55
4.2. DISCUSIÓN	57
V. Conclusiones y Recomendaciones	61
5.1. Conclusiones.....	61
5.2. Recomendaciones	62
VI. REFERENCIAS	63
VII. ANEXOS.....	67

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diseño Experimental a diferentes concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans y temperaturas.....	32
Tabla 2: Diluciones para las distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans.....	35
Tabla 3: Ensayos para la biolixiviación de cobre	36
Tabla 4: Cinética de crecimiento obtenido a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans y diferentes temperaturas.....	37
Tabla 5: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a temperatura ambiente	39
Tabla 6: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 30°C	41
Tabla 7: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 35°C	43
Tabla 8: Datos experimentales obtenidos de la biolixiviación de cobre (ppm) a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans y temperaturas. ...	45
Tabla 9: Datos experimentales a diferentes concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans a temperatura ambiente	46
Tabla 10: Datos obtenidos de la Simulación a concentración de 10^4 de Acidithiobacillus ferrooxidans a temperatura 35°C	46
Tabla 11: Datos experimentales a diferentes concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans a temperatura 30°C	47
Tabla 12: Datos obtenidos de la Simulación a concentración de 10^3 de Acidithiobacillus ferrooxidans a temperatura 35°C	47
Tabla 13: Datos Experimentales obtenidos de la biolixiviación de Cobre (ppm) a temperatura 35°C.....	48
Tabla 14: Datos Experimentales obtenidos de la biolixiviación de Cobre (%) a temperatura 30°C.....	49
Tabla 15: Datos Experimentales a temperatura ambiente para la biolixiviación de cobre	50
Tabla 16: Datos obtenidos de la simulación (ppm) en Wolfram mathematica 10.4 a temperatura ambiente para la biolixiviación de cobre.....	50

Tabla 17: Datos Experimentales obtenidos a 30°C para la biolixiviación de cobre	52
Tabla 18: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 30°C para la biolixiviación de cobre	52
Tabla 19: Datos experimentales obtenidos a concentración de 10^5 para la biolixiviación de cobre a temperatura 35°C	54
Tabla 20: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a concentración de 10^5 para la biolixiviación de cobre a temperatura 35°C.....	54
Tabla 21: Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans a temperatura Ambiente	55
Tabla 22: Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans a 35°C de temperatura	56
Tabla 23: Solución A: Sales 9k para 190 mL de medio	68
Tabla 24: Solución B: Sulfato ferroso heptahidratado (110 mL)	68
Tabla 25: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de A. ferrooxidans a temperatura ambiente	70
Tabla 26: Concentraciones de A. ferrooxidans a temperatura ambiente	70
Tabla 27: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de A. ferrooxidans a 30°C	71
Tabla 28: Concentraciones de A. ferrooxidans a 30°C	71
Tabla 29: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de A. ferrooxidans a 35°C	72
Tabla 30: Concentraciones de A. ferrooxidans a 35°C	72
Tabla 31: Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans para diferentes temperaturas	73

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de biolixiviación de cobre	20
Figura 2: Mecanismos químicos en la Biolixiviación.....	21
Figura 3: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de Acidithiobacillus ferrooxidans en 168 horas.	38
Figura 4: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de Acidithiobacillus ferrooxidans en 168 horas.	38
Figura 5: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de Acidithiobacillus ferrooxidans en 168 horas.	38
Figura 6: Cinética del Acidithiobacillus ferrooxidans de la biomasa experimental y simulada a temperatura ambiente	40
Figura 7: Cinética del Acidithiobacillus ferrooxidans de la biomasa experimental y simulada a 30°C	42
Figura 8: Cinética del Acidithiobacillus ferrooxidans de la biomasa experimental y simulada a 35°C	44
Figura 9: Reducción de cobre empleando el Modelo ajustado.....	46
Figura 10: Reducción de cobre empleando el Modelo ajustado.....	48
Figura 11: Reducción de cobre ppm y porcentaje a 30 y 35°C	49
Figura 12: Reducción de Cobre (ppm) experimental y simulado a temperatura ambiente.....	51
Figura 13: Reducción de cobre (ppm) experimental y simulado a 30°C.....	53
Figura 14: Reducción de cobre (ppm) experimental y simulado para la concentración 10^5 a 35°C	55
Figura 15: Reducción de cobre en porcentajes a diferentes temperaturas	56
Figura 16: Preparación de la solución de ácido sulfúrico 10N (100ml).....	73
Figura 17: Solución de ácido sulfúrico 10N	74
Figura 18: Solución A, se agregó 190 mL de agua destilada	74
Figura 19: Una vez pesado el reactivo, se agregó 110 mL de agua destilada	74
Figura 20: Acidificación de medio con ácido sulfúrico 10N	75
Figura 21: Vertido y siembra en el medio solido 9k.....	75
Figura 22: Incubación en la estufa a 30°C por 5 días.....	75
Figura 23: Identificación de bacilos Gram negativos	76
Figura 24: Trituración de circuitos electrónicos (Scraps).....	76

Figura 25: Preparación de medio 9k líquido para los ensayos de biolixiviación	76
Figura 26: Preparación de las diluciones de Acidithiobacillus ferrooxidans	77
Figura 27: Concentraciones de A. ferrooxidans a cada medio 9k líquido.....	77
Figura 28: Se agregó 10g de scraps a cada tratamiento de Acidithiobacillus ferrooxidans.....	77
Figura 29: Muestreo cada 24h.....	78
Figura 30: Acidificación del medio 9k.....	78
Figura 31: Solución A y B mezcladas.....	78
Figura 32: Preparación de medio 9k líquido	79
Figura 33: Preparación de medio 9k para las replicas	79
Figura 34: Preparación de medio 9k para las replicas	79
Figura 35: Preparación de medio 9k para las replicas	80
Figura 36: Solución A y B mezcladas.....	80
Figura 37: Preparación de las diluciones de Acidithiobacillus ferrooxidans	80
Figura 38: Inoculación de las diluciones correspondiente e incubación en el shaker a 35° C.....	81
Figura 39: Trituración de scraps.....	81
Figura 40: Agregado de scraps e incubación en el shaker 30° C.....	81
Figura 41: Muestreo cada 24h.....	82
Figura 42: Peso seco sin biomasa	82
Figura 43: Peso seco con biomasa	82
Figura 44: Biomasa	83
Figura 45: Preparación de medios 9k líquidos para replicas	83
Figura 46: Preparación de diluciones	83
Figura 47: Muestreo cada 24h.....	84
Figura 48: Capachos en campana	84
Figura 49: Cámara de Neubauer.....	84
Figura 50: Recuento en la cámara de Neubauer.....	85
Figura 51: Recuento en la cámara de Neubauer.....	85

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Materiales, Equipos y Reactivos	67
Anexo 2: Composición química del medio 9k (300 mL)	68
Anexo 3: Diseño de medio de cultivo <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	69
Anexo 4: Mapa metabólico <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	69
Anexo 5: Recuento bacteriano en Cámara de Neubauer	70

RESUMEN

La finalidad de este trabajo de investigación fue biolixiviar cobre de los circuitos electrónicos de celulares en desuso, empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a diferentes temperaturas. Se utilizó el medio 9K para su aislamiento, crecimiento y adaptación de la bacteria, en los ensayos de biolixiviación, se empleó 10 g/L de circuitos en el medio 9k donde fueron inoculadas diferentes concentraciones de las cepas. Se realizó la cinética de crecimiento *Acidithiobacillus ferrooxidans*, mediante la biomasa obtenida a las 168 horas y la biomasa simulada en el wolfram mathematica empleando el modelo logístico. La Biolixiviación de cobre se realizó por 168 horas, extrayendo 10mL de muestra cada 24 horas, estas muestras fueron analizadas por espectrofotometría de absorción atómica, obteniendo una reducción en los niveles de cobre (ppm); Se aplicó el modelo de Luedeking-Piret modificado, con la finalidad de comparar los datos experimentales obtenidos de la reducción de cobre con los datos simulados obtenidos del wolfram mathematica con el modelo mencionado. En los resultados obtenidos, se logró una reducción máxima de 27.2727887% de cobre a 35°C a una concentración de 10^4 UFC/mL, con un ajuste al modelo de $R^2=0.995075$ para la reducción de cobre en circuitos electrónicos de celulares. En conclusión se logró determinar la cinética del microorganismo y una adecuada reducción de cobre empleando la biolixiviación.

Palabras claves: Biolixiviar, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, Medio 9k, Aislamiento.

ABSTRACT

The purpose of this research was to bioleach copper from the electronic circuits of disused cell phones, using different concentrations of *Acidithiobacillus ferrooxidans* at different temperatures. 9K medium was used for its isolation, growth, and adaptation. In bioleaching assays, 10 g/L of circuits were used in the 9K medium where different concentrations of the strains were inoculated. The growth kinetics of *Acidithiobacillus ferrooxidans* was performed using the biomass obtained at 168 hours and the biomass simulated in Wolfram Mathematica using the logistic model. Copper bioleaching was carried out for 168 hours, extracting 10 mL of sample every 24 hours. These samples were analyzed by atomic absorption spectrophotometry, obtaining a reduction in copper levels (ppm); the modified Luedeking-Piret model was applied in order to compare the experimental data obtained from copper reduction with the simulated data obtained from Wolfram Mathematica with the aforementioned model. In the results obtained, a maximum reduction of 27.2727887% of copper was achieved at 35 ° C at a concentration of 10^4 CFU / mL, with a fit to the model of $R^2 = 0.995075$ for the reduction of copper in electronic circuits of cell phones. In conclusion, it was possible to determine the kinetics of the microorganism and an adequate reduction of copper using bioleaching.

Keywords: Bioleaching, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, 9k Medium, Isolation

I. INTRODUCCIÓN

Los residuos electrónicos, son altamente dañinos para el medio ambiente, ya que, año tras año van en aumento su producción y cuando dejan de funcionar se convierten en una dificultad, causando amontonamiento en los diferentes basureros del mundo, estos son recolectados por diferentes personas o entidades.

La recolección de estos materiales son muy perjudiciales para la salud de quien o quienes lo recolectan debido a los elementos que contiene los residuos electrónicos y a las técnicas antiguas que emplean y a la vez producen más contaminación al medio ambiente (Greenpeace, 2011).

Por medio de la lixiviación de los metales, ha surgido un nuevo campo en la industria metalurgia, la cual es conocida como biolixiviación está viene en desarrollo. En esta creciente tecnología se aplican bacterias acidófilas, estas actúan como catalizadores en las reacciones de disolución, con la finalidad de extraer los metales a partir de los relaves mineros.

Los daños ambientales y económicos que conllevan estos procesos químicos para la lixiviación de cobre de los minerales sulfurados, impulsan nuevos métodos para la lixiviación de cobre. Hace medio siglo, se verifico la presencia de las bacterias acidófilas en las elevadas concentraciones férricas analizadas en las aguas de minas que contienen sulfuro y carbón, así como en las diferentes explotaciones provocadas por la hidrometalurgia. Lo cual manifestó un hecho indiscutible que las bacterias acidófilas están presentes en la extracción de diferentes metales y minerales sulfurados, estos establecen el inicio de una nueva tecnología, esta es llamada "biominería", donde se emplean bacterias acidófilas con el fin de favorecer a la minería (Bernadeli et al., 2017).

A nivel comercial, la recuperación de cobre es empleada mediante la biolixiviación. Generalmente, este método se emplea en pilas, estas son regadas con ácidos diluidos. Estos metales son mayormente minerales (o concentrados) con forma de trapecio, de cientos de m² de base y de 6 a 20 metros de altura, que se colocan encima de capas plásticas de gran densidad. En las pilas, las

partículas se encuentran solamente trituradas (en milímetros) y esporádicamente adicionadas por una previa humidificación con diluciones acidas. Los lixiviados son recolectados del sedimento y derivados con el fin de recuperar el cobre, generalmente se emplea electrolisis previamente separado el hierro por medio de la extracción de solventes (Johnson, 2014).

Con la biominería se aportan grandes soluciones a los relaves mineros, esta técnica influye ventajas ambientales y económicas con respecto a los métodos químicos. Es una rama de la biorremediación de los metales pesados, su fundamento se basa en tratar los metales pesados empleando actividad microbiana (Malik, 2024).

1.1. Descripción del Problema

El uso creciente de dispositivos electrónicos en nuestra vida diaria ha llevado a una acumulación masiva de residuos electrónicos. Estos desechos no solo ocupan espacio, sino que también contienen metales valiosos como el cobre, que podríamos recuperar y reutilizar. Sin embargo, las técnicas tradicionales para recuperar estos metales son peligrosas y dañinas para nuestro medio ambiente (Misari et al., 2016).

En la actualidad existen plantas mineras, que presentan muchos problemas en la recuperación del cobre, presentando perdidas del metal precioso en el relave y bajas recuperaciones en los procesos de flotación, afectando de esta manera a la producción de las empresas. Este problema es presentado en su mayoría en los yacimientos mesotermales. Se han presentado opciones de pre tratamientos para la oxidación de este tipo de mineral, como son la tostación y la oxidación a presión, pero estos tratamientos no tuvieron mucho éxito, presentando un mayor costo de operación, lo cual no se tomaron en cuenta. Ante esta situación la aplicación de un pre tratamiento a la biolixiviación de cobre empleando *Acidithiobacillus ferrooxidans* procedente de drenaje ácidos de mina, la cual tienen la propiedad de oxidar al mineral refractario usando como fuente energética el Fe y nos permite aumentar la recuperación cobre en los circuitos electrónicos de celulares en desuso.

1.2. Formulación del Problema

¿Cuál es el efecto de la temperatura y la concentración de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en la biolixiviación del cobre presente en circuitos electrónicos de celulares desechados?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* (10^3 , 10^4 , 10^5 UFC/mL) y temperaturas (ambiente, 30°C y 35°C) en la biolixiviación del cobre presente en circuitos electrónicos de celulares desechados, con el propósito de determinar las condiciones óptimas que maximicen la eficiencia del proceso.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* (10^3 , 10^4 , 10^5 UFC/mL) y temperaturas (ambiente, 30 °C, 35 °C) en la cinética de biolixiviación del cobre presente en los circuitos electrónicos.
- Determinar los parámetros cinéticos (μ , Y_x/s , Y_p/s , Q_x , Q_p) asociados al proceso de biolixiviación bajo las condiciones experimentales de concentración bacteriana y temperatura.
- Analizar estadísticamente el efecto de las combinaciones de temperatura y concentración bacteriana en la biolixiviación del cobre mediante técnicas de comparación entre tratamientos.
- Establecer un modelo matemático que describa el proceso de biolixiviación en función de las variables experimentales y permita identificar la combinación óptima de concentración y temperatura.
- Determinar el porcentaje de reducción del cobre presente en circuitos electrónicos de celulares mediante biolixiviación utilizando *Acidithiobacillus ferrooxidans* bajo diferentes condiciones experimentales de temperatura y concentración bacteriana.

- Cuantificar la cantidad de cobre extraído mediante biolixiviación, empleando el método de espectrofotometría de absorción atómica para validar la eficiencia del proceso.

1.4. Formulación de Hipótesis

La biolixiviación del cobre presente en circuitos electrónicos de celulares es más eficiente a una temperatura de 35 °C y una concentración de 10⁴ UFC/mL de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, condiciones bajo las cuales se logra la mayor reducción de cobre

1.5. Justificación e importancia

En nuestra región el efecto de la contaminación causada por los circuitos de celulares es un problema, ya que estos poseen algunos metales y químicos tóxicos que contaminan al medio ambiente esto perjudicando en la salud, especialmente en las personas que recolectan chatarra de la basura sin la debida protección; además gran parte de los componentes tienen valiosos metales que pueden ser recuperados en vez de ser arrojados en los basurales o vertederos sanitarios. La industria minera con la aplicación de las técnicas químicas convencionales tiene como desventaja el efecto de contaminación, es por esto que surge la necesidad del uso de técnicas amigables con el ambiente además de ser más económicas, por eso la biolixiviación de cobre es una opción más beneficiosa y de bajo costo.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Residuos Electrónicos y su impacto ambiental

Actualmente los celulares en los países desarrollados han alcanzado su máximo nivel de saturación en el mercado. A nivel global se cree que hay alrededor de 5000 millones de afiliados a las áreas de operadores móviles con un incremento de aproximadamente 1000 millones de móviles anualmente. Esta novedad continua en un notable incremento los países subdesarrollados con un incremento de un 20% anual y sin señales que disminuirá. Se sobre entiende que los teléfonos móviles integran diversas sustancias químicas tóxicas y metales pesados, estos perjudicando al medio ambiente y su

entorno, sin embargo, estos residuos poseen materiales que pueden ser recuperados ya que son muy valiosos, en vez de ser arrojados y por ende contaminar el medio ambiente. Las baterías recargables son uno de los tantos compuestos con un mayor índice de porcentaje en la contaminación (Greenpeace, 2011).

Es de suma necesidad instaurar un método de sistema de gestión para estos contaminantes mediante un protocolo de responsabilidad del fabricante, que ayude con mejores propuestas medio ambientales en la vida útil de estos productos, además extendiendo la responsabilidad del fabricante desde el momento de producir hasta el tratamiento una vez que finaliza la vida útil de sus respectivos productos (recuperación, reciclaje y disposición final) (Greenpeace, 2011).

2.2. Biolixiviación y su importancia como alternativa sostenible

La biolixiviación tiene como fundamento la extracción de metales en los minerales por medio de microorganismos como las bacterias acidófilas. Este método es económicamente más rentable y a su vez más sustentable con el medio ambiente a diferencia de la lixiviación química ya que esta última al usar compuestos químicos, elevadas temperaturas y presiones muy altas para poder disolver químicamente un determinado metal de interés en base al mineral usando un adecuado disolvente sobre un mineral (Herrero R. , 2015). La biolixiviación es una técnica aplicada en la biohidrometalurgia que comprenden diferentes técnicas para poder conseguir níquel, zinc y plomo, por medio de la actividad directa o indirecta de las bacterias acidófilas, estas utilizan como combustible los minerales, para poder realizar sus procesos metabólicos mediante la captación de electrones. Estas no requieren de algún tipo de energía externa en sus procesos para poder liberar calor y metales. En la biolixiviación puede englobar un gran número de microorganismos oxidantes de hierro y azufre, como las bacterias de género *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum* y *Sulfobacillus* (Herrero R. , 2015).

Estas bacterias son acidófilas ya que resisten y crecen en medios ácidos con un pH de 1.5 a 3.5 además también se consideran mesófilas porque crecen a un rango de temperatura de 5°C a 45°C.

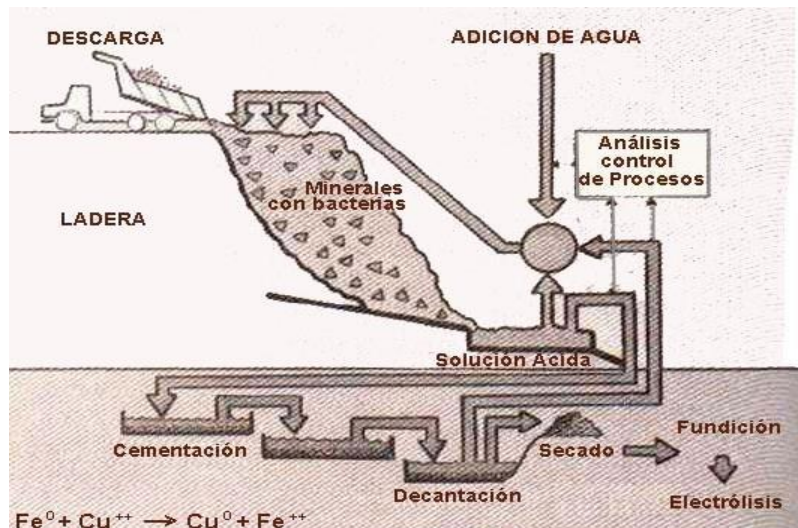


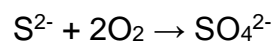
Figura 1: *Proceso de biolixiviación de cobre*

Fuente: Triplenlace, (2015)

Generalmente encontramos dos mecanismos químicos:

A) Mecanismo directo:

Las bacterias en presencia de iones sulfuro S^{2-} , oxidan el sulfuro a ión sulfato:



La oxidación de Fe^{2+} a Fe^{3+} , es otra reacción de la bacteria en su sistema enzimático.

Por ende, en un mineral que es un sulfuro metálico:

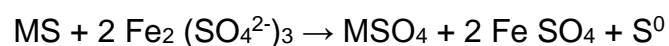


El ion de sulfuro es captado mediante el sistema enzimático de la bacteria, este oxidando al ion de sulfato, quedando libre el ion metálico y diluido en los líquidos lixiviados, que seguidamente son recogidos para ser procesados y así poder obtener el metal M (Webster, 2016).

B) Mecanismo indirecto:

No hay reacciones enzimáticas ya que en este caso la solubilización biológica es dada por las interacciones químicas de los minerales con productos intermedios del metabolismo bacteriano (Webster, 2016).

De manera genérica, para un sulfuro metálico MS, tenemos:



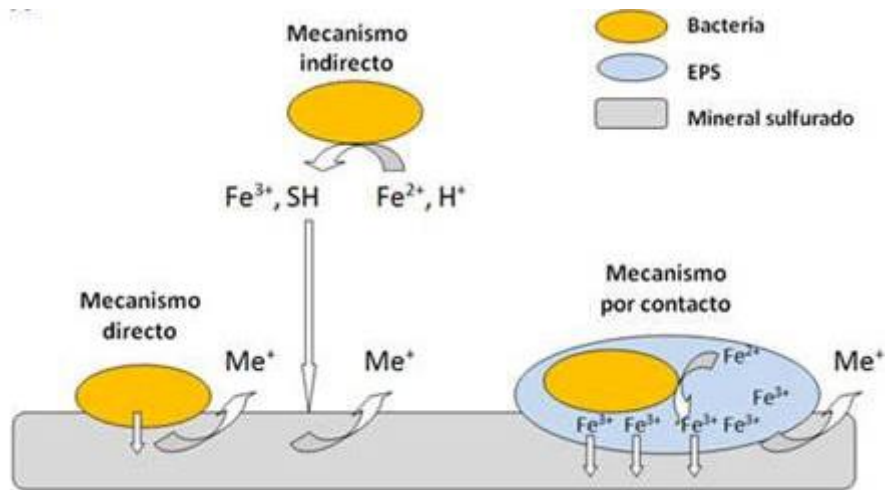


Figura 2: Mecanismos químicos en la Biolixiviación

Fuente: Química Viva, (2014)

2.3. *Acidithiobacillus ferrooxidans*: Fisiología, metabolismo y aplicaciones

2.3.1. *Acidithiobacillus ferrooxidans*

2.3.1.1. Fisiología

Es la especie más estudiada y es un integrante sumamente importante en los consorcios de microorganismos usados para la recuperación industrial del cobre (biolixiviación o biominificación). Es un quimiolitotrófico, γ -proteobacterium que utiliza energía de la oxidación de minerales que contienen hierro y azufre para el crecimiento. Los investigadores Temple y Colmer expusieron que *A. ferrooxidans* tiene como característica ser bacilos Gram negativos, correspondiente al grupo filogenético gamma (Colmer & Temple, 1950). Esta bacteria crece en un medio ácido y tiene la capacidad quimiosintética de oxidar el hierro a ion férrico y el azufre a ácido sulfúrico. El oxígeno generalmente es el aceptor de la mayoría electrones, además *A. ferrooxidans* se destaca por ser una bacteria aeróbica. Prospera a un pH extremadamente bajo (pH 1-2) y fija tanto el carbono como el nitrógeno de la atmósfera. Solubiliza el cobre y otros metales de las rocas y desempeña un papel de suma importancia en el ciclo biogeoquímico de los nutrientes y los metales en ambientes ácidos. La falta de un sistema bien desarrollado para la manipulación genética ha impedido una exploración completa de su fisiología. Además, la confusión ha sido causada por modelos metabólicos previos construidos en base al

examen de múltiples cepas del microorganismo, y en ocasiones distantes (Valdés et al., 2008).

Las variables que afectan en la respuesta de las bacterias encargadas de biolixiviar son: pH (1.5), oxígeno y dióxido de carbono, fuente de energía, nutrientes, temperatura (25 - 35°C), luz, potencial redox (Eh), presencia de inhibidores y tamaño de partículas; aunque estas variables son afectadas dependiendo el tipo de bacteria que se emplee. La acción metabólica de *A. ferrooxidans* ocasiona acidificación en el medio que se emplea, además el tiempo generacional es de aproximadamente 52 horas y crece en medios sólidos como FeSo y FeO. En el medio FeO las colonias tienen como característica ser pequeñas o grandes presentando un color bronce, su forma es variable, estas pueden tener bordes enteros o irregulares: anillos concéntricos o estrellados. A diferencia del medio FeSo, en este las colonias varían menos ya que son muy pequeñas (0.5 - 1.0mm) además presentan un color naranja/marrón (Valdés et al., 2008).

2.3.1.2. Metabolismo Bacteriano

Las bacterias quimiolitótrofas son organismos autótrofos que consiguen su energía mediante la oxidación de los compuestos inorgánicos, además usan como fuente de carbono el CO₂ por medio del ciclo de Calvin. La bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* son un ejemplo de oxidación de hierro ya que estas utilizan el hierro ferroso como donador de electrones a un pH de 2.0 por lo que a esta acidez es más estable el hierro y no se oxida espontáneamente como aceptor final de electrones. La oxidación inicia en el periplasma celular en donde la proteína rusticianina oxida al hierro ferroso a hierro férrico. Para fijar el CO₂ es necesario el NADH el cual se consigue por medio de la reacción de transporte inverso de electrones, aunque el gasto energético es muy alto. Sin embargo, se obtiene poco material celular y energía por lo que se tiene que oxidar amplias cantidades de hierro para obtener una mayor biomasa. Para oxidar los compuestos de azufre reducido, los dadores de electrones son: azufre elemental, tiosulfato o sulfuro de hidrogeno. La oxidación se da en fases, obteniendo como producto final el sulfato (S₄O₂), generando H⁺ pero reduciendo el pH, así como el *Acidithiobacillus thiooxidans* (Roman Leon, 2017).

2.3.1.3. Aplicación en la Industria

Se conoce que hay bacterias que de forma natural lixivian y oxidan los minerales sulfurados. Cuando se usan estas bacterias en la industria metalúrgica, la biolixiviación se hace presente como medida de biorremediación. Esta tecnología es parte de la biominería, que consta de un conjunto de reacciones biológicas y químicas para así disolver y hacer más solubles a los minerales que tienen mayor valor empleando bacterias que oxidan minerales sulfurados como fuente de energía. La biolixiviación ha sido usada como un método favorable, dando solución a los grandes problemas que ha dejado por años los relaves mineros y sus métodos químicos tradicionales que vienen contaminando continuamente no solo a los lagos y ríos sino también al agua y la tierra. La pequeña inversión económica y energética es una de los grandes beneficios que tiene esta tecnología ya que las bacterias tienen la capacidad de sintetizar su material celular empleando el CO₂ sin embargo el amplio tiempo que esta implica en su proceso es una desventaja. La biolixiviación en el Perú se viene realizando aproximadamente desde la década de los 90s (Roman Leon, 2017).

2.4. Modelos Matemáticos aplicados en Biolixiviación

(Beikzadeh, 2017), En su artículo titulado "Kinetic modeling of copper bioleaching from low-grade ore from the shahrbabak copper complex", logró identificar varios parámetros que afectan sustancialmente de la biolixiviación del cobre; los cuales, el peso específico de la pulpa y de los medios de cultivos fueron seleccionados para su investigación. Las condiciones óptimas para la recuperación de cobre fueron un peso específico de pulpa de 5 g / ml, un medio de sales minerales surtidas de *Acidithiobacillus thiooxidans* (70% en volumen) y *Acidithiobacillus ferrooxidans* (30% en volumen) y 10% en volumen de inóculo. En estas condiciones, determinó que la producción máxima de biolixiviación del medio para la recuperación de cobre era aproximadamente del 99%. El efecto el peso específico de la pulpa en la cinética del proceso de biolixiviación analizó mediante el método de Da Silva y el análisis de regresión multilínea restringida. La cinética de la disolución del cobre siguió el modelo de núcleo que se reduce, y controló el proceso por difusión a una densidad de pulpa de 5g/ mL.

(De La Torre et al., 2015), en su artículo titulado “Los teléfonos celulares una nueva mina de metales preciosos, factible de valorizar mediante tostación y lixiviación con cianuro”, con el propósito de extraer plata, oro, rodio y paladio de los circuitos electrónicos de celulares en desuso. Utilizó métodos de cianuración para recuperar plata, paladio y oro, y lixiviar con ácido nítrico, cloruro de sodio, hidróxido de potasio y ácido sulfúrico para disgregar rodio y paladio. Logró determinar los distintos metales de los circuitos electrónicos, realizó pruebas de cianuración con tratamientos anticipados de la muestra de disminución de tamaño, lixiviación con ácido nítrico y amoníaco. Logró extraer un 42% de paladio, 82% de plata y un 95% de oro, cuando los circuitos electrónicos fueron expuestos a altas temperaturas hasta 850°C a 0.72 atm, lixiviada empleando amoníaco al 16,7% v/v, pulverizada hasta 136 µm y fue cianurada con 4 g/L a un pH de 10,5 por día. Empleo tratamientos de cianuración con reciclo de la solución anteriormente tratada usando carbón activado. El porcentaje de disolución de los metales disminuyó por medio de la recirculación. Realizo tratamientos de lixiviación empleando ensayos previos de la muestra tostada a 850°C y 0,72 atm. La recuperación de metales empleando ácido nítrico, para el tratamiento de los circuitos electrónicos tostados con un tamaño de partícula de 136µm y a una concentración de ácido trioxonitrico de 50 g/L en un periodo de 6 horas examinó una lixiviación del 75% de paladio.

(Galeana, 2011), En su trabajo titulado "Reciclaje y afinación del oro a partir de chatarra electrónica". El progreso de la tecnología se presenta con un incremento altamente elevado de los residuos electrónicos, por ende, los países desarrollados y subdesarrollados se afrontan con serios contratiempos ambientales debido al exceso de desperdicios electrónicos por lo cual se aumentado altamente el uso del "reciclaje" para casi todos los componentes hallados en los desechos mencionados, demostró un mejor método a lo que se emplea con regularidad en el uso de mercurio o cianuro, dado que representan desperdicios altamente contaminantes para los seres vivos y el medio ambiente, logró recuperar metales preciosos que estaban en los residuos electrónicos, especialmente en el oro puesto que la existencia de ese metal en los residuos electrónicos es superior a la numerosa cantidad en un

mineral que va de gramos de oro por tonelada de mineral, por lo tanto, cada vez son más rentables las fuentes secundarias de los metales.

(Liang et al., 2015), en su artículo titulado "Enhanced bioleaching efficiency of copper from waste printed circuit boards (PCBs) by dissolved oxygen-shifted strategy in *Acidithiobacillus ferrooxidans*". Investigó los efectos de los niveles de oxígeno disuelto (OD) en el medio de cultivo sobre el crecimiento celular y la extracción de cobre de placas de circuitos impresos de desecho (PCB) en *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Todo el período de cultivo se dividió en dos etapas de crecimiento celular y extracción de cobre. En la primera etapa, adoptó un nivel de OD relativamente más bajo para satisfacer el crecimiento bacteriano y evitar el exceso de Fe²⁺ oxidación. En la segunda etapa, utilizó una DO más alta para promover la extracción de cobre. Logró controlar el OD al 10% durante las 64 h iniciales y cambiar al 20% después y con la adición de PCB de 18 g / l a las 64 h, la recuperación final de cobre alcanzó el 94.1%, aumentó en 37.6 y 48.3% en comparación con el OD constante de 10 y 20% operación. Más importante aún, los períodos de lixiviación de cobre se redujeron de 108 a 60 h.

(Kim et al., 2018), En su trabajo titulado "Metal Recovery from the Mobile Phone Waste by Chemical and Biological Treatments". Determinó una recuperación gradual de metales en desechos de teléfonos móviles mediante tratamiento químico a través de oscilación de pH y el método biológico mediante biomineralización. En el tratamiento químico, la fracción metálica unida a la placa de circuito impreso (PCB) y las partes de la cámara se separaron de los desechos del teléfono móvil y luego se pulverizaron en partículas con un tamaño inferior a 2 mm. La fracción de metal se disolvió en agua regia y el pH de la solución se incrementó a 10,5 mediante la adición de NH₄OH. El primer precipitado fue óxido de hierro, producido al elevar el pH a 3.1 ~ 4.2 con NH₄OH. Secuencialmente, el cloruro de cobre y el complejo de metales de tierras raras se produjeron a pH 5.7 - 7.7 y 8.3 - 10.5, respectivamente. En el método biológico, el filtrado a pH 7,7 se añadió a un medio de crecimiento de bacterias reductoras de metales (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Chromobacterium violaceum*, entre otras) como un precursor.

Después de dos semanas de incubación, se precipitaron rodocrosita y calcita como minerales de tamaño nanométrico. Los resultados indicaron que la recuperación efectiva de metal de los desechos de los teléfonos móviles es factible utilizando tratamientos químicos y biológicos, y los metales recuperados y los metales de tierras raras se pueden reciclar en materias primas para varias industrias.

(Kumar et al., 2018), en su artículo titulado “Enhancement of gold and silver recovery from discarded computer printed circuit boards by *Pseudomonas balearica* SAE1 using response surface methodology (RSM)”. Investigó la biolixiviación en dos etapas, aplicó una bacteria cianogénica *Pseudomonas balearica* SAE1 para recuperar oro (Au) y otra etapa con la misma bacteria para recuperar plata (Ag) de los circuitos electrónicos de computadora (CPPC) mediante el diseño central compuesto de una metodología de superficie de respuesta (CCD-RSM). Para mejorar la recuperación de Au y Ag, optimizó factores como el nivel de pH, la densidad de la pulpa, la temperatura y la concentración de glicina y se estudiaron sus interacciones. La optimización de CCD-RSM dio como resultado una disolución de 73.9 y 41.6% de Au y Ag, respectivamente, a un pH inicial de 8.6, densidad de pulpa de 5 g/L, temperatura de 31.2 °C y concentración de glicina de 6.8 g/L, respectivamente. RSM propuso dos modelos cuadráticos que pueden utilizarse como una herramienta eficiente para predecir la recuperación de Au y Ag mediante biolixiviación. Los resultados experimentales están en línea con los resultados previstos, lo que indica la confiabilidad del modelo RSM para mejorar la recuperación de Au y Ag de los CPPC.

(Monge et al., 2008), en su revista titulada “Biosorción de cobre en sistema por lote y continuo con bacterias aerobias inmovilizadas en zeolita natural (clinoptilolita)”. Investigó la biosorción de cobre usando bacterias que fueron aisladas del río San Pedro, México. Aisló 123 bacterias de tres muestras efectuadas en distintos periodos del año y selecciono las cepas de *Burkholderia cepacia* y *Escherichia coli* a fin de ejecutar tratamientos de biosorción en lote, aquellas demostraron aproximadamente un 73% de biosorción de cobre, en un tiempo estimado de 75 minutos, en tanto que

cuando empleó zeolita sin activar como soporte de las bacterias, obtuvo un porcentaje de 75% de biosorción un periodo de tiempo similar. Determinó que empleando la biomasa activa es apta para adsorber metales tales como la zeolita y el cobre empleada sin activar son útil solamente como soporte de la biomasa.

(Ramirez, 2015), en su trabajo titulado “Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración”. Desarrolló ensayos de biolixiviación empleada a minerales sulfurados de cobre por medio de *Acidithiobacillus ferrooxidans* aisladas de relave minero, por ende, realizó tres fases en secuencia: La primera fase de adaptación, lo realizó a una densidad de pulpa de 1% (W/V) obteniendo una extracción optima de 68% de cobre y 25.6% a 6 g/L y 9 g/L de sulfato ferroso heptahidratado para los minerales azufre y potasio correspondientemente en el transcurso 24 días. En la segunda fase, obtuvo una densidad de pulpa de 6% (W/V), la extracción optima de cobre obtenida sin sulfato ferroso heptahidratado, porque se ha llevado a cabo con bacterias adaptadas en la primera fase. En la tercera fase, ejecutada con una densidad de pulpa al 6% (W/V) y con inóculo nativo de la segunda fase, obtuvo una extracción optima de cobre al 89% con carencia de sulfato ferroso heptahidratado y proliferando una densidad biológica a 42% con relación al inóculo para el azufre, con respecto al potasio, obtuvo la óptima extracción del 33% de cobre, aumentando en 17% su densidad biológica con carencia de sulfato ferroso heptahidratado con relación a la segunda fase.

(Porhoussein, 2017), en su artículo titulado “Effect of heavy metals and BFRS concentration on the adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans* for the led waste bioleaching”. En este estudio, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se adaptó al polvo de LED para aumentar su tolerancia a altas concentraciones de metales pesados y BFR. La adaptación de la cepa de bacterias se realizó a través de un procedimiento de subcultivo en serie. Los experimentos de adaptación con polvo de LED en presencia de una mezcla de sustancia tóxica mostraron que *Acidithiobacillus ferrooxidans* podía tolerar hasta 20 g/L de polvo de LED. Las características de crecimiento reflejadas por pH, Eh, Fe³⁺ de concentración, tasa de crecimiento específico e índice de tolerancia. Los

resultados indicaron que tanto los BFR como los metales pesados podrían causar una respuesta de toxicidad. En general, la alta concentración de polvo de LED (≥ 20 g / l) produjo efectos inhibidores evidentes. Con el fin de analizar la influencia de la adaptación en la eficiencia de recuperación de metales en el proceso de biolixiviación, los *Acidithiobacillus ferrooxidans* adaptados y no adaptados se inocularon a 20 g/L de polvo de LED. Al comparar los resultados obtenidos de la biolixiviación con bacterias adaptadas y no adaptadas, observó una reducción del 30% y 15% en la extracción de cobre y níquel, respectivamente.

(Ramírez, 2008), en su trabajo titulado “Recuperación de oro a partir de chatarra electrónica”, con el fin de recuperar el oro presente en algunas piezas utilizadas de los circuitos electrónicos de computadoras, por medio de un procedimiento de recuperación dinámica ácida y lograr la caracterización exhaustiva de los circuitos a su vez estudiando la naturaleza de las reacciones de recuperación de los metales no nobles (cobre y níquel) que conforman un sustrato metálico de oro, logró caracterizar los circuitos electrónicos de computadoras y las pruebas mediante SEM-EDS revelando que algunos componentes de ellos presentan cobre, hierro y zinc, además, un sustrato de oro. Mediante los caracteres estudiados, las técnicas pirometalúrgicas mediante solvente no son confiables, ya que, los resultados conseguidos fueron bajos en la lixiviación de oro presente en los circuitos electrónicos.

(Sandoval et al., 2015), en su investigación “Recuperación de cobre y otros metales mediante bacterias acidófilas desde scraps de teléfonos móviles”. El objetivo de esta investigación fue calificar y estimar la suficiencia de solubilidad de los metales presentes en los circuitos electrónicos de celulares desechados por medio de la biolixiviación enriquecida con electrolitos de las baterías desechadas. Analizó la capacidad catalítica de *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC 23270 y *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 9463 de cultivos mixtos y puros. Los resultados adquiridos demostraron que en los cultivos mixtos mostraron óptima actividad catalítica para solubilizar cobre y níquel de los circuitos electrónicos de celulares a 10 días de incubación. Dichos cultivos pueden solubilizar cobre y níquel de 9.685 y 211,8 mg/L

correspondientemente, presentado un porcentaje de 65% y 58.8% de los metales presentes en los circuitos electrónicos. Además, estableció la adhesión bacteriana en la parte superior de los circuitos electrónicos mediante el proceso lixiviativo evidenciado que dicho procedimiento es ejecutado por las bacterias. Por lo tanto, logró determinar la factibilidad de solubilizar los metales que se encuentran en los circuitos electrónicos de celulares por medio de la biolixiviación enriquecida con EDB, representando una alternativa para los tratamientos de los circuitos electrónicos de celulares.

(Weijin, 2018), en su trabajo titulado "Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacteria-free culture supernatant of iron–sulfur-oxidizing bacteria". Logró recuperar el 100% de cobre de 5g/L de PCB del sobrenadante por cultivo de bacterias. El resultado indicó que el mecanismo de no contacto indirecto, era el mecanismo predominante en la biolixiviación de cobre. Sin embargo, el papel de las bacterias tenía más probabilidades de regenerar el Fe³⁺ como oxidante. Además, la biooxidación de Fe²⁺ a Fe³⁺ se determinó como el paso de velocidad limitada en la biolixiviación de cobre de PCB, pero la actividad de biooxidación de las bacterias se ve fuertemente inhibida por la toxicidad de los PCB.

2.5. Bacterias Presentes en los Minerales

En el medio ambiente podemos encontrar al hierro y por consecuencia sus variantes oxidadas, en estas encontramos también las bacterias oxidantes del hierro denominadas litótrofas, estas bacterias poseen la peculiar característica de adquirir su energía de la oxidación del hierro. Por ende, es algo habitual hallar estas bacterias en los relaves mineros en donde se extraen minerales sulfurados. El género de bacterias usualmente encontrado es *Acidithiobacillus spp.*, pero también se encuentran otros géneros como *Acidimicrobium spp.*, *Leptospirillum spp.*, *Thiomonas spp.* y *Ferrimicrobium spp.* (Panduro et al., 2015).

El género de *Acidithiobacillus spp.*, abarca las proteobacterias quimiolitótrofas, estas usan compuestos inorgánicos como donadores de electrones, además son autotróficas ya que convierten el CO₂ en material

celular por medio del ciclo de Calvin. *Acidithiobacillus* abarca algunas especies ferrooxidantes de importancia, entre ellas tenemos a *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus ferridurans*, *Acidithiobacillus ferriovans*, *Acidithiobacillus ferriphilus*, *Acidithiobacillus caldus* (50°C) y *A. thiooxidans* (oxidante de azufre) (Panduro et al., 2015).

2.6. Aislamiento

Es un método de separación de un microorganismo de interés de otros microorganismos que lo acompañan. La siembra por estrías es el método más utilizado en los medios de cultivo sólido dispensados en placas Petri.

Para lograr un correcto aislamiento se toma una colonia de la muestra con un asa de platino y se realiza un agotamiento de estrías en la superficie de un nuevo medio de cultivo y esta debe ser incubada con sus respectivas condiciones. En este nuevo medio las colonias quedan separadas y cada una de estas presenta una determinada morfología con respecto a su borde, forma, tamaño, olor, color, etc. (Buricata et al., 2017).

2.7. Drenaje ácido de minas (DAM)

La industria minera provoca principalmente contaminantes por medio de sus drenajes y relaves ya que los drenajes tienen un pH ácido en su procedimiento de perforar y extraer los diversos minerales sulfurados que se encuentran en el subsuelo que tienen contacto con el agua y oxígeno de este modo produciendo drenajes que se caracterizan por poseer un pH bajo (menor a 3.0) además de encontrarse sulfatos y metales. En el subsuelo se encuentran grandes cantidades de metales que son solubilizados por el bajo pH (Weijin, 2018).

Los relaves mineros se caracterizan por presentar una tonalidad de color naranja-rojizo, que esto resulta de los métodos de oxidación de los minerales sulfurados y de la solubilización del hierro ferroso. Estos métodos, son realizados por las bacterias acidófilas que se encuentran en los drenajes ácidos, quienes están encargadas de oxidar la pirita (FeS_2) a hierro férrico soluble. Por consiguiente, estas bacterias acidófilas que se encuentran en los drenajes se han usado en la extracción de metales de interés económico con procedimientos de biolixiviación (Weijin, 2018).

III. METODOLOGÍA

3.1. Método de Investigación

Esta investigación según su propósito es aplicada, ya que, tiene por objetivo resolver el planteamiento del problema, enfocándose en la búsqueda y consolidación del conocimiento para su solución como es en este caso de la biolixiviación del cobre de circuitos electrónicos en celulares por *Acidithiobacillus ferrooxidans* a diferentes concentraciones y temperaturas.

Por su Naturaleza o profundidad es explicativa y experimental, ya que, explica la relación causa-efecto entre las variables (temperatura y concentración) que nos permite identificar la temperatura y concentración optima que se necesita, para luego formularse la hipótesis de investigación, transcurriendo por la búsqueda de información y la obtención de datos que se logró en las determinaciones analíticas y Análisis estadísticos.

3.2. Población

Se empleó la cámara de Neubauer y se determinó la cantidad de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, con el que se obtuvo una concentración inicial 10^6 UFC/mL

3.3. Muestra

Se realizó diluciones seriadas con las concentraciones que se obtuvieron con el recuento en la cámara de Neubauer, se evaluó 3 distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* 10^3 , 10^4 y 10^5 UFC/mL a 3 diferentes temperaturas Ambiente, 30°C y 35°C con su blanco y 3 repeticiones, cada 24 horas se realizó las tomas de muestras por 168 horas, para su posterior análisis en la espectrofotometría atómica y obtención de datos.

3.4. Diseño Experimental

En esta investigación se empleó dos modelos matemáticos para las diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y temperaturas en el programa Wolfram mathematica 10.4

El modelo logístico de crecimiento microbiano describe la evolución de la población bacteriana en función del tiempo, considerando que el crecimiento es

exponencial al inicio y luego se desacelera hasta alcanzar una fase estacionaria debido a la limitación de nutrientes o la acumulación de productos inhibitorios.

El modelo de Luedeking-Piret modificado relaciona la producción de metabolitos con el crecimiento microbiano, considerando dos componentes: uno asociado al crecimiento celular y otro independiente de este. En el contexto de la biolixiviación de cobre, permite estimar la tasa de solubilización del metal en función de la actividad metabólica de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Se probaron tres concentraciones celulares (10^3 , 10^4 y 10^5 UFC/mL) para determinar cómo la densidad inicial influye en la cinética del proceso. Además, se emplearon tres temperaturas (ambiente, 30°C y 35°C) dado que *A. ferrooxidans* es un microorganismo mesófilo, permitiendo analizar su rendimiento en rangos térmicos óptimos y en condiciones ambientales. Se incluyó un blanco para establecer comparaciones y tres repeticiones para garantizar la reproducibilidad y validez estadística de los resultados.

Tabla 1: *Diseño Experimental a diferentes concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans y temperaturas.*

Tratamientos	Concentración	Temperatura
Blanco (T0)	0 UFC/mL	Ambiente
T1	10^3 UFC/mL	Ambiente
T2	10^3 UFC/mL	Ambiente
T3	10^3 UFC/mL	Ambiente
Blanco (T0)	0 UFC/mL	30°C
T1	10^4 UFC/mL	30°C
T2	10^4 UFC/mL	30°C
T3	10^4 UFC/mL	30°C
Blanco (T0)	0 UFC/mL	35°C
T1	10^5 UFC/mL	35°C
T2	10^5 UFC/mL	35°C
T3	10^5 UFC/mL	35°C

3.5. Procedimientos

3.5.1. Toma de muestras de las aguas ácidas de mina

Las muestras fueron obtenidas de los drenajes ácidos de mina ($\text{pH} \pm 2.0$), de las que presentaron puntos de oxidación de sulfuros, que presentaban color amarillento o naranja y fueron almacenadas para el aislamiento de la bacteria de interés.

3.5.2. Aislamiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

3.5.2.1. Preparación del medio 9k

Se preparó por separado cada solución A: Sales 9k para 190 mL de medio y solución B: Sulfato ferroso para 110 mL de medio por separado (Anexo 2).

Se pesó las cantidades señaladas para la solución A y se disolvió en 190 mL agua destilada. El pH se ajustó a 2.0 con ácido sulfúrico 10N y se esterilizó a 121°C durante 15 minutos.

Se pesó las cantidades señaladas para la solución B y se disolvió con 110 mL agua destilada. El pH se ajustó a 2.0 con ácido sulfúrico 10N y se esterilizó a 121 °C durante 15 minutos.

Antes de usar ácido sulfúrico, H_2SO_4 , 10N la densidad del ácido sulfúrico es 5,52 y 1 N de ácido sulfúrico es 14,712 g. Como $d = p/V$ para tener 1 N se agregó 7,995 mL Para tener H_2SO_4 , 10N se agregó 2,665 mL a agua hasta 300 (Pérez, 2016).

Una vez transcurrido el tiempo de la autoclave se mezclaron las dos soluciones a temperatura ambiente.

Se empleó como base el medio 9K, usando agarosa como agente solidificante, compuesto por:

Solución A: Sales 9M + 190 mL de agua destilada.

Solución B: Solución de Sulfato Ferroso 13.2 g + 110 mL de agua destilada.

La solución B se acidificó a pH 2.0 con ácido sulfúrico 10N y se disolvió con 110 mL agua destilada. Las soluciones mencionadas se esterilizaron por separado a 121 °C durante 15 minutos para luego ser mezcladas a 60°C aproximadamente con agitación constante, para luego ser vertidas en placas Petri (Panduro et al., 2015).

3.5.2.2. Aislamiento de la bacteria

Para el crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* se empleó el medio de cultivo 9k líquido a un pH de 2.0 (Silverman et al., 1959), suplementado con FeSO₄·7H₂O (44 g/L) como fuente de energía; se incubó a una temperatura de 30°C, con agitación constante a 180 rpm, durante cinco días, para su posterior aislamiento.

Para el aislamiento del *Acidithiobacillus ferrooxidans* se utilizó el medio de cultivo sólido 9k que se gelificó con agarosa (25 g/L) de medio, y se sembró por estrías, se incubó en medio sólido 9k a 30°C durante cinco días para su aislamiento (Pérez, 2016).

3.5.2.3. Condiciones de cultivo y aislamiento de cepas

En placas con medio sólido 9k modificado, se inoculó la bacteria por agotamiento de estrías y se incubó durante 3 días a una temperatura de 30°C. De igual forma se realizó tres réplicas de aislamiento de las cepas, para usarlas en los experimentos de adaptación y biolixiviación (Pérez, 2016).

3.5.2.4. Caracterización y morfología bacteriana

Las características de las bacterias aisladas se basaron en su crecimiento en medio líquido posteriormente en medio sólido, las cuales fueron evaluadas en las distintas réplicas de cultivo realizadas, para ser seleccionadas y usadas con el fin de determinar sus características morfológicas para su identificación y posteriormente ser empleadas en los tratamientos de biolixiviación (Pérez, 2016).

Se realizó tinción Gram, para poder observar los bacilos Gram negativos observando su morfología y con algunas pruebas bioquímicas como la oxidación de hierro y azufre, prueba de crecimiento en medios ácidos, se logró identificar a la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

3.5.3. Diluciones seriadas

Tabla 2: Diluciones para las distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Tubo	Concentración	H ₂ O	Solución	Dilución
1	10 ⁵ celulas/mL	9 mL	1 mL solución madre	1/10
2	10 ⁴ celulas/mL	9 mL	1 mL solución 0.1M	1/100
3	10 ³ celulas/mL	9 mL	1 mL solución 0.01M	1/1000

Nota: Se realizó una dilución inicial mezclando una cantidad fija de la solución madre con un volumen de diluyente, 1 mL de solución madre con 9 mL de diluyente para obtener una dilución de 1:10. Este proceso se repite tomando una cantidad de la solución diluida y mezclándola nuevamente con diluyente, siguiendo el mismo patrón de dilución en serie Tabla 2. Estas concentraciones se obtuvieron con el recuento en la cámara de Neubauer (Anexo 5).

3.5.4. Recolección de circuitos electrónicos celulares

Se recolectó distintos celulares desechados en la chatarrería, los cuales fueron desmantelados y se extrajeron los scraps del resto de los componentes (plásticos, baterías, conectores, cables y cerámicos). Para el uso experimental, los circuitos electrónicos fueron triturados, estos fueron utilizados en la biolixiviación de cobre.

3.5.5. Ensayos de Biolixiviación

Tabla 3: Ensayos para la biolixiviación de cobre

Temperaturas			
Concentración	Ambiente, 30°C y 35°C°		C/Horas
Control	Control	Control	0
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	24
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	48
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	72
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	96
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	120
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	144
10 ⁵ celulas/mL	10 ⁴ celulas/mL	10 ³ celulas/mL	168

Nota: Los ensayos de biolixiviación se realizaron con 10 gr de circuitos electrónicos con diferentes concentraciones (10⁵, 10⁴ y 10³) de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en medio 9k (300mL). Estas concentraciones se obtuvieron con el recuento en la cámara de Neubauer (Anexo 5). Estos se incubaron a distintas temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) cada uno con sus repeticiones (R₁, R₂ y R₃) y su control respectivo con agitación constante a 180 rpm, de las cuales se tomó muestra cada 24 horas por 168 horas. Todos los cultivos del medio 9k fueron realizados en triplicado los cultivos (Sandoval et al., 2015).

3.5.6. Análisis Estadístico

Se empleó dos modelos matemáticos para las diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y temperaturas. El Modelo logístico de crecimiento microbiano para la cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* en el programa Wolfram mathematica 10.4 y otro Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre, se empleó para observar la reducción cobre en el programa Wolfram mathematica 10.4., nos permitirá lograr el óptimo coeficiente de determinación (R^2) que se ajustan a los modelos matemáticos empleados que deben ser inferior a 1 pero superior que 0.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

4.1.1. Cinética de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

Se realizó por 168 horas (7días) el peso seco de las diferentes concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3) de *Acidithiobacillus ferrooxidans* con las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) para la obtención de Biomasa.

Tabla 4: Cinética de crecimiento obtenido a distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y diferentes temperaturas

t (h)	Biomasa (g/L)								
	35°C			30°C			Ambiente		
	10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3
0	2	0.2	0.02	2	0.2	0.02	2	0.2	0.02
24	2.54	0.29	0.05	2.38	0.25	0.04	2.34	0.21	0.03
48	3.18	0.58	0.16	2.85	0.55	0.12	2.89	0.42	0.28
72	3.75	1.37	0.35	3.52	1.18	0.28	3.21	0.89	0.46
96	4.49	2.63	0.51	4.24	2.46	0.42	4.54	1.65	0.63
120	5.02	3.43	1.01	4.91	3.32	0.89	5.21	2.89	0.85
144	5.82	4.02	1.47	5.59	3.91	1.34	5.49	3.14	1.14
168	5.91	4.25	1.52	5.63	3.94	1.39	5.51	3.18	1.16

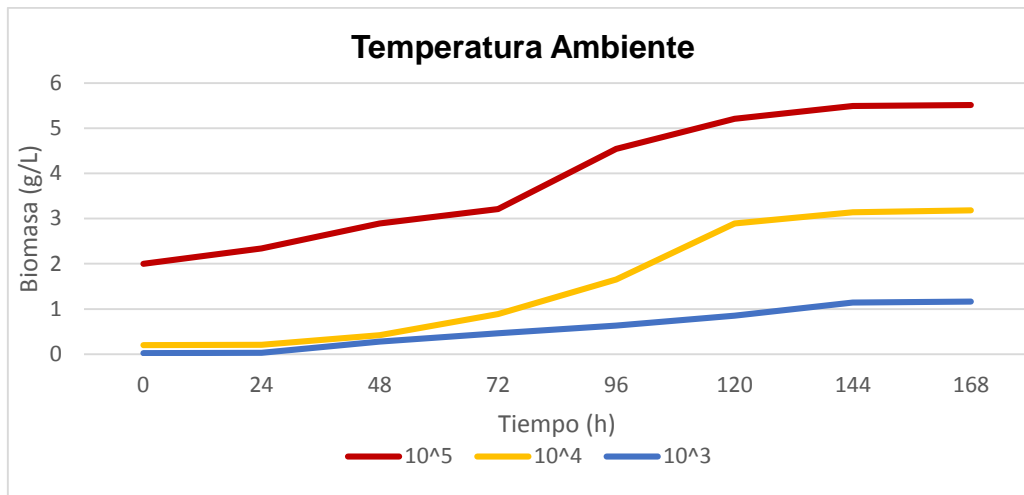


Figura 3: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en 168 horas.

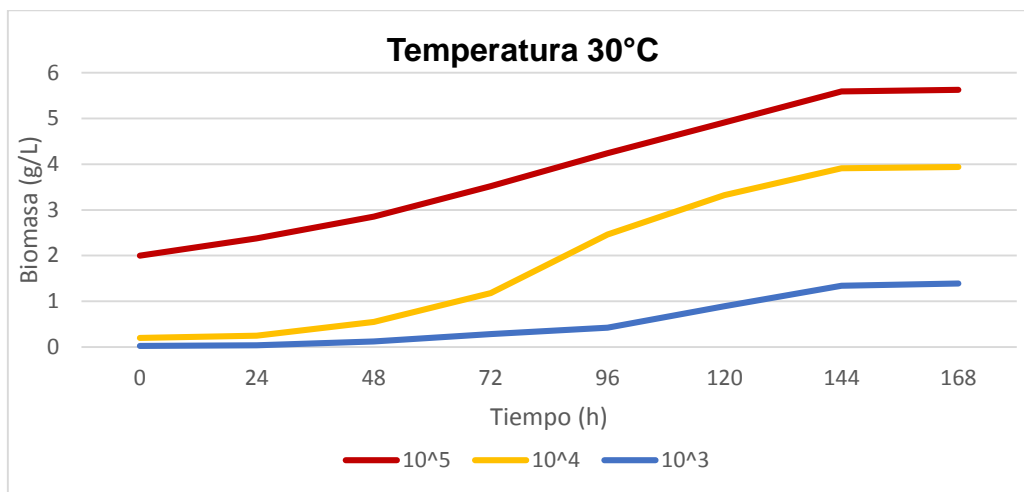


Figura 4: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en 168 horas.

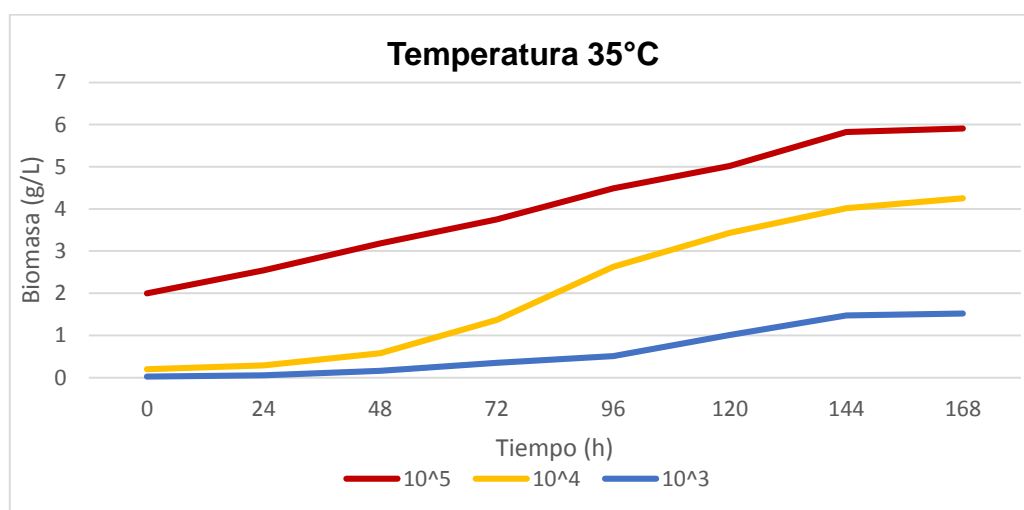


Figura 5: Comparación de concentraciones en la Cinética de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans* en 168 horas.

4.1.2. Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4

En este programa, se empleó los datos experimentales obtenidos de la tabla 4 para la comparación de los datos simulados que se obtuvieron utilizando un Modelo logístico de crecimiento microbiano para la cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans*

$$X(t) = \frac{X_0 e^{\mu_{\max} \cdot t}}{1 - (X_0/X_{\max})(1 - e^{\mu_{\max} t})}$$

Tabla 5: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a temperatura ambiente

"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	A.	"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	B.
0	2.		0	0.2	
24	2.5151477360747		24	0.3805512366071984	
48	3.0856121182264715		48	0.6935045864135811	
72	3.685626661507523		72	1.1775869237069496	
96	4.283492691665034		96	1.808675570352585	
120	4.847957312562467		120	2.470498443597668	
144	5.354405932454487		144	3.0235382043435224	
168	5.788439702210184		168	3.404503437411355	
	"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	C.		
	0	0.02			
	24	0.05735627298439088			
	48	0.1551410688036127			
	72	0.3653036926573527			
	96	0.6729119027744511			
	120	0.9400242186484822			
	144	1.0854171880407653			
	168	1.1451884364832954			

Nota: Se empleó para la cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* un Modelo logístico de crecimiento microbiano para el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4 obteniendo diferentes simulaciones de la tabla 5 para la posterior comparación con los datos experimentales obtenidos de la tabla 4. Tabla A. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^5 . Tabla B. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^4 . Tabla C. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^3 .

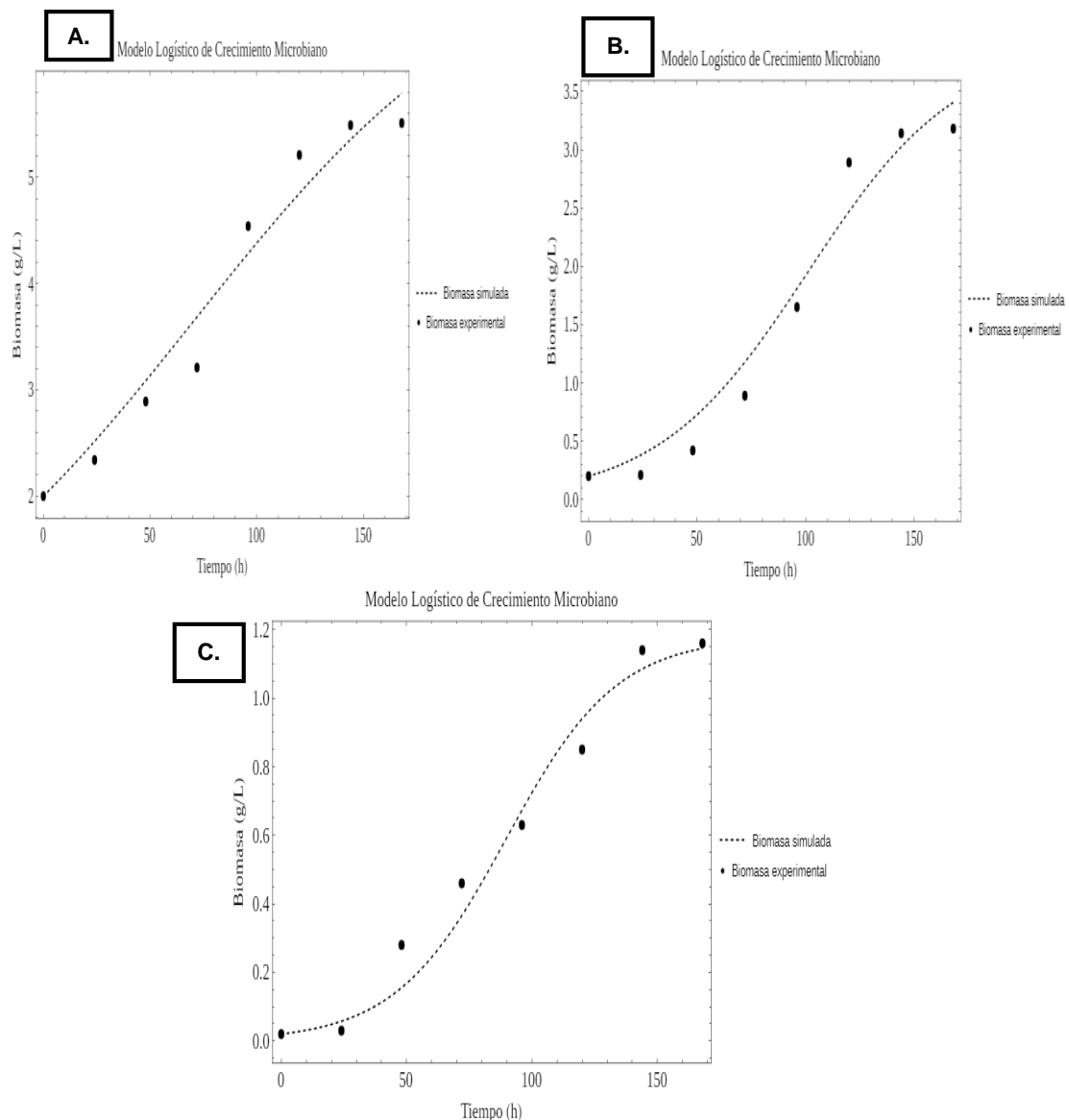


Figura 6: Cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* de la biomasa experimental y simulada a temperatura ambiente

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de la Biomasa Experimental (•) de la tabla 4 y la Biomasa Simulada (...) de la tabla 5 en el Modelo logístico de crecimiento microbiano empleado en Wolfram mathematica 10.4. Figura A. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10^5 a temperatura ambiente. Obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 : 0.963493. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura B. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10^4 a temperatura ambiente. Obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 : 0.970467. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura C. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10^3 a temperatura ambiente. Obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 : 0.976271. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 6: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 30°C

"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	A.	"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	B.
0	2.		0	0.2	
24	2.488538565145959		24	0.4168037220205954	
48	3.0344445875477497		48	0.8236020556083576	
72	3.619170548875351		72	1.4831808687001313	
96	4.217753233648733		96	2.33535141952333	
120	4.80278287606027		120	3.163543885917614	
144	5.349243522241271		144	3.7732484423843204	
168	5.838500559851194		168	4.136496447551026	
"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	C.			
0	0.02				
24	0.04870396135725831				
48	0.11570822999847699				
72	0.2600719607729269				
96	0.5237136922319038				
120	0.8861818409609539				
144	1.229537357948114				
168	1.4573708968222026				

Nota: Se empleó para la cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* un Modelo logístico de crecimiento microbiano para el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4 obteniendo diferentes simulaciones de la tabla 6 para la posterior comparación con los datos experimentales obtenidos de la tabla 4. Tabla A. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^5 . Tabla B. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^4 . Tabla C. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^3 .

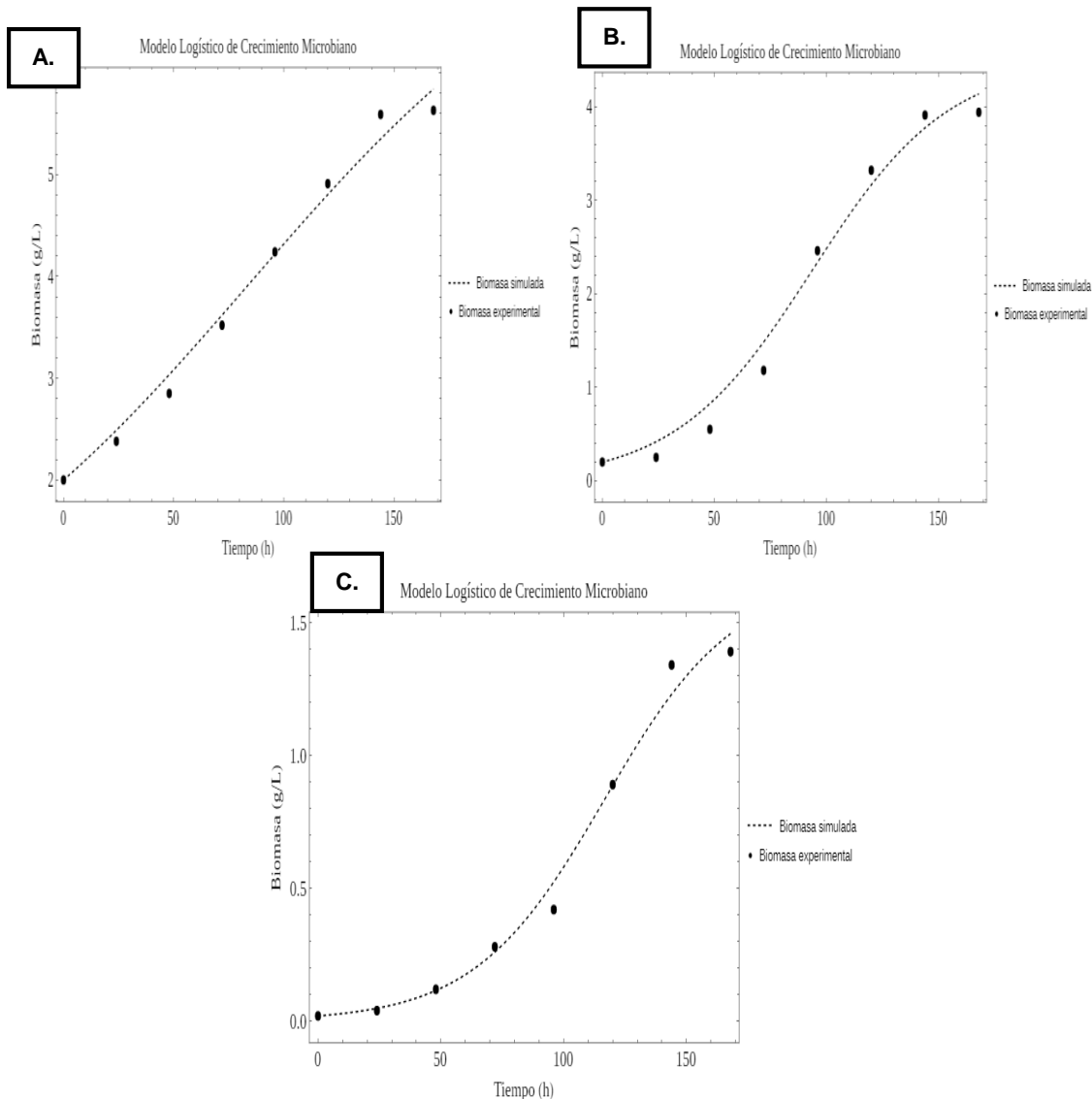


Figura 7: Cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* de la biomasa experimental y simulada a 30°C

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de la Biomasa Experimental (•) de la tabla 4 y la Biomasa Simulada (...) de la tabla 6 en el Modelo logístico de crecimiento microbiano empleado en Wolfram mathematica 10.4. Figura A. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10⁵ a 30°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.989352. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura B. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10⁴ a 30°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.98817. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura C. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10³ a 30°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.98775. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 7: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 35°C

A.		B.	
"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"	"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"
0	2.	0	0.2
24	2.556653092978577`	24	0.42597141491462215`
48	3.177257208600393`	48	0.8581090296917733`
72	3.8296507706648133`	72	1.5663662784432129`
96	4.474415462503329`	96	2.477952068708569`
120	5.073921350251329`	120	3.3458449403866406`
144	5.60053793945141`	144	3.9647856050579975`
168	6.040517605887028`	168	4.321064453877565`

C.	
"Tiempo (h)"	"Biomasa (g/L)"
0	0.02`
24	0.05109898677542457`
48	0.127008015686972`
72	0.29604790507228707`
96	0.6061200889043188`
120	1.014554394881343`
144	1.3691800576228415`
168	1.5816803906736294`

Nota: Se empleó para la cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* un Modelo logístico de crecimiento microbiano para el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4 obteniendo diferentes simulaciones de la tabla 7 para la posterior comparación con los datos experimentales obtenidos de la tabla 4. Tabla A. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^5 . Tabla B. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^4 . Tabla C. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10^3 .

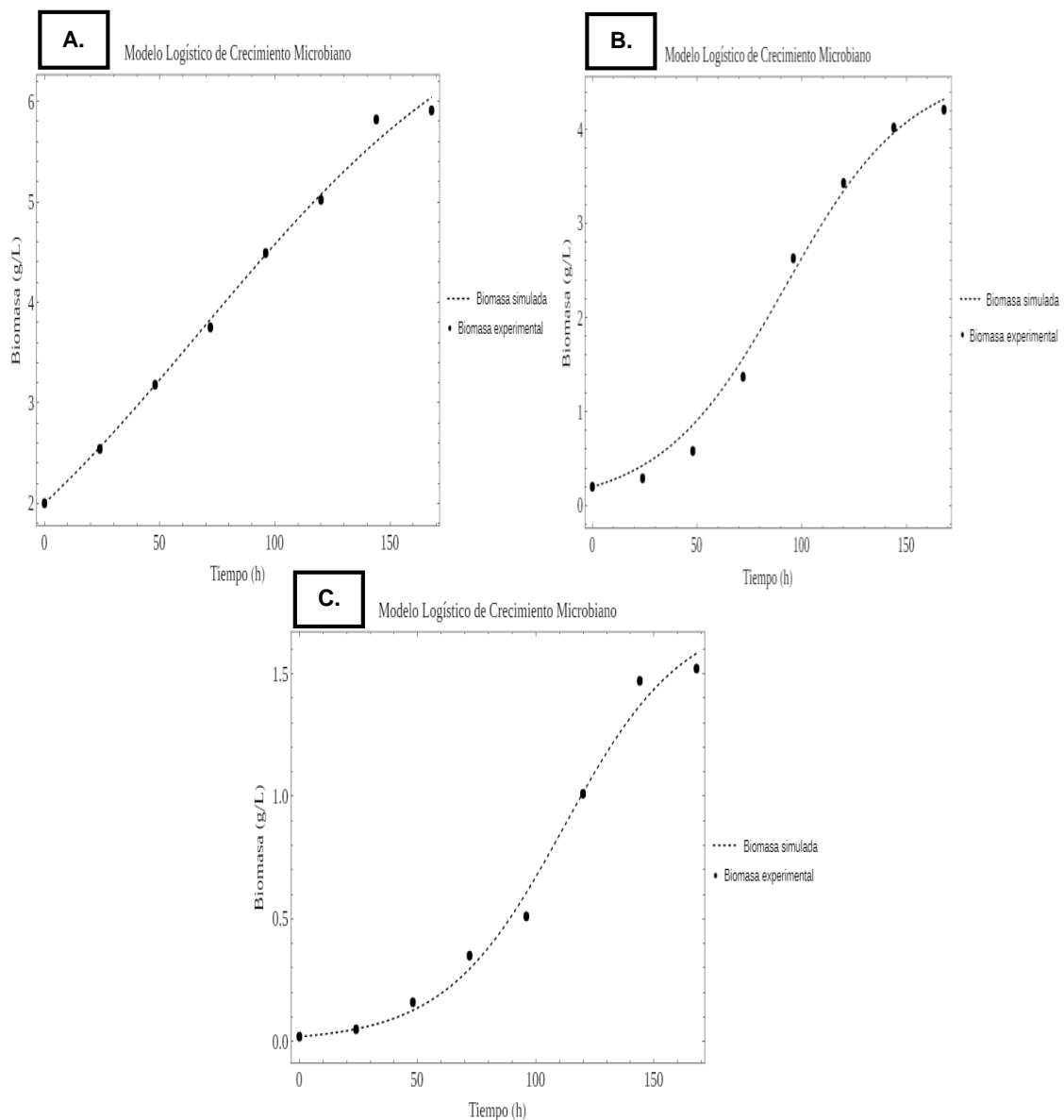


Figura 8: Cinética del *Acidithiobacillus ferrooxidans* de la biomasa experimental y simulada a 35°C

Nota: La Grafica nos muestra la Biomasa Experimental (.) de la tabla 4 y la Biomasa Simulada (...) de la tabla 07 en el Modelo logístico de crecimiento microbiano empleado en Wolfram mathematica 10.4. Figura A. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10⁵ a 35°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.995056. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura B. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10⁴ a 35°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.975905. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura C. Comparación de la Biomasa Experimental y Simulada en la concentración 10³ a 35°C. Obteniéndose un coeficiente de determinación R²: 0.98985. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

4.1.3. Biolixiviación de Cobre

Se realizó por 168 horas (7 días) a diferentes concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3) de *Acidithiobacillus ferrooxidans* con las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) con la finalidad de la reducción de Cobre.

Tabla 8: Datos experimentales obtenidos de la biolixiviación de cobre (ppm) a distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y temperaturas.

t (h)	Cobre (ppm)								
	35°C			30°C			Ambiente		
	10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3	10^5	10^4	10^3
0	10180.9342	10157.2346	10083.8231	10128.1952	10058.7245	10065.2734	10021.3783	10201.5326	10072.1352
24	9992.1528	10093.8231	10066.5676	9862.8842	9946.8261	10042.1152	9892.8842	10146.8723	10066.1936
48	9691.3262	9782.2367	9975.236	9611.6368	9842.2357	9992.623	9651.7264	9942.23312	9992.624
72	9201.518	9381.5334	9813.9262	9313.8275	9592.2736	9863.7624	9325.9275	9822.2612	9963.1172
96	8892.1523	8980.8967	9672.5382	8852.992	9431.8241	9722.9915	8992.4359	9331.8996	9882.7237
120	8477.1927	8579.96	9417.8263	8464.8825	8896.662	9597.8724	8573.9261	8996.665	9757.8263
144	8296.4933	8229.4933	9232.2974	8372.6227	8482.9372	9421.9925	8432.2438	8799.962	9711.263
168	8221.8366	8181.8366	9182.6638	8321.5722	8442.737	9386.831	8401.5832	8741.8251	9686.9426

4.1.4. Wolfram mathematica 10.4

En este programa, se empleó para observar la comparación de la reducción cobre (ppm) experimental obtenido de la tabla00 y simulado empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a diferentes temperaturas, empleando el Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre.

$$S(t) = S_0 - \alpha \left(\frac{X_0 e^{\mu_{\max} t}}{1 - (X_0/X_{\max})(1 - e^{\mu_{\max} t})} - X_0 \right) - \beta \left(\frac{X_{\max}}{\mu_{\max}} \right) \ln[1 - (X_0/X_{\max})(1 - e^{\mu_{\max} t})]$$

Tabla 9: Datos experimentales a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura ambiente

t (h)	10 ⁽⁵⁾	10 ⁽⁴⁾	10 ⁽³⁾
0	10021.3783	10201.5326	10072.1352
24	9892.8842	10146.8723	10066.1936
48	9651.7264	9942.23312	9992.624
72	9325.9275	9822.2612	9963.1172
96	8992.4359	9331.8996	9882.7237
120	8573.9261	8996.665	9757.8263
144	8432.2438	8799.962	9711.263
168	8401.5832	8741.8251	9686.9426

Nota: Datos experimentales obtenido de la reducción de cobre (ppm) a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura Ambiente.

Tabla 10: Datos obtenidos de la Simulación a concentración de 10⁴ de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 35°C

"Tiempo (h) "	"Cobre (ppm) "
0	10157.2346`
24	10043.95018859453`
48	9827.3100446874`
72	9472.245353641656`
96	9015.248984988266`
120	8580.158721917136`
144	8269.874198389234`
168	8091.2668747978205`

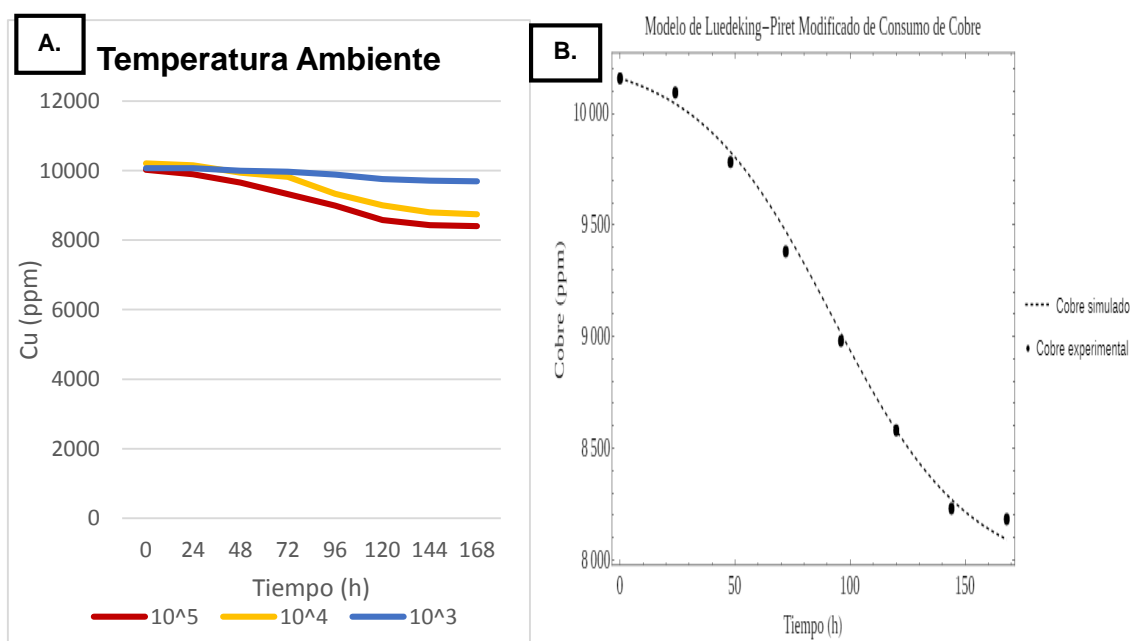


Figura 9: Reducción de cobre empleando el Modelo ajustado

Nota: La Grafica nos muestra: Figura A. Datos experimentales obtenidos de la Reducción de cobre (ppm) (Tabla 8) a temperatura ambiente que se empleó diferentes concentraciones del *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Figura B. Comparación de Datos Experimentales de la tabla 8 y Datos Simulados de la tabla 10 obtenidos del modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4, se comparó la Reducción de cobre (ppm) experimental (.) y simulado (...) para la concentración 10^4 a 35°C . Obteniendo un Coeficiente de determinación $R^2 = 0.995075$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 11: Datos experimentales a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 30°C

t (h)	$10^{(5)}$	$10^{(4)}$	$10^{(3)}$
0	10128.1952	10058.7245	10065.2734
24	9862.8842	9946.8261	10042.1152
48	9611.6368	9842.2357	9992.623
72	9313.8275	9592.2736	9863.7624
96	8852.992	9431.8241	9722.9915
120	8464.8825	8896.662	9597.8724
144	8372.6227	8482.9372	9421.9925
168	8321.5722	8442.737	9386.831

Nota: Datos experimentales obtenido de la reducción de cobre (ppm) a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 30°C

Tabla 12: Datos obtenidos de la Simulación a concentración de 10^3 de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 35°C

"Tiempo (h) "	"Cobre (ppm) "
0	10083.8231`
24	10064.408146307867`
48	10017.018373386802`
72	9911.4870684755`
96	9717.909354445592`
120	9462.924539754953`
144	9241.533060832582`
168	9108.870437803125`

Nota: Datos Simulados empleando el modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4 para la reducción de cobre (ppm) a 10^3 de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 35°C

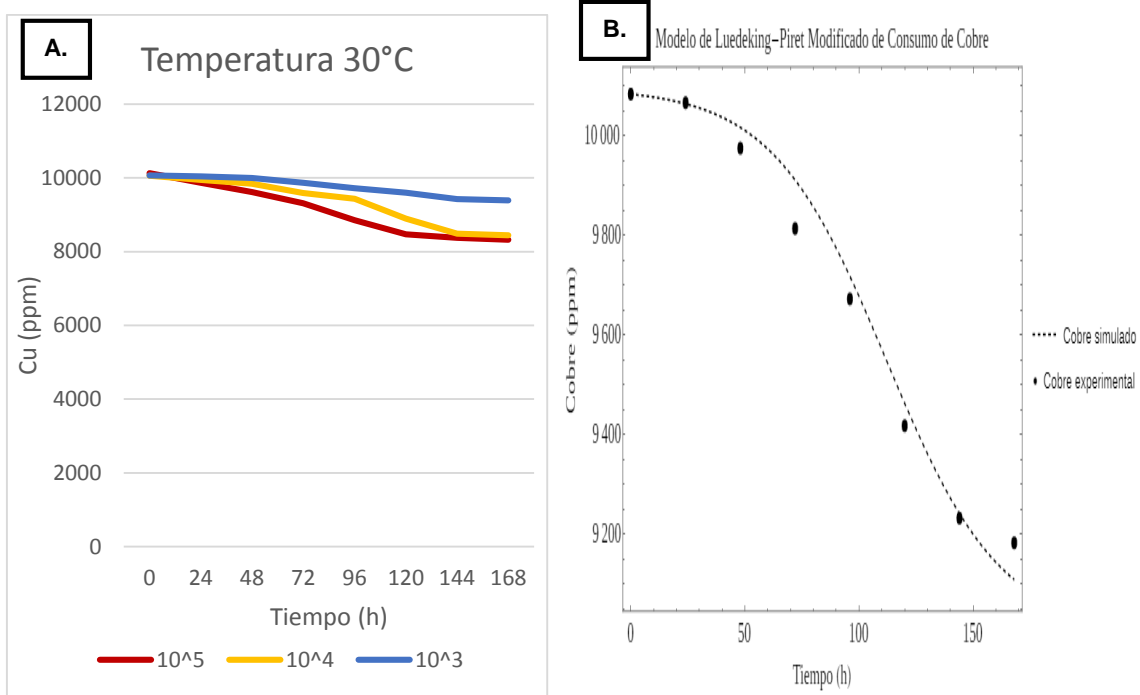


Figura 10: Reducción de cobre empleando el Modelo ajustado

Nota: La Grafica nos muestra: Figura A. Datos experimentales (Tabla 11) de la Reducción de cobre (ppm) a temperatura 30°C que se empleó diferentes concentraciones del *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Figura B. Comparación de los datos experimentales de la tabla 11 y datos simulados de la tabla 12, empleando el modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4. Ppm experimental (.) y simulado (...) para la concentración 10^3 a 35°C. Obteniéndose un Coeficiente de determinación $R^2 = 0.985202$ Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 13: Datos Experimentales obtenidos de la biolixiviación de Cobre (ppm) a temperatura 35°C

t (h)	$10^{(5)}$	$10^{(4)}$	$10^{(3)}$
0	10180.9342	10157.2346	10083.8231
24	9992.1528	10093.8231	10066.5676
48	9691.3262	9782.2367	9975.236
72	9201.518	9381.5334	9813.9262
96	8892.1523	8980.8967	9672.5382
120	8477.1927	8579.96	9417.8263
144	8296.4933	8229.4933	9232.2974
168	8221.8366	8181.8366	9182.6638

Nota: Datos experimentales obtenido de la reducción de cobre (ppm) a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 35°C

Tabla 14: Datos Experimentales obtenidos de la biolixiviación de Cobre (%) a temperatura 30°C

t (h)	10 ⁵	10 ⁴	10 ³
0	33.7606507	33.5290817	33.5509113
24	32.8762807	33.156087	33.4737173
48	32.0387893	32.8074523	33.3087433
72	31.0460917	31.9742453	32.879208
96	29.5099733	31.4394137	32.4099717
120	28.216275	29.65554	31.992908
144	27.9087423	28.2764573	31.4066417
168	27.738574	28.1424567	31.2894367

Nota: Datos experimentales obtenido de la reducción de cobre (%) a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 30°C

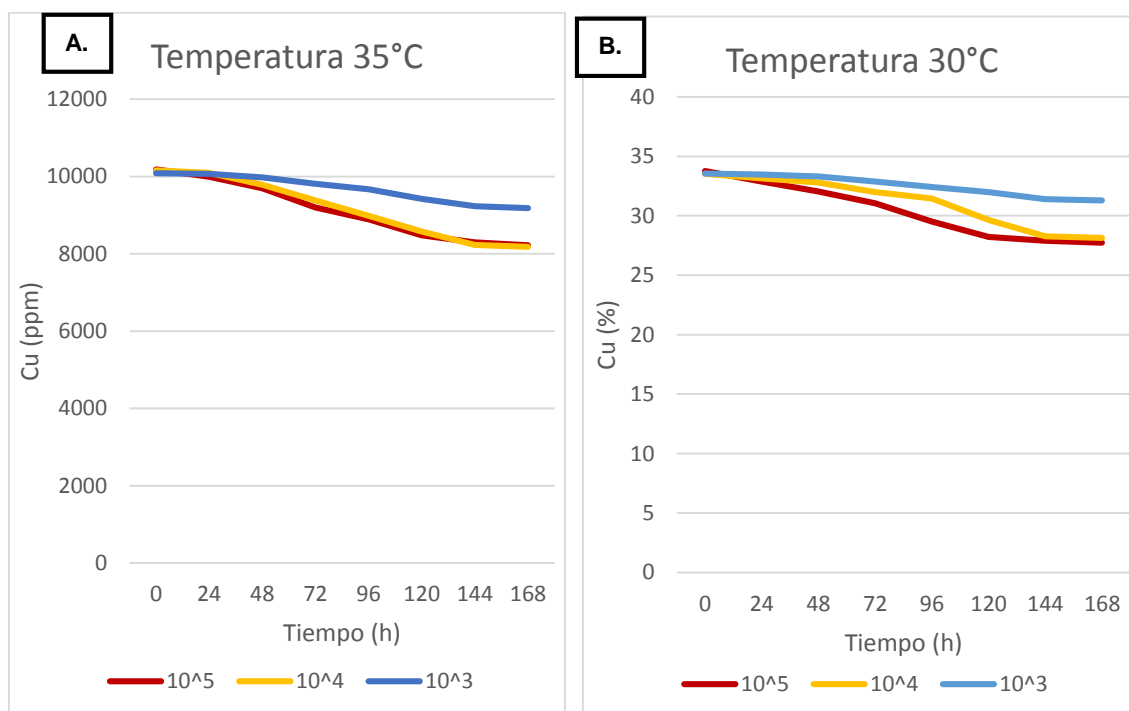


Figura 11: Reducción de cobre ppm y porcentaje a 30 y 35°C

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de los datos experimentales de la tabla 13 y la tabla 14: Figura A. Reducción de cobre (ppm) a temperatura 35°C que se empleó diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Figura B. Reducción de Cobre (%) a Temperatura 30°C, empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Tabla 15: Datos Experimentales a temperatura ambiente para la biolixiviación de cobre

t (h)	10 ⁽⁵⁾	10 ⁽⁴⁾	10 ⁽³⁾
0	10021.3783	10201.5326	10072.1352
24	9892.8842	10146.8723	10066.1936
48	9651.7264	9942.23312	9992.624
72	9325.9275	9822.2612	9963.1172
96	8992.4359	9331.8996	9882.7237
120	8573.9261	8996.665	9757.8263
144	8432.2438	8799.962	9711.263
168	8401.5832	8741.8251	9686.9426

Nota: Datos experimentales a temperatura ambiente para la biolixiviación de cobre a diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

Tabla 16: Datos obtenidos de la simulación (ppm) en Wolfram mathematica 10.4 a temperatura ambiente para la biolixiviación de cobre

"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	A.	"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	B.
0	10021.3783`		0	10201.5326`	
24	9789.178773087153`		24	10113.44588005341`	
48	9531.694438965133`		48	9960.767437360157`	
72	9260.366458450588`		72	9724.603647444243`	
96	8989.314284936536`		96	9416.715875209202`	
120	8732.493449084863`		120	9093.81793769031`	
144	8500.92939025769`		144	8823.975115587426`	
168	8301.112986724558`		168	8638.077543224157`	
	"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	C.		
	0	10072.1352`			
	24	10060.20632340171`			
	48	10028.921687443362`			
	72	9961.304672934753`			
	96	9860.763065013622`			
	120	9769.620759691792`			
	144	9713.993702218444`			
	168	9683.851174973466`			

Nota: Se empleó para la reducción de Cobre un Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre para el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4 obteniendo diferentes simulaciones. Tabla A. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10⁵. Tabla B. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10⁴. Tabla C. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10³.

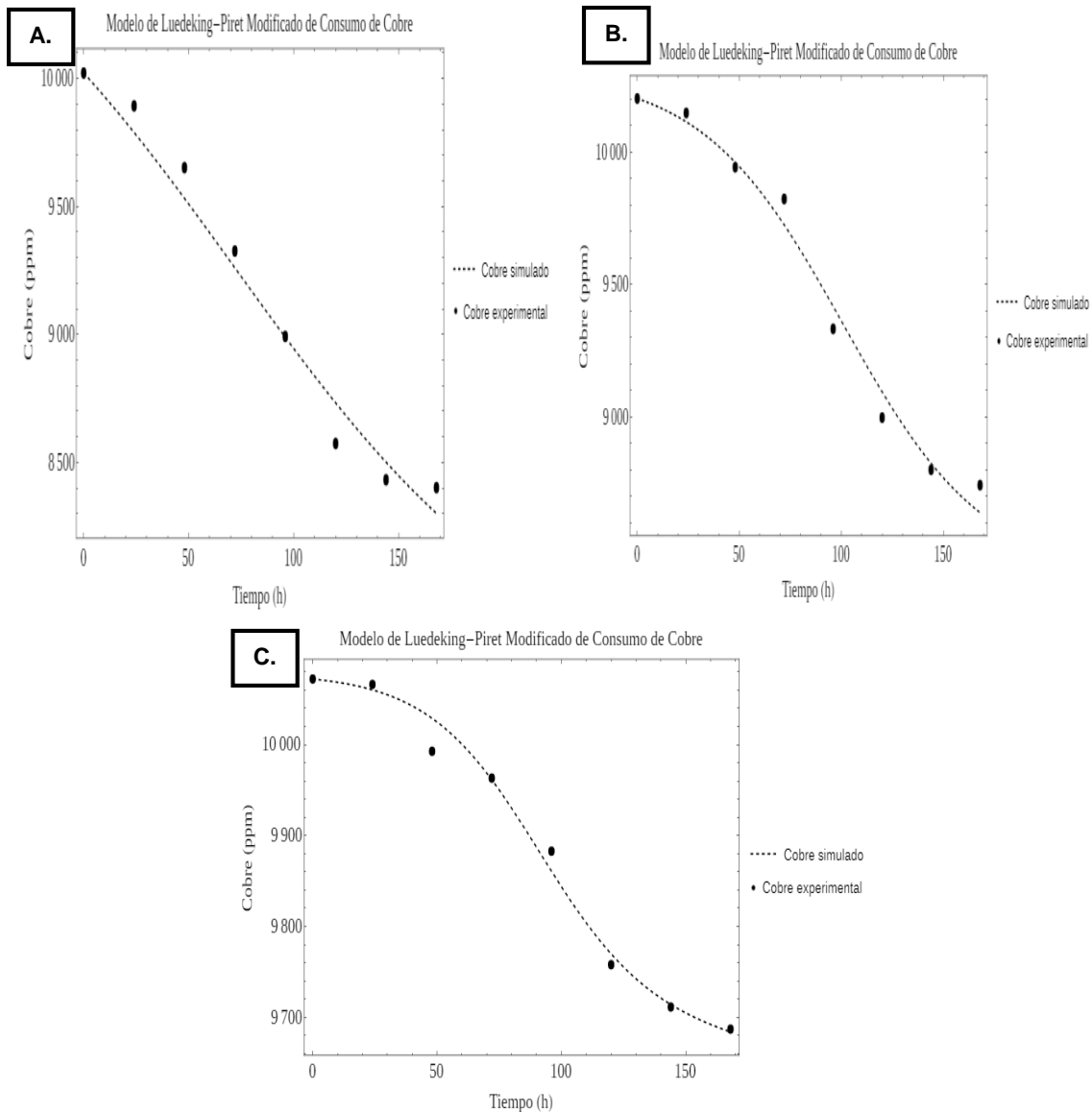


Figura 12: Reducción de Cobre (ppm) experimental y simulado a temperatura ambiente

Nota: La Grafica nos muestra la reducción de cobre experimental (.) de la tabla 15 y simulado (...) de la tabla 16 con el Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4: Figura A. Concentración 10^5 a Temperatura Ambiente, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.980818$

Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura B. Concentración 10^4 a Temperatura Ambiente, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98477$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura C. Concentración 10^3 a Temperatura Ambiente, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.988897$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 17: Datos Experimentales obtenidos a 30°C para la biolixiviación de cobre

t (h)	10 ⁽⁵⁾	10 ⁽⁴⁾	10 ⁽³⁾
0	10128.1952	10058.7245	10065.2734
24	9862.8842	9946.8261	10042.1152
48	9611.6368	9842.2357	9992.623
72	9313.8275	9592.2736	9863.7624
96	8852.992	9431.8241	9722.9915
120	8464.8825	8896.662	9597.8724
144	8372.6227	8482.9372	9421.9925
168	8321.5722	8442.737	9386.831

Tabla 18: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a 30°C para la biolixiviación de cobre

"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	A.	"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	B.
0	10128.1952`		0	10058.7245`	
24	9872.9503317403`		24	9983.69951255655`	
48	9587.739107011686`		48	9841.227127869217`	
72	9282.244567015514`		72	9604.259144411648`	
96	8969.499795606342`		96	9281.537975959924`	
120	8663.817204089046`		120	8933.318780731188`	
144	8378.262515646098`		144	8621.880527780202`	
168	8122.572679255095`		168	8364.761659107957`	
"Tiempo (h)"	"Cobre (ppm)"	C.			
0	10065.2734`				
24	10050.383405303484`				
48	10015.623537604939`				
72	9940.72928865225`				
96	9803.956162737777`				
120	9615.92767303251`				
144	9437.838024708653`				
168	9319.684826111583`				

Nota: Se empleó para la reducción de Cobre un Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre para el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4 obteniendo diferentes simulaciones. Figura A. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10⁵. Figura B. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10⁴. Figura C. Datos obtenidos de la simulación a concentración 10³.

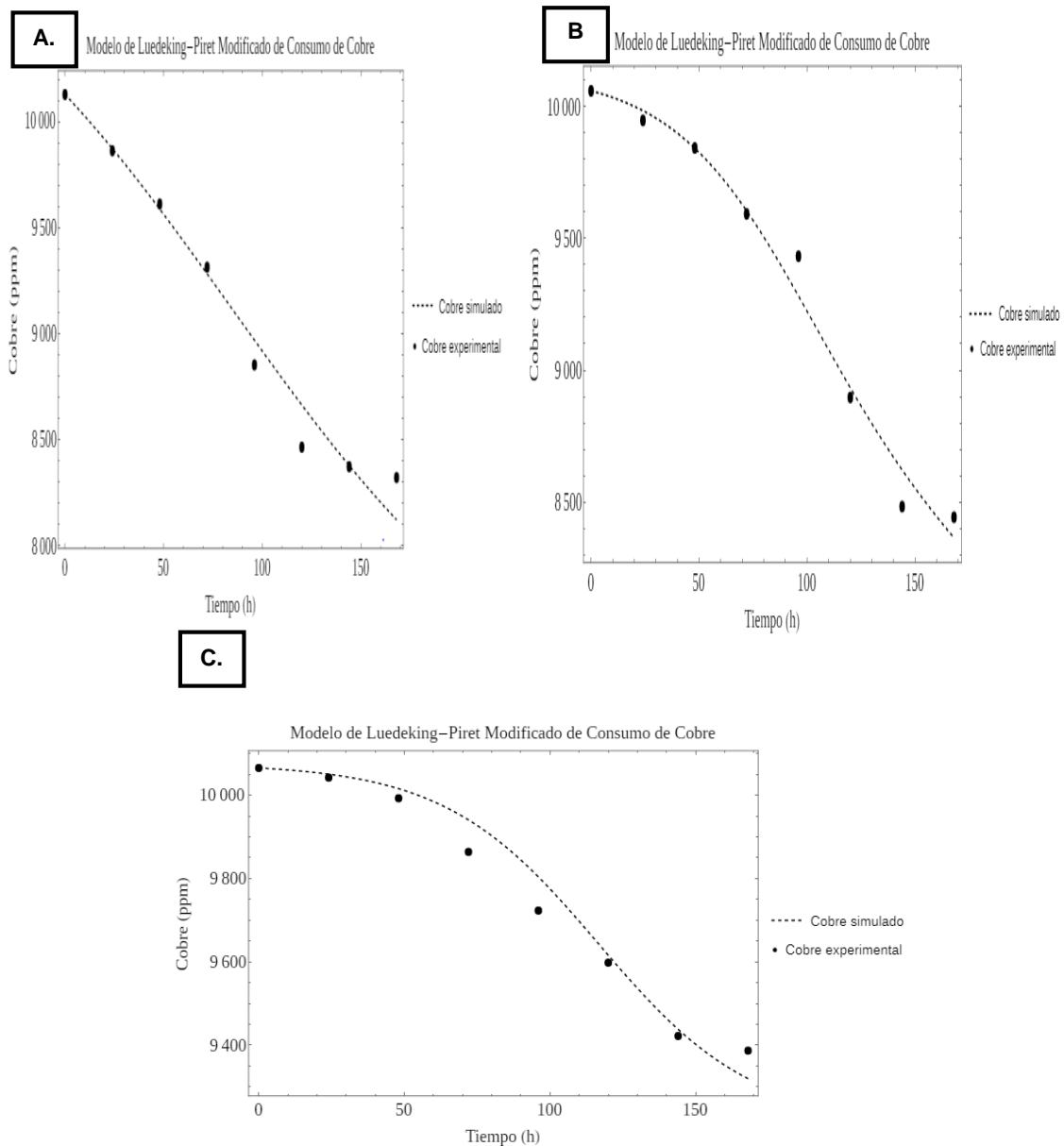


Figura 13: Reducción de cobre (ppm) experimental y simulado a 30°C

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de la reducción de cobre experimental (.) de la tabla 17 y simulado (...) de la tabla 18 con el Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4: Figura A. Concentración 10⁵ a 30°C, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.974019$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura B. Concentración 10⁴ a 30°C, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.982748$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado. Figura C. Concentración 10³ a 30°C, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.97724$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

Tabla 19: Datos experimentales obtenidos a concentración de 10^5 para la biolixiviación de cobre a temperatura 35°C

t (h)	$10^{(5)}$
0	10180.9342
24	9992.1528
48	9691.3262
72	9201.518
96	8892.1523
120	8477.1927
144	8296.4933
168	8221.8366

Nota: Datos experimentales obtenidos a una concentración de 10^5 *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura de 35°C

Tabla 20: Datos obtenidos de la simulación en Wolfram mathematica 10.4 a concentración de 10^5 para la biolixiviación de cobre a temperatura 35°C

"Tiempo (h) "	"Cobre (ppm) "
0	10180.9342`
24	9895.358159285714`
48	9576.968165506843`
72	9242.277250184352`
96	8911.522080995152`
120	8604.016125789889`
144	8333.933626019973`
168	8108.318703073266`

Nota: Datos Simulados obtenidos en Wolfram mathematica 10.4 empleando un Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre a una concentración de 10^5 *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura de 35°C

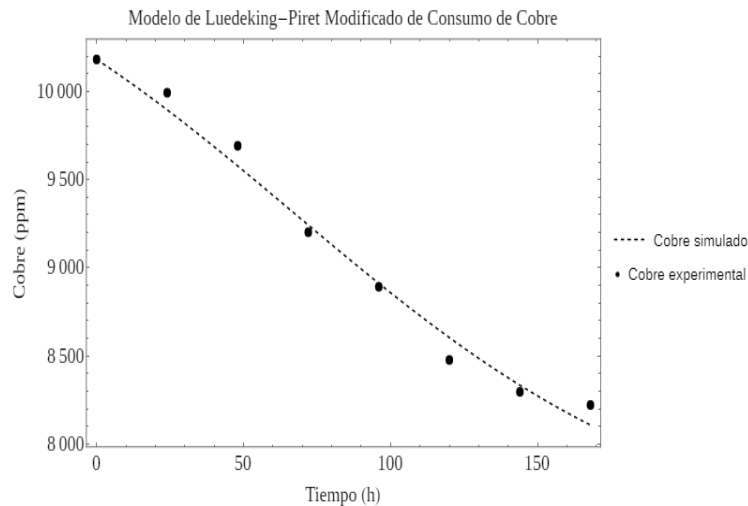


Figura 14: Reducción de cobre (ppm) experimental y simulado para la concentración 10^5 a 35°C

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de la reducción de cobre experimental (.) de la tabla 19 y simulado (...) de la tabla 20 con el Modelo de Luedeking-Piret modificado para cobre en el programa de Wolfram mathematica 10.4 a concentración 10^5 a 35°C , obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.987858$. Los datos experimentales se ajustan al modelo empleado.

4.1.5. Porcentaje de la Reducción de Cobre

Se observó la reducción de cobre (%) empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* (10^5 , 10^4 y 10^3) a distintas temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) (Tabla 31 Anexos 6)

Tabla 21: Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura Ambiente

t (h)	10^5	10^4	10^3
0	33.4045943	34.0051087	33.573784
24	32.9762807	33.8229077	33.5539787
48	32.1724213	33.1407771	33.3087467
72	31.086425	32.7408707	33.2103907
96	29.9747863	31.106332	32.9424123
120	28.5797537	29.9888833	32.5260877
144	28.1074793	29.3332067	32.3708767
168	28.0052773	29.139417	32.2898087

Tabla 22: *Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de Acidithiobacillus ferrooxidans a 35°C de temperatura*

t (h)	10 ⁵	10 ⁴	10 ³
0	33.9364473	33.8574487	33.6127437
24	33.307176	33.646077	33.5552253
48	32.3044207	32.6074557	33.2507867
72	30.6717267	31.271778	32.7130873
96	29.6405077	29.9363223	32.241794
120	28.257309	28.5998667	31.3927543
144	27.6549777	27.4316443	30.7743247
168	27.406122	27.2727887	30.6088793

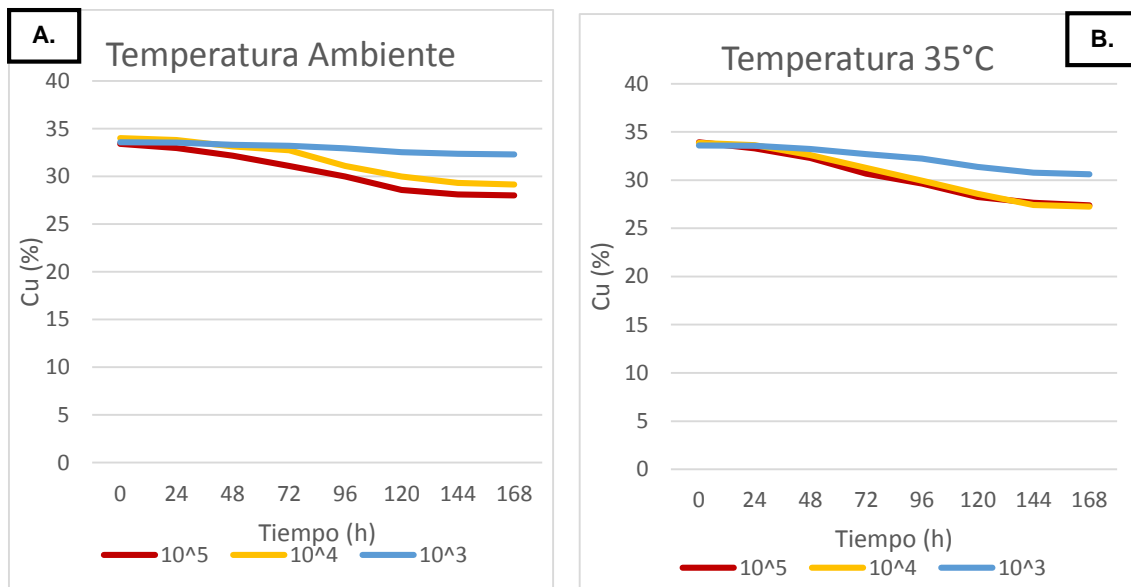


Figura 15: *Reducción de cobre en porcentajes a diferentes temperaturas*

Nota: La Grafica nos muestra la comparación de la reducción de cobre: Figura A. Reducción de Cobre (%) empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura ambiente.

Figura B. Reducción de Cobre (%) empleando diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a 35°C de temperatura.

4.2. DISCUSIÓN

En la cinética de crecimiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, se utilizó el medio 9k, empleando como fuente de carbono al sulfato ferroso heptahidratado, ya que, es fundamental para el crecimiento de la bacteria. Se tomaron datos cada 24 horas hasta las 168 horas (Tabla 04), se observó un mayor incremento en la biomasa a temperatura 35°C, a una concentración 10^4 a comparación de las demás temperaturas y concentraciones, debido a que tiene un pH ácido (2.0) y su tolerancia a altas temperaturas, que hace que se adapte a estas condiciones ambientales y sea la óptima para su crecimiento.

En el Análisis Estadístico en Wolfram mathematica 10.4, se realizó una comparación de la biomasa experimental (Tabla 04) y la biomasa simulada (Tabla 07) empleando un Modelo logístico de crecimiento microbiano, logrando ser más eficaz para el crecimiento la temperatura de 35°C a una concentración 10^4 y obteniendo un coeficiente de determinación menor que 1 que nos indica que los datos experimentales obtenidos se ajustan al modelo empleado.

Según (García, 2018), las aguas residuales provenientes de actividades mineras representan un importante desafío ambiental. Sin embargo, se ha identificado que las bacterias presentes en estas aguas, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, pueden ser empleadas para mitigar su impacto negativo, ya que, tiene una tolerancia a temperaturas altas y se adapta a condiciones excesivas de acidez en las minas. Este enfoque biotecnológico, conocido como biolixiviación, no solo contribuye a la recuperación de metales valiosos como el cobre, sino que también ayuda a reducir la contaminación ambiental asociada a dichas aguas, promoviendo una solución más sostenible frente a este problema.

La Biolixiviación de cobre se realizó por 168 horas (7 días) a diferentes concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3) de *Acidithiobacillus ferrooxidans* y a diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C), con la finalidad de reducir cobre de los circuitos electrónicos empleados, los datos obtenidos por la espectrofotometría de absorción atómica (Tabla 08), observamos que la mayor reducción fue empleando la temperatura de 35°C a una concentración de 10^4 obteniendo 8181.8366 de ppm, esto es debido, a que esta bacteria tiene una mayor capacidad para tolerar la acidez, se adapta a temperatura altas y siendo que esta sea la más óptima condición ambiental, ya que, tiene una mayor actividad catalítica que permite que reduzca más el cobre, a comparación de las otras temperaturas utilizadas.

Según (Suarez, 2018), el modelo de Luedeking-Piret modificado, es la perspectiva más válida para la mejora de las ecuaciones cinéticas, los encargados de hacer el modelo fueron Robert Luedeking y Edgar Piret, ellos proyectaron este modelo cinético y emplearon dos constantes alfa y beta que están involucradas al crecimiento y pH que se pueda encontrar. Así mismo, se emplean para observar la etapa estacionaria como la exponencial, se emplea este modelo con la finalidad de que los datos experimentales se ajusten a lo simulado de diferentes programas que se pueden emplear con este modelo.

El Programa Wolfram mathematica 10.4, nos permitió emplear el Modelo de Luedeking-Piret modificado para el cobre con la finalidad de comparar los datos experimentales que se obtuvo en la espectrofotometría de absorción atómica y los datos simulados del programa que se obtuvo en las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) y concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3), en el cual, el coeficiente de determinación nos indicó que los datos experimentales se ajustan al modelo empleado en las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) y concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3) de la bacteria empleada, así mismo, podemos deducir que la biolixiviación a estas condiciones es de mucha ayuda para la reducción de cobre.

El modelo se ajusta, quiere decir que nuestros datos experimentales obtenidos y simulados se aproximan a 1, esto se debe que coinciden en la comparación y es un buen ajuste para el coeficiente de determinación.

Según (Sandoval et al., 2015), demostró que sus cultivos mixtos (*Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC 23270 y *Acidithiobacillus thiooxidans* DSM 9463) presentan la mejor actividad para solubilizar Ni y Cu desde los scraps a 240 horas de incubación, logrando así obtener una cantidad de Ni y Cu 211.8 y 9.685 mg/L que es un porcentaje del 58.8 y 65% del contenido total de los scraps.

Adicionalmente se observó una adhesión bacteriana sobre la superficie de los circuitos electrónicos. Los resultados obtenidos mostraron que la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* presenta una notable actividad catalítica para reducir el cobre en los circuitos electrónicos a 168 horas de incubación. Se logró reducir el cobre en un mayor porcentaje de 27.2727887% a temperatura 35°C a concentración 10^4 de *Acidithiobacillus ferrooxidans* demostrando que el contenido vertido de los circuitos electrónicos 10gr fue el que más presentó una mayor reducción de cobre (Tabla 22).

Se observó un leve crecimiento bacteriano en algunas superficies de los circuitos electrónicos. Los circuitos electrónicos fueron sometidos a biolixiviación en botellas como recipiente, en medio 9k a un pH de 2.0 aproximadamente, la concentración de cobre obtenido fue determinado por absorción atómica y se encontró que la concentración 10^4 de *Acidithiobacillus ferrooxidans* a temperatura 35°C fue el óptimo, debido a que la bacteria tiene una mayor tolerancia a este medio de cultivo ácido, condiciones ambientales con altas temperaturas y tiene una mayor actividad catalítica que a 30°C y temperatura ambiente, ya que, en dichas temperaturas no son las óptimas para su crecimiento bacteriano.

En la Tabla 21, se observó que la temperatura menos óptima fue la temperatura ambiente, ya que, se obtuvo el porcentaje más bajo de la reducción de cobre fue de 32.2898087% en la concentración 10^3 de *Acidithiobacillus ferrooxidans*, siendo esta la concentración menos óptima,

debido a que las condiciones ambientales no son las adecuadas y hay una menor actividad catalítica del microorganismo empleado, a comparación de la que se empleó a una temperatura de 35°C que fue la óptima.

Según (Suarez, 2018), el modelo logístico, se adecua a las cinéticas en donde se pueden observar las etapas de adaptación, crecimiento exponencial y estacionario, con la finalidad de evaluar el crecimiento microbiano.

El Programa Wolfram mathematica 10.4, nos permitió emplear un Modelo logístico de crecimiento microbiano con la finalidad de comparar los datos experimentales que se obtuvo y los datos simulados del programa que se obtuvo en las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) y concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3), en el cual el coeficiente de determinación, mostró que los datos experimentales se ajustan al modelo empleado en las diferentes temperaturas (Ambiente, 30°C y 35°C) y concentraciones (10^5 , 10^4 y 10^3) de la bacteria empleada.

El modelo se ajusta, quiere decir que nuestros datos experimentales obtenidos y simulados se aproximan a 1, esto se debe que coinciden en la comparación y es un buen ajuste para el coeficiente de determinación.

Los modelos matemáticos empleados en la simulación del crecimiento microbiano y la biolixiviación de cobre con *Acidithiobacillus ferrooxidans* ofrecen herramientas útiles para describir la dinámica del proceso. El modelo logístico permite representar el crecimiento bacteriano en condiciones de recursos limitados, mientras que el modelo de Luedeking-Piret modificado relaciona la producción de metabolitos con la actividad microbiana. Sin embargo, presentan limitaciones al no considerar factores ambientales como la inhibición por concentraciones elevadas de cobre, cambios en pH y temperatura, lo que puede afectar la precisión de las predicciones en condiciones industriales.

V. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se logró aislar la bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, proveniente de una muestra de las aguas ácidas de relave minero.
- Se logró evaluar el efecto de las diferentes concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* (10^3 , 10^4 , 10^5 UFC/mL) y temperaturas (ambiente, 30 °C, 35 °C) en la cinética de biolixiviación del cobre presente en los circuitos electrónicos, obteniendo la más óptima para su crecimiento la temperatura 35°C a una concentración 10^4 .
- Se determinó los parámetros cinéticos (μ , Y_x/s , Y_p/s , Q_x , Q_p) asociados al proceso de biolixiviación bajo las condiciones experimentales de concentración bacteriana y temperatura, se observó un mayor incremento en la biomasa a temperatura 35°C a una concentración 10^4 a comparación de las demás temperaturas y concentraciones, debido a que tiene una gran tolerancia al medio ácido y la capacidad de crecimiento en altas temperaturas, que permite que estas condiciones ambientales sean las más óptima para su crecimiento.
- Se logró analizar estadísticamente el efecto de las combinaciones de temperatura y concentración bacteriana en la biolixiviación del cobre mediante técnicas de comparación entre tratamientos.
- Se logró establecer un modelo matemático que describa el proceso de biolixiviación en función de las variables experimentales y permitió identificar la combinación óptima de concentración y temperatura.
- Se determinó el porcentaje de reducción del cobre presente en circuitos electrónicos de celulares mediante biolixiviación utilizando *Acidithiobacillus ferrooxidans* bajo diferentes condiciones experimentales de temperatura y concentración bacteriana, obteniendo un porcentaje de 27.2727887% a temperatura 35°C a concentración 10^4 , demostrando que fue el que presentó una mayor reducción de cobre.
- Se cuantificó la cantidad de cobre extraído mediante biolixiviación, empleando el método de espectrofotometría de absorción atómica para validar la eficiencia del proceso, la mayor cuantificación obtenida fue

mediante la temperatura de 35°C a una concentración de 10⁴ obteniendo 8181.8366 de ppm, esto es debido, a que esta bacteria tiene una mayor capacidad para tolerar la acidez, se adapta a temperatura altas y siendo que esta sea la más óptima condición ambiental, ya que, tiene una mayor actividad catalítica que le permite cuantificar más el cobre, a comparación de las otras temperaturas utilizadas.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda el uso de *Acidithiobacillus ferrooxidans* para futuros ensayos de biolixiviación.
- Se recomienda emplear el modelo logístico de crecimiento microbiano para la cinética de crecimiento para un adecuado análisis estadístico.
- Se recomienda el uso de espectrofotometría atómica para la cuantificación del cobre para obtener resultados precisos.
- Se recomienda el empleo del medio 9K, para las bacterias acidófilas, ya que, es esencial para el crecimiento del *Acidithiobacillus ferrooxidans*.
- Se recomienda utilizar el modelo matemático de Luedeking-Piret modificado para la Biolixiviación de cobre para un adecuado análisis y comparación estadística.
- Se recomienda un pH \pm 2.0 en la recolección de muestra de agua ácida.
- Se recomienda realizar un preciso análisis económico para poder solventar los gastos.

VI. REFERENCIAS

- Beikzadeh. (Mayo de 2017). *Kinetic modeling of copper bioleaching from low-grade ore from the shahrbabak copper complex*. Recuperado el 19 de Diciembre de 2023, de Springer Link:
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12613-017-1443-0>
- Bernadeli et al. (Septiembre de 2017). *Biominería: Los microorganismos en la extracción y remediación de metales*. Recuperado el 11 de Diciembre de 2023, de Conicet: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/57998>
- Buricata et al. (01 de Diciembre de 2017). *Aislamiento de microorganismos en diferentes ambientes (suelo, agua, aire)*. doi:10.18041/2323-0312
- Colmer, A., & Temple, K. (Marzo de 1950). An Iron-Oxidizing Bacterium From The Acid Drainage Of Some Bituminous Coal Mines. *Journal of Bacteriology*, 59(3), 317-328. doi:10.1128/jb.59.3.317-328.1950
- De La Torre et al. (2015). *Los teléfonos celulares una nueva mina de metales preciosos*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2023, de Bibdigital:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5535/1/Ernesto-de-la-Torre.pdf>
- Galeana. (2011). *Reciclaje y afinación del oro a partir de chatarra electrónica*. Recuperado el 02 de Noviembre de 2023, de
<https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/17028>
- García, L. (2018). *Uso de bacterias acidófilas presentes en el drenaje ácido de minas (DAM) para la biolixiviación de cobre presente en placas de circuito impreso*. Recuperado el 28 de Agosto de 2023, de
Repository.javeriana.edu.co:
https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/50194/Tesis_Laura_Sofia_Garc%C3%ADa_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Greenpeace. (2011). *El lado tóxico de la telefonía móvil*. Recuperado el Octubre de 2018, de Greenpeace:
<https://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2010/3/basura-electronica-el-lado-toxico-de-la-telefonía-movil.pdf>
- Herrero, R. (03 de Mayo de 2015). *Bacterias mineras: biolixiviación o lixiviación bacteriana*. Recuperado el 17 de Marzo de 2023, de Triplenlace:

- <https://triplenlace.com/2015/05/03/bacterias-mineras-biolixiviacion-o-lixiviacion-bacteriana/>
- Herrero, R. (Julio de 2024). *Bacterias mineras: biolixiviación o lixiviación bacteriana*. Recuperado el 1 de Noviembre de 2024, de triplenlace: <https://triplenlace.com/2015/05/03/bacterias-mineras-biolixiviacion-o-lixiviacion-bacteriana/>
- Johnson, B. (Diciembre de 2014). *Biomining, biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.04.008>
- Kim et al. (2018). *Metal recovery from the mobile phone waste by chemical and biological treatments*. doi:<https://doi.org/10.3390/min8010008>
- Kumar et al. (Enero de 2018). *Enhancement of gold and silver recovery from discarded computer printed circuit boards by Pseudomonas balearica SAE1 using response surface methodology (RSM)*. doi:10.1007/s13205-018-1129-y
- Liang et al. (Marzo de 2015). *Enhanced bioleaching efficiency of copper from waste printed circuit boards (PCBs) by dissolved oxygen-shifted strategy in Acidithiobacillus ferrooxidans*. doi:10.1007/s10163-015-0375-x
- Malik, A. (Abril de 2024). *Metal bioremediation through growing cells*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.08.001>
- Misari et al. (Octubre de 2016). *Biolixiviación, técnicas de biolixiviación bacteriana en minerales*. Recuperado el 17 de Enero de 2024, de Osinergmin: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf
- Monge et al. (Agosto de 2008). *Biosorción de cobre en sistema por lote y continuo con bacterias aerobias inmovilizadas en zeolita natural (clinoptilolita)*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2023, de Scielo: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000300002
- Panduro et al. (2015). *Aislamiento de cepas de Acidithiobacillus ferrooxidans para la recuperación de metales de minerales sulfurados*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2023, de Repositorio.uncp.edu.pe: <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/3745/Pan>

duro%20Trinidad-

Pe%c3%b1a%20Quispealaya.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR3dt5Jo_eNwjKClRmBPZ9qmBD5XUxOKti5FBLVg4SSLnME1NXRpGe0Ojo

- Pérez, N. (2016). *Aislamiento y determinación de bacterias del género Acidithiobacillus y Leptospirillum presentes en las aguas residuales de las unidades mineras de Recuay - Huaraz*. Recuperado el 17 de Enero de 2024, de Repositorio.urp.edu.pe:
https://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14138/914/P%C3%A9rez_nm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Porhoussein. (2017). *Effect of heavy metals and bfrs concentration on the adaptation of Acidithiobacillus ferrooxidans for the led waste bioleaching*. Recuperado el 10 de Noviembre de 2023, de tib:
<https://www.tib.eu/en/search/id/ceaba%3ACEAB20180302217/Effect-of-heavy-metals-and-bfrs-concentration-on/>
- Ramírez. (2008). *Recuperación de Oro a partir de chatarra electrónica*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2023, de uaeh:
<https://www.uaeh.edu.mx/docencia/Tesis/icbi/licenciatura/documentos/Rcuperacion%20de%20oro%20a%20partir%20de%20chatarra%20electronica.pdf>
- Roman Leon, L. (2017). *Estudio de bacterias acidófilas ferrooxidantes presentes en mineral magnetita de toquepala, concentrado de piritita de poracota y agua de mina de cobre de Quiruvilca*. Recuperado el 18 de 03 de 2023, de Repositorio UPCH:
https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/1022/Estudio_RomanLeon_Betsabe.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=IwAR3iZR8pM0SfQklulrOzyof3tG5wYY_b14YTXMrKc7zkCJYznNP7w9ib9F4
- Saavedra, A., & Cortón, E. (2014). *Bioteología microbiana aplicada a la minería*. Recuperado el Julio de 2024, de
<http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v13n3/saavedra.htm>
- Sandoval et al. (Diciembre de 2015). *Recuperación de cobre y otros metales mediante bacterias acidofilas desde scraps de teléfonos móviles*.
doi:10.7603/s40682-015-0004-3

- Silverman et al. (1959). *Studies on the chemoautotrophic iron bacterium Ferrobacillus ferrooxidans*. doi:10.1128/jb.77.5.642-647.1959
- Suarez, D. (2018). *Análisis de datos cinéticos para la producción de ácido*. Recuperado el 12 de Enero de 2024, de Repository.uamerica.edu.co: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6766/1/6131978-2018-1-IQ.pdf>
- Valdés et al. (Diciembre de 2008). *Acidithiobacillus ferrooxidans metabolism: from genome sequence to industrial applications*. doi:10.1186/1471-2164-9-597
- Webster, S. (Marzo de 2016). *60 Centuries of copper*. Recuperado el Julio de 2018, de Copper Development Association Inc.: <https://www.copper.org/education/history/60centuries/#:~:text=Based%20on%20another%20UK%20CDA,the%20past%20six%20thousand%20years.>
- Weijin, W. (Diciembre de 2018). *Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacteria-free cultural supernatant of iron–sulfur-oxidizing bacteria*. doi:10.1186/s40643-018-0196-6

VII. ANEXOS

Anexo 1: *Materiales, Equipos y Reactivos*

Materiales

- 6 placas Petri
- 6 matraces
- 9 botellas de vidrio (500mL)
- Etanol 70%
- Agua destilada
- Asa bacteriológica
- Mechero
- Láminas y laminillas
- Celulares en desuso (Scraps)
- Cámara de Neubauer

Equipos

- Autoclave
- Incubadora
- Cámara de flujo laminar
- Espectroscopia de Absorción Atómica
- Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF)
- Shaker
- pH metro
- Microscopio

REACTIVOS

- Sulfato de Amonio
- Cloruro de Potasio
- Fosfato de potásico
- Sulfato de Magnesio Heptahidratado
- Nitrato de Calcio
- Sulfato ferroso Heptahidratado
- Sacarosa
- Agar

- Cristal violeta
- Lugol
- Safranina
- Aceite de inmersión
- Ácido Fosfórico

Anexo 2: *Composición química del medio 9k (300 mL)*

Tabla 23: *Solución A: Sales 9k para 190 mL de medio*

Compuesto	Fórmula	Cantidad
Sulfato de Amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.90 g
Cloruro de Potasio	KCl	0.30 g
Fosfato de potásico	K_2HPO_4	0.15 g
Sulfato de Magnesio Heptahidratado	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.15 g
Nitrato de Calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.002g
Agarosa		7.5 g
Agua Destilada		190 mL

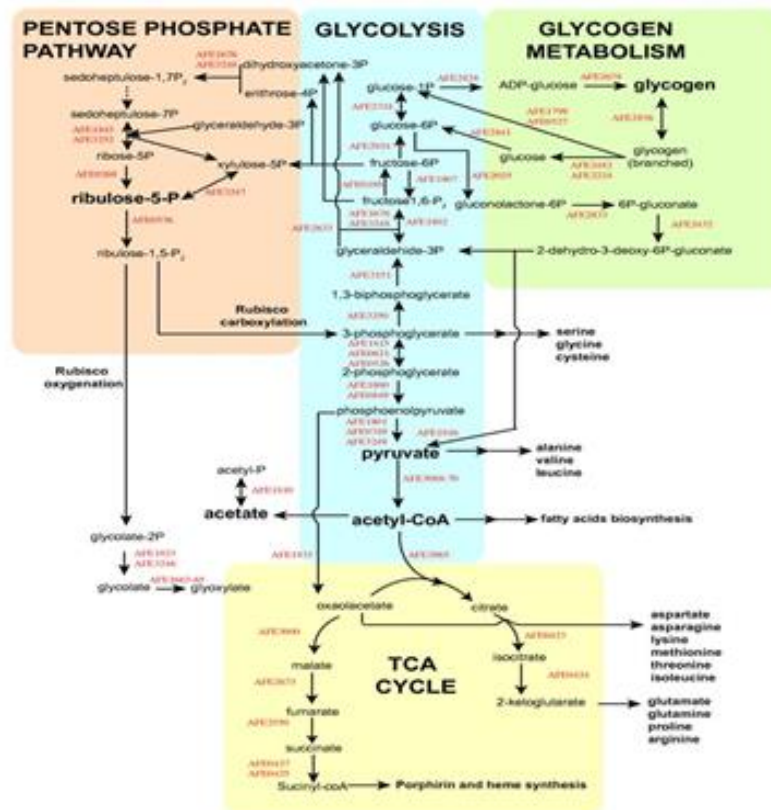
Tabla 24: *Solución B: Sulfato ferroso heptahidratado (110 mL)*

Compuesto	Fórmula	Cantidad
Sulfato ferroso heptahidratado	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	13.2 g
Agua Destilada		110 mL

Anexo 3: Diseño de medio de cultivo *Acidithiobacillus ferrooxidans*

ELEMEN TO	FUENTE	% CÉLULA	% NUTRIENTE		SO	
N	(NH ₄) ₂ SO ₄	12	10.601	0.883	3.397508494	0.5096262741
P	KH ₂ PO ₄	2.5	22.761	9.104	0.3295254833	0.0494288225
K	KCl	3	52.445	17.48 2	0.1716050795	0.02574076193
S	MgSO ₄ .7 H ₂ O	0.5	13.008	26.01 6	0.1153136531	0.01729704797
Mg	MgSO ₄ .7 H ₂ O	0.3	13.008	43.36	0.06918819188	0.01037822878
Fe	FeSO ₄ .7H ₂ O	0.1	20.089	200.8 9	0.01493354572	0.002240031858

Anexo 4: Mapa metabólico *Acidithiobacillus ferrooxidans*



Anexo 5: Recuento bacteriano en Cámara de Neubauer

Temperatura Ambiente

Tabla 25: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de *A. ferrooxidans* a temperatura ambiente

FÓRMULA=	$\frac{X \text{ Bacterias}}{Y \text{ Cuadros}}$	*	$\frac{\text{Cantidad de cuadros en la camara}}{\text{Volumen de la camara}}$	*	$\frac{1000 \text{ mm}^3}{1\text{cm}^3 \text{ (o 1ml)}}$
= x millones de bacterias/ml					
Conteo en la Cámara de Neubauer					
Bacterias contadas =46		Cantidad de cuadros en la camara = 400			
Cuadros en la camara de neubauer = 25		Volumen de la cámara Neubauer improved = 0.1 mm³			
7360000		x millones de bacterias/ml			

Tabla 26: Concentraciones de *A. ferrooxidans* a temperatura ambiente

10⁵	1.3587E-08 millones de bacterias/ml
10⁴	1.3587E-09 millones de bacterias/ml
10³	1.3587E-10 millones de bacterias/ml

Temperatura 30°C

Tabla 27: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de *A. ferrooxidans* a 30°C

FÓRMULA=	$\frac{X \text{ Bacterias}}{Y \text{ Cuadros}}$	*	$\frac{\text{Cantidad de cuadros en la camara}}{\text{Volumen de la camara}}$	*	$\frac{1000 \text{ mm}^3}{1\text{cm}^3 \text{ (o 1ml)}}$
= x millones de bacterias/ml					
Conteo en la Cámara de Neubauer					
Bacterias contadas =48		Cantidad de cuadros en la camara = 400			
Cuadros en la camara de neubauer = 25		Volumen de la cámara Neubauer improved = 0.1 mm³			
7680000		x millones de bacterias/ml			

Tabla 28: Concentraciones de *A. ferrooxidans* a 30°C

10⁵	1.30208E-08 millones de bacterias/ml
10⁴	1.30208E-09 millones de bacterias/ml
10³	1.30208E-10 millones de bacterias/ml

Temperatura 35°C

Tabla 29: Recuento bacteriano de la solución madre para las concentraciones de *A. ferrooxidans* a 35°C

<p>FÓRMULA=</p> $\frac{X \text{ Bacterias}}{Y \text{ Cuadros}} * \frac{\text{Cantidad de cuadros en la camara}}{\text{Volumen de la camara}} * \frac{1000 \text{ mm}^3}{1\text{cm}^3 \text{ (o 1ml)}}$ <p style="text-align: center;">= x millones de bacterias/ml</p>	
<p>Conteo en la Cámara de Neubauer</p>	
<p>Bacterias contadas =50</p> <p>Cuadros en la camara de neubauer = 25</p>	<p>Cantidad de cuadros en la camara = 400</p> <p>Volumen de la cámara Neubauer improved = 0.1 mm³</p>
<p>8000000 x millones de bacterias/ml</p>	

Tabla 30: Concentraciones de *A. ferrooxidans* a 35°C

10⁵	1.25E-08 millones de bacterias/ml
10⁴	1.25E-09 millones de bacterias/ml
10³	1.25E-10 millones de bacterias/ml

Anexo 6: Datos de Biolixiviación de Cobre en porcentajes

Tabla 31: Biolixiviación de Cobre (%) a distintas concentraciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans* para diferentes temperaturas

Reducción del Porcentaje de Cobre (ppm)									
	35 °C			30 °C			Ambiente		
t (h)	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ⁵	10 ⁴	10 ³	10 ⁵	10 ⁴	10 ³
0	33.9364473	33.8574487	33.6127437	33.7606507	33.5290817	33.5509113	33.4045943	34.0051087	33.573784
24	33.307176	33.646077	33.5552253	32.8762807	33.156087	33.4737173	32.9762807	33.8229077	33.5539787
48	32.3044207	32.6074557	33.2507867	32.0387893	32.8074523	33.3087433	32.1724213	33.1407771	33.3087467
72	30.6717267	31.271778	32.7130873	31.0460917	31.9742453	32.879208	31.086425	32.7408707	33.2103907
96	29.6405077	29.9363223	32.241794	29.5099733	31.4394137	32.4099717	29.9747863	31.106332	32.9424123
120	28.257309	28.5998667	31.3927543	28.216275	29.65554	31.992908	28.5797537	29.9888833	32.5260877
144	27.6549777	27.4316443	30.7743247	27.9087423	28.2764573	31.4066417	28.1074793	29.3332067	32.3708767
168	27.406122	27.2727887	30.6088793	27.738574	28.1424567	31.2894367	28.0052773	29.139417	32.2898087

Anexo 7: Panel Fotográfico



Figura 16: Preparación de la solución de ácido sulfúrico 10N (100ml)



Figura 17: Solución de ácido sulfúrico 10N



Figura 18: Solución A, se agregó 190 mL de agua destilada



Figura 19: Una vez pesado el reactivo, se agregó 110 mL de agua destilada



Figura 20: Acidificación de medio con ácido sulfúrico 10N



Figura 21: Vertido y siembra en el medio solido 9k



Figura 22: Incubación en la estufa a 30°C por 5 días

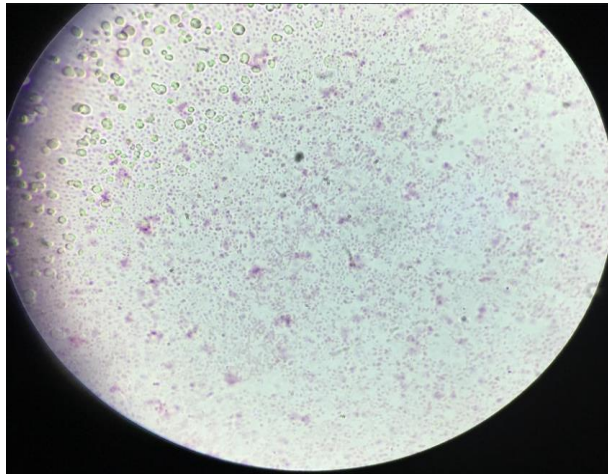


Figura 23: *Identificación de bacilos Gram negativos*



Figura 24: *Trituración de circuitos electrónicos (Scraps)*



Figura 25: *Preparación de medio 9k líquido para los ensayos de biolixiviación*



Figura 26: Preparación de las diluciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*



Figura 27: Concentraciones de *A. ferrooxidans* a cada medio 9k líquido



Figura 28: Se agregó 10g de scraps a cada tratamiento de *Acidithiobacillus ferrooxidans*



Figura 29: Muestreo cada 24h



Figura 30: Acidificación del medio 9k



Figura 31: Solución A y B mezcladas



Figura 32: Preparación de medio 9k líquido



Figura 33: Preparación de medio 9k para las replicas



Figura 34: Preparación de medio 9k para las replicas



Figura 35: Preparación de medio 9k para las replicas



Figura 36: Solución A y B mezcladas



Figura 37: Preparación de las diluciones de *Acidithiobacillus ferrooxidans*

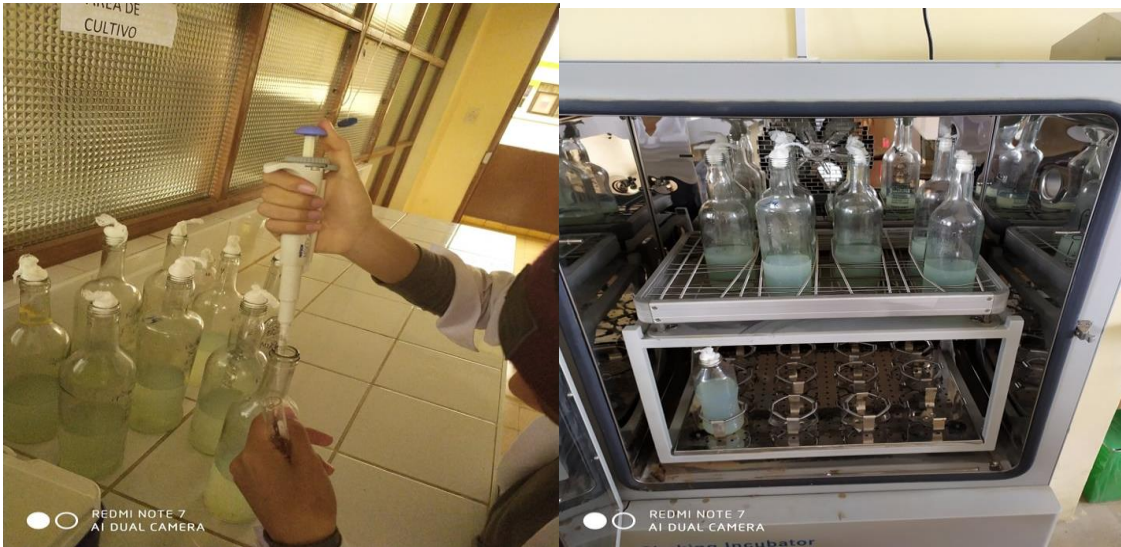


Figura 38: *Inoculación de las diluciones correspondiente e incubación en el shaker a 35° C*



Figura 39: *Trituración de scraps*



Figura 40: *Agregado de scraps e incubación en el shaker 30° C*



Figura 41: Muestreo cada 24h

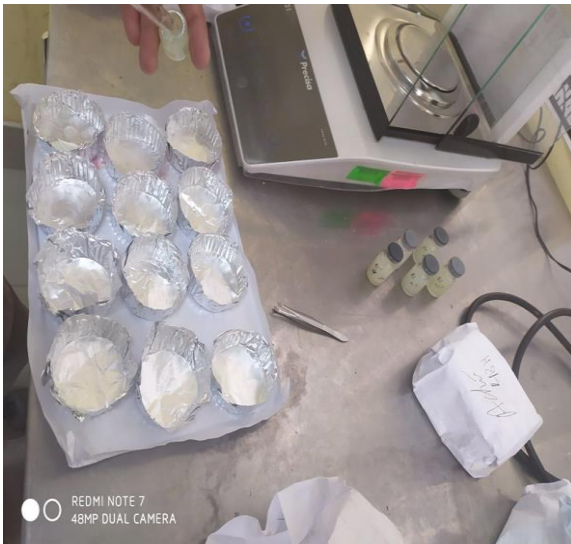


Figura 42: Peso seco sin biomasa



Figura 43: Peso seco con biomasa



Figura 44: *Biomasa*



Figura 45: *Preparación de medios 9k líquidos para replicas*



Figura 46: *Preparación de diluciones*



Figura 47: Muestreo cada 24h



Figura 48: Capachos en campana



Figura 49: Cámara de Neubauer

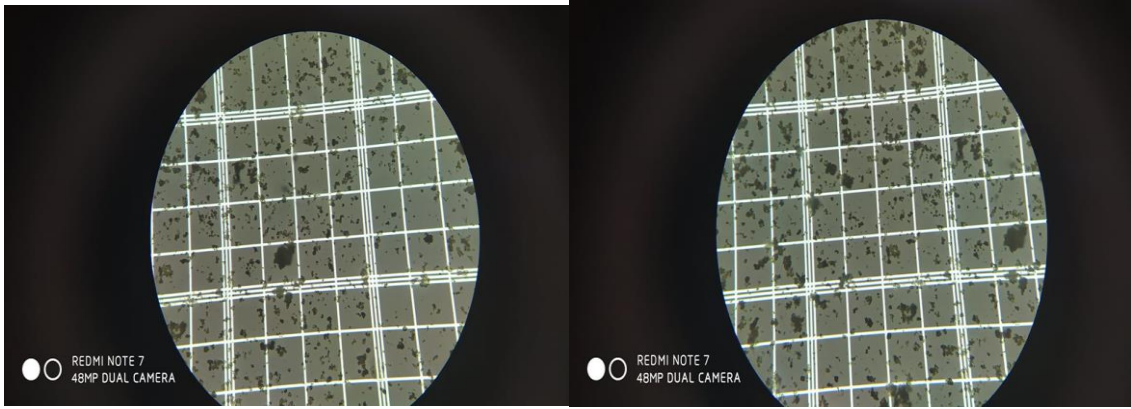


Figura 50: *Recuento en la cámara de Neubauer*

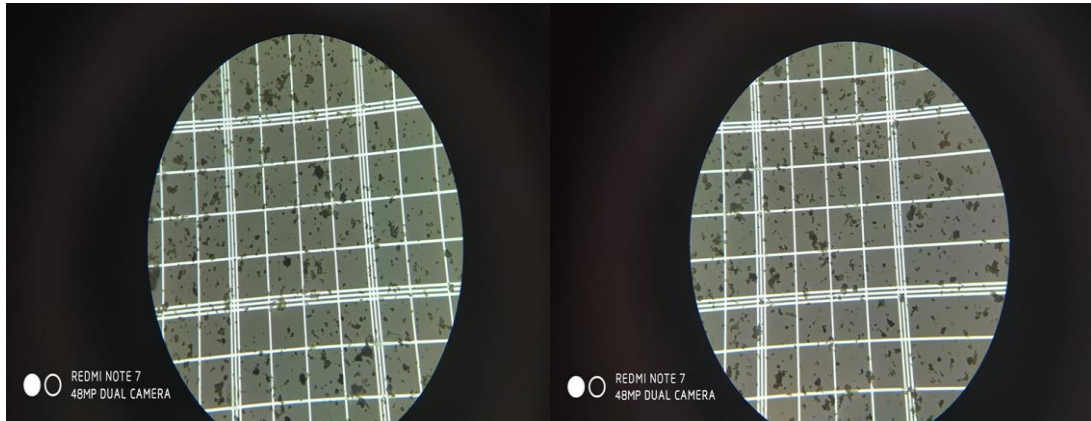


Figura 51: *Recuento en la cámara de Neubauer*