

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE QUÍMICA**



**TESIS**

**EVALUACIÓN DE LA INTERACCIÓN GALVÁNICA ENTRE MINERALES  
COMBINADOS CALCOPIRITA-MAGNETITA Y CALCOPIRITA-GALENA  
PARA LA SOLUBILIZACIÓN DEL COBRE**

**PRESENTADO POR:**

Br. BREDY OCHOA KORIKI

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL  
DE QUÍMICO**

**ASESORES:**

PhD. LYDA LA TORRE RIVEROS

Ing. JESÚS CARLOS ESPINOZA SANTOYO

**CUSCO-PERÚ**

**2025**



# Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

## INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** LYDA LA TORRE RIVEROS, PHD. Y ING. JESÚS CARLOS ESPINOZA SANTOYO quien aplica el software de detección de similitud al trabajo de Investigación/tesis titulada: EVALUACIÓN DE LA INTERACCIÓN GALVÁNICA ENTRE MINERALES COMBINADOS CALCOPIRITA - MAGNETITA Y CALCOPIRITA - GALENA PARA LA SOLUBILIZACIÓN DEL COBRE

Presentado por: BREDDY OCHOA KOBIRI DNI N° 61682872; presentado por: ..... DNI N°: ..... Para optar el título Profesional/Grado Académico de QUÍMICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7%.

### Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (x)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 15 de MAYO de 2026

  
Firma

Post firma LYDA LA TORRE RIVEROS, PHD.

Nro. de DNI 23994160

ORCID del Asesor 0000-0003-1352-4391



ING. JESÚS CARLOS ESPINOZA SANTOYO

DNI: 23819854

ORCID: 0000-0002-1870-950

#### Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 27259:558830923

# TESIS BREDY OCHOA KORIKI 19 feb 2026.docx

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

---

## Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:558830923

Fecha de entrega

19 feb 2026, 10:10 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

19 feb 2026, 10:56 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS BREDY OCHOA KORIKI 19 feb 2026.docx

Tamaño del archivo

39.1 MB

154 páginas

29.585 palabras

176.004 caracteres

# 7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

## Exclusiones


- ▶ N.º de coincidencias excluidas

## Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 4%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

### N.º de alerta de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**  
42 caracteres sospechosos en N.º de páginas  
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## **Dedicatoria**

Dedico esta tesis a mi querida familia, porque me han ayudado a ser quien soy hoy. Debo muchos de mis logros, incluido este, a su amor constante, enseñándome dedicación y perseverancia. Me inculcaron valores y principios y siempre me animaron a perseguir mis sueños.

Gracias, querida familia.

## Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los profesores del Departamento Académico de Química, especialmente a mis asesores, Ing. Jesús Carlos Espinoza Santoyo y Dra. Lyda La Torre Riveros, quienes, gracias a su profesionalismo, amplia experiencia, paciencia y gran amistad, me guiaron a culminar este trabajo de tesis.

Agradezco al Dr. Ignacio Gonzáles Martínez, de la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa-México, y al Dr. Albert Ulises Saavedra Olaya, de YPF Tecnología S.A. de Buenos Aires-Argentina, por su competencia, conocimiento y, sobre todo, por sus valiosas sugerencias, las cuales me permitieron mejorar considerablemente el contenido de esta tesis.

A la Mgt. Ana María Lechuga Chacón, por su destacada experiencia y profundo saber, quien me brindó su confianza y amistad, ofreciéndome siempre consejos valiosos para finalizar este trabajo de tesis.

Al Químico Melquiades Herrera Arivilca, por su gran conocimiento y profesionalismo, quien me brindó confianza y sus sabios consejos para culminar en el desarrollo de esta tesis.

A mi amigo Gabriel y compañeros, quienes fueron personas excepcionales. Agradezco especialmente a aquellos que me acompañaron durante el desarrollo de esta tesis.

A mis abuelos Tomás y Eva, a mi madre Yeni, a mis tíos Edgar y Elizabeth, y a mi primo Emmanuel Ronaldiño, a quienes agradezco eternamente su apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria.

## Índice

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos .....	ii
Índice de figuras.....	ix
Índice de tablas .....	xi
Resumen.....	xii
Abstract .....	xiii
Abreviaturas .....	xiv
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>	<b>4</b>
1.1. Descripción del problema .....	4
1.2. Formulación del problema .....	4
A) Problema general .....	4
B) Problemas específicos .....	5
1.3. Justificación de la investigación .....	5
1.4. Objetivos de la investigación.....	6
A) Objetivo general.....	6
B) Objetivos específicos .....	6
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>8</b>
2.1. Antecedentes internacionales.....	8
2.2. Antecedentes nacionales .....	11

2.3. Marco conceptual.....	12
2.3.1. Minerales y estructuras cristalinas .....	12
2.3.1.1. Grafito.....	12
2.3.1.2. Calcopirita.....	13
2.3.1.3. Magnetita .....	14
2.3.1.4. Galena .....	15
2.4. Procesos biohidrometalúrgicos .....	17
2.4.1. Biolixiviación.....	17
2.4.2. Soluciones bio-lixiviantes .....	17
2.5. Técnicas instrumentales .....	19
2.5.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y EDS.....	19
2.5.2. Difracción de rayos X (DRX).....	22
2.6. Conceptos básicos sobre electroquímica .....	24
2.6.1. Electroquímica .....	24
2.6.2. Celda electroquímica de tres electrodos .....	25
2.6.3. Doble capa, corriente faradaicas y no faradaicas.....	26
2.6.4. Potenciostato .....	27
2.7. Electroodos .....	28
2.7.1. Electrodo de trabajo .....	28
2.7.1.1. Electrodo de pasta de carbón (EPC) .....	28
2.7.2. Electrodo de referencia .....	29
2.7.3. Contraelectrodo.....	29

2.8. Técnicas electroquímicas .....	30
2.8.1. Potencial de circuito abierto (PCA) .....	30
2.8.2. Voltamperometría cíclica (VC).....	30
2.8.3. Interacciones galvánicas .....	33
2.9. Formulación de la hipótesis .....	35
A) Hipótesis general .....	35
B) Hipótesis específicas .....	35
2.10. Identificación de variables .....	36
2.10.1. Variables dependientes .....	36
2.10.2. Variables independientes .....	36
2.10.3. Variables intervinientes .....	36
2.11. Operacionalización de variables .....	37
<b>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>38</b>
3.1. Alcance de la investigación .....	38
3.2. Diseño de la investigación .....	38
3.3. Lugar de estudio.....	39
3.4. Muestras de minerales.....	40
3.4.1. Tipo de muestreo.....	40
3.5. Materiales, reactivos y equipos de laboratorio .....	40
3.5.1. Materiales.....	40

3.5.2. Reactivos.....	41
3.5.3. Equipos .....	42
3.6. Técnicas instrumentales para la caracterización de minerales.....	42
3.6.1. Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) .....	42
3.6.2. Difracción de rayos x (DRX).....	43
3.7. Técnicas de caracterización electroquímica de los minerales.....	43
3.7.1. Diseño y fabricación de electrodos.....	44
3.7.2. Fabricación del electrodo de pasta de carbón (EPC) .....	45
3.7.2.1. Preparación de la pasta de carbón.....	45
3.7.3. Fabricación de electrodos de pasta de carbón-minerales .....	46
3.7.3.1. Preparación de las pastas de carbón-minerales.....	46
3.7.3.2. Preparación de la pasta de carbón con diferentes proporciones de minerales .....	47
3.7.4. Caracterización electroquímica de EPC y EPC-minerales .....	48
3.7.4.1. Celda electroquímica y medio de cultivo microbiano .....	50
3.7.4.2. Potencial de circuito abierto (PCA) .....	51
3.7.4.3. Voltamperometría cíclica (VC).....	51
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>53</b>
4.1. Resultados de la caracterización de MEB-EDS y DRX de grafito y minerales .....	53
4.1.1. Resultados de la caracterización de MEB-EDS.....	53
Grafito.....	53
Calcopirita .....	56
Magnetita.....	58

Galena.....	60
4.2. Resultados de la difracción de rayos X (DRX).....	62
4.3. Resultado de la fabricación de EPC y EPC-minerales.....	67
4.3.1. Fabricación de EPC.....	67
4.3.2. Fabricación de EPC-minerales.....	67
4.4. Resultados de la caracterización electroquímica .....	68
4.4.1. Caracterización electroquímica de EPC y EPC-minerales .....	68
4.4.1.1. Potencial de circuito abierto (PCA) .....	68
4.4.1.1.1. Potencial de circuito abierto (PCA) de EPC .....	68
4.4.1.1.2. Potencial de circuito abierto (PCA) de EPC-minerales .....	68
4.4.1.2. Voltamperometría cíclica (VC).....	70
4.4.1.2.1. Voltamperometría cíclica (VC) de EPC.....	70
4.4.1.2.2. Voltamperometría cíclica (VC) de EPC-minerales.....	72
Calcopirita .....	72
Magnetita .....	77
Galena.....	79
Mezcla Calcopirita - Magnetita .....	84
Mezcla Calcopirita - Galena.....	87
4.4.1.3. Diagrama de Evans .....	92
4.5. Resultados de identificación del efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados.....	100
4.5.1. Análisis del diagrama de Evans y sus repercusiones en procesos de lixiviación de cobre.....	100
4.5.2. Comportamiento del sistema calcopirita-magnetita.....	100
4.5.3. Comportamiento del sistema calcopirita-galena.....	102

4.5.4. Repercusiones practicas e industriales .....	102
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>104</b>
5.1. Conclusiones .....	104
5.2. Recomendaciones .....	106
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>132</b>
Anexo 1 .....	132
Anexo 2 .....	134
Anexo 3 .....	136

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Representación esquemática de la estructura del grafito.....	13
<b>Figura 2</b> Estructura de la calcopirita. ....	14
<b>Figura 3</b> Estructura cristalina de la magnetita. ....	15
<b>Figura 4</b> Estructura cristalina de la galena. ....	16
<b>Figura 5</b> Microscopía electrónica de barrido (MEB).....	20
<b>Figura 6</b> Difracción de rayos X.....	23
<b>Figura 7</b> Difractograma típica de rayos X. ....	24
<b>Figura 8</b> Celda electroquímica de tres electrodos.....	26
<b>Figura 9</b> Diagrama esquemático de la celda tres electrodos.....	27
<b>Figura 10</b> Perfil de potencial en función del tiempo.....	31
<b>Figura 11</b> Voltamperograma cíclico. ....	32
<b>Figura 12</b> Diagrama de interacción galvánica entre minerales.....	34
<b>Figura 13</b> Diagrama del diseño experimental.....	39
<b>Figura 14</b> Diseño y fabricación del electrodo.....	44
<b>Figura 15</b> Preparación del EPC.....	45
<b>Figura 16</b> Preparación de los diferentes EPC-minerales. ....	47
<b>Figura 17</b> Preparación de las diferentes proporciones de EPC-minerales. ....	48
<b>Figura 18</b> Calibración del Potenciostato/Galvanostato.....	49
<b>Figura 19</b> Equipo Potenciostato/Galvanostato.....	50
<b>Figura 20</b> Celda de tres electrodos en un medio cultivo 0K.....	51
<b>Figura 21</b> Análisis MEB-EDS de grafito.....	54
<b>Figura 22</b> Análisis MEB-EDS del mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).....	56

<b>Figura 23</b> Análisis MEB-EDS del mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). .....	58
<b>Figura 24</b> Análisis MEB-EDS del mineral de galena ( $\text{PbS}$ ). .....	60
<b>Figura 25</b> Difractograma de DRX de grafito ( $\text{C}$ ). .....	63
<b>Figura 26</b> Difractograma de DRX de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). .....	64
<b>Figura 27</b> Difractograma de DRX de magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). .....	65
<b>Figura 28</b> Difractograma de DRX de galena ( $\text{PbS}$ ). .....	66
<b>Figura 29</b> Voltamperograma del EPC. ....	71
<b>Figura 30</b> Voltamperograma de EPC-C. ....	75
<b>Figura 31</b> Voltamperograma de EPC-M. ....	78
<b>Figura 32</b> Voltamperogramas de EPC- G. ....	82
<b>Figura 33</b> Voltamperograma de EPC-CM. ....	85
<b>Figura 34</b> Voltamperograma de EPC-CG. ....	88
<b>Figura 35</b> Las curvas $\log  j $ vs E del sistema galvánico CM. ....	94
<b>Figura 36</b> Las curvas $\log  j $ vs E del sistema galvánico CG. ....	96

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Operacionalización de las variables.....	37
<b>Tabla 2</b> Caracterización voltamperométrica del EPC y EPC-minerales.....	52
<b>Tabla 3</b> Análisis elemental por EDS grafito. ....	55
<b>Tabla 4</b> Análisis elemental por EDS calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). ....	57
<b>Tabla 5</b> Análisis elemental por EDS de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). ....	59
<b>Tabla 6</b> Análisis elemental por EDS de galena ( $\text{PbS}$ ). ....	61
<b>Tabla 7</b> Valores de datos del PCA (V vs NHE) vs tiempo (min) en minerales. ....	69
<b>Tabla 8</b> Análisis del diagrama de Evans de los minerales combinados.....	97

## Resumen

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo evaluar la interacción galvánica entre las combinaciones de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio de cultivo microbiano OK a pH 1.8, con el propósito de incrementar la solubilización de cobre y mitigar el fenómeno de pasivación, principal limitante en los procesos (bio)hidrometalúrgicos. La metodología empleó técnicas electroquímicas de potencial de circuito abierto (PCA), voltametría cíclica (VC) y diagramas de Evans mediante electrodos de pasta de carbono (EPC) modificados con proporciones controladas de minerales. Complementariamente, se realizó caracterización mineralógica mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de energía dispersiva (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX) para determinar morfología, composición y estructura cristalina de las muestras. Los resultados evidenciaron que el par  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  en proporción 25:75% incrementó hasta 2.3 veces la velocidad de corrosión electroquímica respecto a la calcopirita pura. La densidad de corriente aumentó de  $0.006 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  a  $0.03 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , y la densidad de corriente galvánica triplicó el valor teórico de referencia ( $0.01 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). Este efecto sinérgico favoreció la disolución de cobre y retrasó la formación de capas pasivantes sobre la superficie de la calcopirita. Por el contrario, el par  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  no evidenció mejoras significativas, dado que la galena formó rápidamente una capa de sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) de baja conductividad eléctrica, inhibiendo la transferencia de electrones y agravando la pasivación superficial. Se concluye que la magnetita constituye un aditivo galvánico viable, eficiente y ambientalmente sostenible para optimizar procesos de lixiviación de cobre basados en calcopirita.

**Palabras claves:** Biolixiviación, calcopirita, interacciones galvánicas, pasivación, solubilización de cobre.

## Abstract

The present thesis work aims to evaluate the galvanic interaction between mineral combinations of chalcopyrite-magnetite and chalcopyrite-galena in a 0K microbial culture medium at pH 1.8, with the purpose of increasing copper solubilization and mitigating the passivation phenomenon, the main limiting factor in (bio)hydrometallurgical processes. The methodology employed electrochemical techniques of open circuit potential (OCP), cyclic voltammetry (CV), and Evans diagrams using carbon paste electrodes (CPE) modified with controlled proportions of minerals. Complementarily, mineralogical characterization was carried out using scanning electron microscopy with energy dispersive spectroscopy (SEM-EDS) and X-ray diffraction (XRD) to determine the morphology, composition, and crystal structure of the samples. The results showed that the  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  pair in a 25:75% proportion increased the electrochemical corrosion rate by up to 2.3 times compared to pure chalcopyrite. The current density increased from  $0.006 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  to  $0.03 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , and the galvanic current density tripled the theoretical reference value ( $0.01 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ). This synergistic effect promoted copper dissolution and delayed the formation of passivating layers on the chalcopyrite surface. In contrast, the  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  pair showed no significant improvements, as galena rapidly formed a lead sulfate ( $\text{PbSO}_4$ ) layer of low electrical conductivity, inhibiting electron transfer and aggravating surface passivation. It is concluded that magnetite constitutes a viable, efficient, and environmentally sustainable galvanic additive for optimizing chalcopyrite-based copper leaching processes.

**Keywords:** Bioleaching, chalcopyrite, copper solubilization, galvanic interactions, passivation.

## Abreviaturas

**AC:** Amplificador de control.

**C:** Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

**CE:** Contraelectrodo.

**EPC:** Electrodo de pasta de carbón.

**EPC-minerales:** Electrodo de pasta de carbón-minerales.

**EPC-C:** Electrodo de pasta de carbón-C.

**EPC-M:** Electrodo de pasta de carbón-M.

**EPC-G:** Electrodo de pasta de carbón-G.

**EPC-CM:** Electrodo de pasta de carbón-CM.

**EPC-CG:** Electrodo de pasta de carbón-CG.

**ER:** Electrodo de referencia.

**Ec.:** Ecuación.

**EDS:** Rayos X de energía dispersiva.

**ET:** Electrodo de trabajo.

**TFD:** Teoría funcional de la densidad.

**G:** Galena ( $\text{PbS}$ ).

**ICP-MS:** Espectroscopía de masas con plasma de acoplamiento inductivo.

**M:** Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**NHE:** Electrodo normal de hidrogeno

**PCA:** Potencial de circuito abierto.

**PBI:** Producto bruto interno.

**PBCs:** Placas de circuito impreso.

**SCE:** Electrodo saturados de calomelanos.

**SHE:** Electrodo de hidrógeno estándar

**MEB-EDS:** Microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de dispersión de energía.

**MEB-EDX:** Microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de rayos X por energía dispersiva.

**MEB:** Microscopía electroquímica de barrido

**ToF-SIMS:** Espectrometría de masas de iones secundarios de tiempo de vuelo.

**MET:** Microscopía electrónica de transmisión

**DRX:** Difracción de rayos X.

**VC:** Voltamperometría cíclica.

**VPD:** Voltamperometría de pulso diferencial.

**XPS:** Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X.

**0K:** Medio de cultivo microbiano (pH 1.8).

**9K:** Medio de cultivo microbiano de *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

## INTRODUCCIÓN

El cobre, Cu, es un mineral de mayor demanda en la industria manufacturera, eléctrica, electrónica, química y en la construcción de maquinaria y automóviles, además de su uso como material bactericida en eliminar o inhibir microorganismos, por lo que se usa en superficies de contacto frecuente, instrumental, equipos médicos y sistemas sanitarios para reducir la proliferación de bacterias (Abraham et al., 2021; Saavedra O., 2018; Umeda et al., 2025). La minería del Cu es uno de los sectores más productivos de Latinoamérica; especialmente en Chile y Perú, que desempeñan un papel fundamental en su producción, siendo Chile el mayor productor mundial (Hwang et al., 2024; Mardones, 2022; Saavedra O., 2018). En Chile, cerca del 90.3% de la actividad minera está dedicada a la extracción y refinación de Cu, representando aproximadamente el 20% del PBI (Hong et al., 2021; Saavedra O., 2018), mientras que en Perú, tiene alrededor del 61.6% de la actividad minera dedicada a la extracción y refinación de Cu, representando el 16% del PBI (Comexperu, 2024; Perú, 2022).

A nivel mundial, el Cu se extrae principalmente de minerales sulfurosos mediante procesos pirometalúrgicos cuando el porcentaje de Cu en el mineral es alto (> al 1%). Sin embargo, cuando el mineral es de baja ley (< del 1% de Cu), la pirometalurgia no resulta rentable económicamente (Hu et al., 2021; Saavedra O., 2018; Xu et al., 2022). Por lo tanto, se recurre a métodos alternativos de menor costo y más lentos, como la (bio)hidrometalurgia (Saavedra et al., 2018b; Saavedra O., 2018; Toledo et al., 2023).

La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es el mineral de Cu más abundante en la corteza terrestre, representa el 70% de las reservas de Cu en todo el mundo (Deng et al., 2023; Panda et al., 2012; Zhao et al., 2013). El cobre generalmente se extrae mediante procesos pirometalúrgicos, pero alrededor del 20% del cobre en todo el mundo se solubiliza mediante procesos

(bio)hidrometalúrgicos conocidos como procesos de biolixiviación (Nangali et al., 2023; Saavedra et al., 2018b; H. Zhang et al., 2021a). La biohidrometalúrgia se puede utilizar para procesar eficientemente minerales de cobre de baja ley y minerales refractarios debido a sus bajos costos de producción y mínima contaminación ambiental (Dong et al., 2013; Martins & Leão, 2023; H. Zhang et al., 2021a; Zhang et al., 2023).

Los minerales como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) son refractarios, lo que dificulta su disolución en soluciones acuosas, requiriendo agentes oxidantes, como iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ), para acelerar el proceso (Saavedra et al., 2018b). Sin embargo, se sabe que la enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) es la más refractaria en comparación con otros sulfuros de cobre, como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) y la calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), en diversas soluciones de lixiviación ácida, incluso con bacterias, durante las cuales solo se disolvió una pequeña cantidad de enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) (Ma et al., 2021). La baja solubilización de los minerales de Cu de baja ley se debe a varios factores, uno de los cuales es el fenómeno de pasivación, donde el azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) se acumula en la superficie del mineral, formando una capa de azufre de difícil solubilización (Saavedra et al., 2018b; Saavedra O., 2018). Una estrategia para mejorar la solubilización es el uso de bacterias oxidantes de azufre que aceleran la oxidación del azufre elemental ( $\text{S}^0$ ). Otra estrategia para mejorar la solubilización de sulfuros es tomar ventaja de las interacciones galvánicas entre dos distintos minerales que entran en contacto, producen una transferencia de electrones o retribución de carga actuado uno como cátodo y el otro como ánodo (Saavedra O., 2018). Estas interacciones, estudiadas en cultivos ácidos, han demostrado aumentar la velocidad de disolución en procesos de biolixiviación, como el proceso industrial Galvanox<sup>TM</sup>, donde la interacción galvánica entre  $\text{CuFeS}_2$ - $\text{FeS}_2$  mejora el incremento de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), logrando una recuperación de Cu hasta en un 98%, y reduce la pasivación de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), dependiendo del tiempo de

lixiviación, acidificación y adición de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) (Mehta & Murr, 1982; Saavedra et al., 2018b; Wang et al., 2018).

Los electrodos de pasta de carbón- minerales (EPC-minerales) son útiles en los estudios de la disolución de minerales, debido a su alta reproductibilidad y mejor conductividad. Estos EPC-minerales se fabrican utilizando aglomerantes no conductores, como aceites orgánicos, aceites minerales, que facilitan las reacciones electroquímicas (Nava & González, 2005; Rosas et al., 2007). Además, es un método simple, rápido y económico para el estudio de minerales.

## **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. Descripción del problema**

Los procesos biohidrometalúrgicos, también conocidos como biolixiviación, permiten la solubilización de metales mediante mecanismos de interacción entre bacterias y minerales, siendo fundamentales en la industria minera. Sin embargo, enfrentan limitaciones significativas, especialmente en la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados masivos altamente puros. En estos casos, la baja solubilidad del cobre genera una alta tasa de pasivación durante la biolixiviación y lixiviación química, debido a la formación de una capa de azufre elemental (vía del polisulfuro) sobre la superficie del mineral, dificultando su disolución.

Ante este desafío, resulta crucial estudiar las interacciones galvánicas entre minerales como calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio ácido usado en bio-lixiviación, OK, libre de hierro y con pH ácido (1.8). Este enfoque podría mejorar la solubilización del cobre, reduciendo las pérdidas asociadas a la pasivación de la calcopirita, lo cual tendría un impacto económico significativo a nivel regional, nacional e internacional.

Para ello, se empleará la metodología de fabricación de los electrodos de pasta con carbón-minerales (EPC-minerales), técnica sencilla, rápida y económica, que permitirá evaluar electroquímicamente las interacciones galvánicas mencionadas en condiciones controladas.

### **1.2. Formulación del problema**

#### **A) Problema general**

¿Es posible identificar la interacción galvánica entre las combinaciones de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio cultivo microbiano OK ácido, mediante técnicas electroquímicas, con el fin de incrementar la solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados masivos altamente puros?

## B) Problemas específicos

- ¿Cómo varían las propiedades de caracterización del grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena con microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX)?
- ¿Cuál es la efectividad de la fabricación de los electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%), empleando aceite mineral como aglutinante?
- ¿Cómo responde la caracterización de los EPC y los EPC-minerales de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%), y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%) medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8 mediante técnicas de potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (CV)?
- ¿Cómo identificar el efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados e impacto en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y CV?

### 1.3. Justificación de la investigación

La biolixiviación representa una alternativa clave para la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados masivos altamente puros. No obstante, minerales como la calcopirita presentan propiedades refractarias que dificultan su disolución en soluciones acuosas, debido a la formación de capas pasivas de azufre elemental.

Actualmente, los métodos utilizados en la industria minera para tratar estos minerales son poco eficientes, lixiviando cerca de un 40% del mineral y el resto perdiéndolo. Por ello es necesario

desarrollar técnicas más efectivas que permitan mejorar la solubilización del cobre y, al mismo tiempo, reducir el impacto ambiental. En este contexto, las técnicas electroquímicas ofrecen una herramienta poderosa para analizar las interacciones galvánicas entre minerales en condiciones de biolixiviación (Saavedra et al., 2018b; Wang et al., 2018; Zheng et al., 2022).

Este estudio se centrará en la caracterización electroquímica de las interacciones galvánicas entre calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio ácido de cultivo microbiano 0K (pH 1.8), con el objetivo de aportar conocimiento científico que contribuya a optimizar la recuperación de cobre de minerales sulfurados masivos altamente puros y reducir la pasivación de la calcopirita.

#### **1.4. Objetivos de la investigación**

##### **A) Objetivo general**

Evaluar la interacción galvánica entre las combinaciones de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8, con el fin de incrementar la solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados masivos altamente puros.

##### **B) Objetivos específicos**

- Caracterizar el grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena con microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX).
- Fabricar los electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%), utilizando aceite mineral como aglutinante.
- Caracterizar los EPC y los EPC-minerales de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%,

50:50% y 75:25%) en medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8 mediante técnicas de potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC).

- Identificar el efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados e impacto en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y VC.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes internacionales

La electroquímica ha sido ampliamente utilizada para estudiar los mecanismos de disolución de minerales sulfurados en procesos de lixiviación, permitiendo comprender fenómenos como la pasivación superficial, la formación de pares galvánicos y la reactividad mineral frente a agentes oxidantes.

Nava & Gonzáles (2005) demostraron la utilidad de técnicas electroquímicas y electrodos de pasta de carbono-mineral (EPC-mineral) para estudiar los mecanismos de disolución de minerales como galena (PbS), oropimente ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ), rejalgar ( $\text{As}_2\text{S}_2$ ) y esfalerita (ZnS). También evaluaron la lixiviación de fases de plata por cianuración, identificando cuáles son refractarias. Este trabajo destaca la versatilidad de las técnicas electroquímicas para caracterizar la reactividad de minerales metálicos complejos.

Por su parte, Nava & Gonzáles (2006) utilizaron VC, voltamperometría de pulso diferencial (VPD), MEB-EDX y espectroscopía de absorción atómica para identificar las etapas de oxidación de la calcopirita. Observaron que la disolución inicial ocurre entre 0.615 y 1.015 V vs SHE, formando polisulfuros no estequiométricos. A potenciales mayores, se forman capas porosas que permiten la difusión de cargas, y finalmente, a potenciales superiores a 1.165 V, la covelita (CuS) se vuelve inestable, lo que conduce a la disolución completa del mineral.

Nava et al. (2008) aplicaron VC, XPS, MEB-EDX y espectroscopía de absorción atómica para estudiar la reducción electroquímica de la calcopirita. Identificaron una transformación lenta de calcopirita a bornita en el rango de potencial de 0.115 a -0.085 V vs SHE, atribuida a un reordenamiento interno de átomos de cobre y azufre. En potenciales más negativos (-0.085 a -

0.185 V), la reducción de bornita también es lenta, lo que indica que la cinética del proceso está limitada por la reorganización estructural del mineral.

Sauber & Dixon (2011), mediante MEB, EDX y VC, demostraron que la pirita presenta una mayor actividad electrocatalítica que la calcopirita para la reducción de iones férricos. Esta propiedad permite que la pirita actúe como cátodo en sistemas galvánicos, facilitando la transferencia de electrones y acelerando la cinética de lixiviación de la calcopirita en soluciones de sulfato férrico, lo que representa una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia del proceso.

Gahremaninezhad et al. (2013) emplearon DRX, XPS, VC, cronoamperometría y técnicas de polarización para estudiar la pasivación de la calcopirita. Encontraron que a potenciales inferiores a 0.90 V vs SHE, la calcopirita forma una película pasiva compuesta por fases de sulfuro de hierro (pirita, pirrotita) y sulfuro de cobre (calcosina, covelina), sin presencia de azufre elemental ni polisulfuros. Esta película inhibe la disolución del mineral, y su oxidación progresiva hacia especies como tiosulfato podría estar relacionada con la reactivación del proceso de lixiviación.

Saavedra et al. (2018a) utilizaron espectroscopía Raman, potencial de circuito abierto (PCA) y VC para estudiar la interacción entre pirita y el medio de cultivo 0K en biolixiviación. Observaron la formación de especies químicas pasivas como azufre elemental, polisulfuros y jarosita sobre la superficie de la pirita, lo que redujo la actividad electroquímica del mineral y limitó la eficiencia del proceso al dificultar la transferencia de electrones necesaria para la disolución.

En otro estudio, Saavedra et al. (2018b), aplicaron técnicas como difracción de rayos X (DRX), MEB-EDS, PCA, VC, cronoamperometría y diagramas de Evans para analizar el comportamiento electroquímico del par galvánico formado por calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y magnetita

( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Determinaron que la calcopirita actúa como ánodo y la magnetita como cátodo, lo que favorece la oxidación de la calcopirita y evita la formación de capas pasivas, mejorando así su reactividad en procesos de lixiviación.

Wang et al. (2018) emplearon técnicas como difracción de rayos X de sincrotrón, VC, diagramas de Tafel y corriente galvánica para investigar el efecto galvánico de la pirita sobre la bornita en condiciones de biolixiviación. Aunque el potencial de reposo de la pirita fue más alto que el de la bornita, no alteró el mecanismo de disolución de esta última. Sin embargo, la presencia de pirita aceleró significativamente la velocidad de disolución de la bornita, actuando como cátodo en el par galvánico y facilitando la transferencia electrónica.

Mu et al. (2018) utilizaron isotermas de adsorción, espectroscopía de masas con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), espectrometría de masas de iones secundarios de tiempo de vuelo (ToF-SIMS) y microscopía electroquímica de barrido (MEB) para estudiar el efecto de biopolímeros depresores en la flotación de calcopirita en presencia de pirita. Observaron que los biopolímeros tienen mayor afinidad por la pirita activada por cobre que por la calcopirita, lo que reduce su efecto depresor sobre esta última. Sin embargo, estos compuestos carecen de selectividad a altas concentraciones, pudiendo provocar la depresión de todos los minerales presentes en el sistema.

Zhang et al. (2020) realizaron estudios electroquímicos mediante voltamperometría cíclica (VC) para evaluar la reducción electroquímica directa seguida de disolución (bio)hidrometalúrgica como alternativa para la extracción de cobre desde calcopirita y bornita. Esta estrategia buscaba superar las limitaciones impuestas por la pasivación superficial, y sus resultados sugirieron que podría ser prometedora para mejorar la eficiencia de recuperación de cobre.

Finalmente, Ke & Chen (2022) aplicaron teoría funcional de la densidad (TFD) y voltamperometría cíclica para estudiar la interacción galvánica entre calcopirita y galena, y su efecto sobre la adsorción de oxígeno y xantano en la superficie de la calcopirita (001). Descubrieron que esta interacción inhibe la disociación de oxígeno y debilita la formación de enlaces O-Fe, S-Cu y S-Fe, lo que reduce la adsorción de colectores como el xantano, afectando negativamente la eficiencia del proceso de flotación.

En el ámbito de la flotación de minerales, la electroquímica ha permitido estudiar las interacciones entre minerales y reactivos, así como los efectos galvánicos que influyen en la adsorción de colectores y depresores.

## **2.2. Antecedentes nacionales**

La biolixiviación de cobre en el Perú ha sido ampliamente investigada, principalmente en sulfuros de cobre de baja ley y en relaves mineros, lo que ha permitido evidenciar tanto su potencial como sus desafíos asociados a su aplicación. Entre los estudios más relevantes se encuentran los de Salcedo-Mejía et al., (2015) y Tapia et al., (2022). Sin embargo, en el Perú aún no se dispone de estudios ni de evidencia científica amplia, sistemática y debidamente consolidada que aborde de manera específica y profunda de las interacciones galvánicas entre minerales dentro de procesos de biolixiviación de cobre de baja ley.

Salcedo-Mejía et al., (2015) estudiaron la biolixiviación de cobre a partir de minerales de sulfuro usando un consorcio microbiano nativo, encontrando que la adición de hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) no es esencial cuando el mineral ya contiene hierro. En sus pruebas, lograron una recuperación del 62% de cobre en la primera etapa, y un 63% en la segunda sin  $\text{Fe}^{2+}$ , lo que demuestra la efectividad del consorcio *Acidithiobacillus ferrooxidans* en condiciones locales. Este hallazgo sugiere que la biolixiviación podría ser más económica y sostenible.

Por otro lado, Tapia et al., (2022) investigaron la biolixiviación de metales de residuos de placas de circuitos impresos (PCBs) en biorreactores de tanque agitado. Utilizando un consorcio microbiano acidofílico, lograron recuperar 69% de cobre y 91% de zinc. Sin embargo, la recuperación de metales preciosos como oro y plata fue baja. El consorcio microbiano mostró alta tolerancia a metales pesados, lo que subraya su capacidad para manejar residuos electrónicos.

Ambos estudios destacan la biolixiviación como una alternativa sostenible frente a métodos convencionales, aunque sugieren la necesidad de optimizar las condiciones de lixiviación para mejorar la recuperación de metales preciosos.

## **2.3. Marco conceptual**

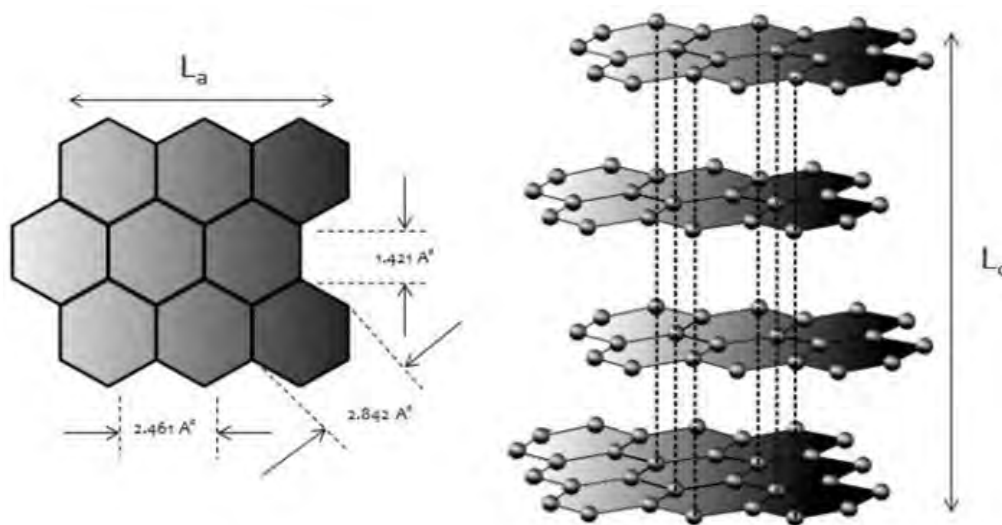
### **2.3.1. Minerales y estructuras cristalinas**

#### **2.3.1.1. Grafito**

El grafito es la forma alotrópica más estable del carbono, siendo constituida por láminas planas de átomos de carbono ordenadas en forma hexagonal y paralela entre sí. En la Figura 1 se aprecia la estructura del grafito donde cada una de las láminas se mantienen unidas débilmente mediante enlaces de Van der Waals (Klein & Cornelius Jr, 2018; Vidales, 2012). Sin embargo, el grafito posee una buena conductividad eléctrica y térmica similar a los de un metal, debido a los enlaces covalentes C-C que predominan en la estructura de la superficie del material (Vidales, 2012). Es importante que en esta tesis se usó la barra de grafito de pila Panasonic D, en forma de pasta para el electrodo.

**Figura 1**

*Representación esquemática de la estructura del grafito.*



*Nota.* Representación esquemática del grafito en donde  $L_a$  y  $L_c$ , denota las longitudes a longitudes a lo largo del plano (eje  $a$ ) y fuera del plano (eje  $C$ ). Fuente: Vidales, (2012).

### 2.3.1.2. Calcopirita

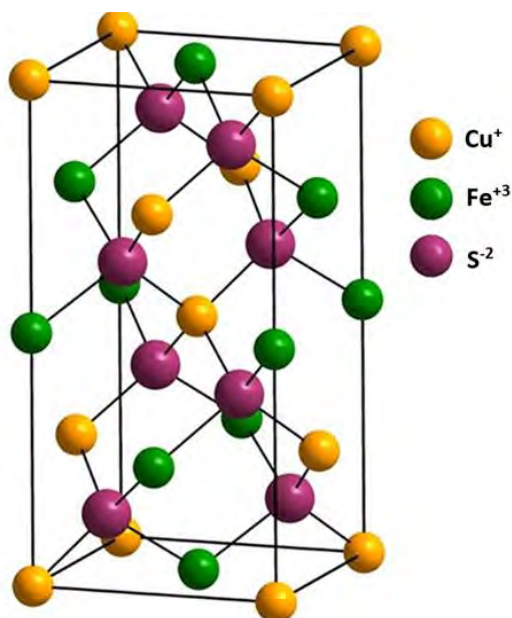
La fórmula química de la calcopirita es  $\text{CuFeS}_2$  con una composición teórica en masa de 34.6% de cobre, 30.4% de hierro, 35.0% azufre, su nombre deriva de la palabra griega chalkos que significa cobre y pirita que significa fuego (Klein & Cornelius Jr, 2018; Yévenes, 2009). La calcopirita tiene una estructura cristalina de la red tetragonal, como se observa en la Figura 2, con cada ion de azufre rodeado por cuatro iones metálicos de cobre y hierro ubicados en los ángulos tetraédricos ordenados en cada plano (Córdoba et al., 2008).

La calcopirita es el mineral de cobre más abundante en la naturaleza y representa aproximadamente el 70% de las reservas de cobre en todo el mundo (Petrović et al., 2018; Zhao et al., 2013). Su tratamiento metalúrgico se efectúa principalmente, utilizando la pirometalurgia

después de la concentración mediante un proceso de flotación del mineral triturado y molido (Córdoba et al., 2008).

## Figura 2

*Estructura de la calcopirita.*



Fuente: Córdoba et al. (2008).

### 2.3.1.3. Magnetita

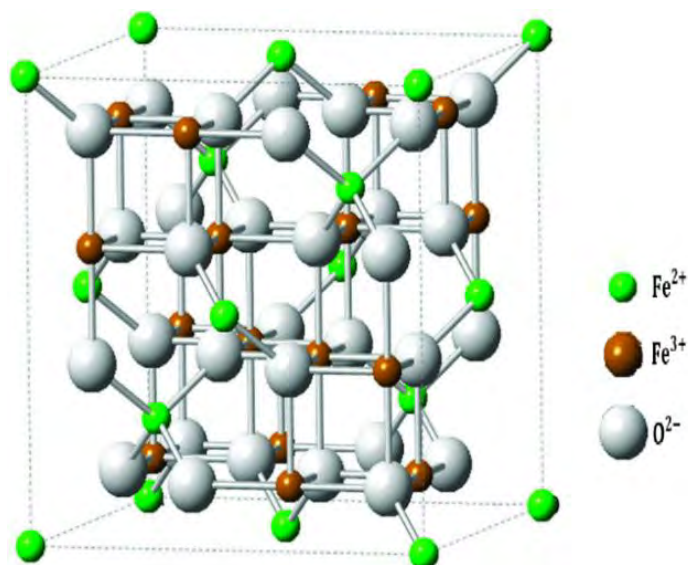
La fórmula química de la magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o también se expresa  $\text{FeFe}_2\text{O}_4$ , es un óxido de hierro mixto; con una composición que corresponde a 72.4% de hierro, 27.6% de oxígeno y se cristaliza en un sistema cúbico centrado en las caras con una estructura de espinela inversa, como se muestra en la Figura 3, la estructura de la magnetita expresando la forma  $\text{Fe}^{3+}(\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+})\text{O}_4$  (Klein & Cornelius Jr, 2018; Noval et al., 2017).

La magnetita es el mineral de hierro más abundante en la corteza terrestre constituido por óxido ferroso diférrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), su nombre se deriva de la ciudad griega de Magnesia (Han et al., 2020; Mejía C., 2016; Salinas P., 2017). El nombre diférrico hace referencia a una celda unitaria

donde podemos encontrar al Fe en sus dos estados de oxidación  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{Fe}^{3+}$ , en su forma más específica sería  $\text{Fe}^{2+}(\text{Fe}^{3+})_2\text{O}_4$  (Mejía C., 2016).

### Figura 3

*Estructura cristalina de la magnetita.*



Fuente: Gawande et al. (2013).

La celda unitaria de magnetita tiene 32 iones de  $\text{O}^{2-}$  que están en forma cubica centradas en las caras y los 8 cationes de  $\text{Fe}^{2+}$  se encuentran en sitios octaédricos, mientras que los 16 cationes de  $\text{Fe}^{3+}$  se distribuyen por igual entre los sitios octaédricos y tetraédricos (Gawande et al., 2013; Noval et al., 2017).

#### 2.3.1.4. Galena

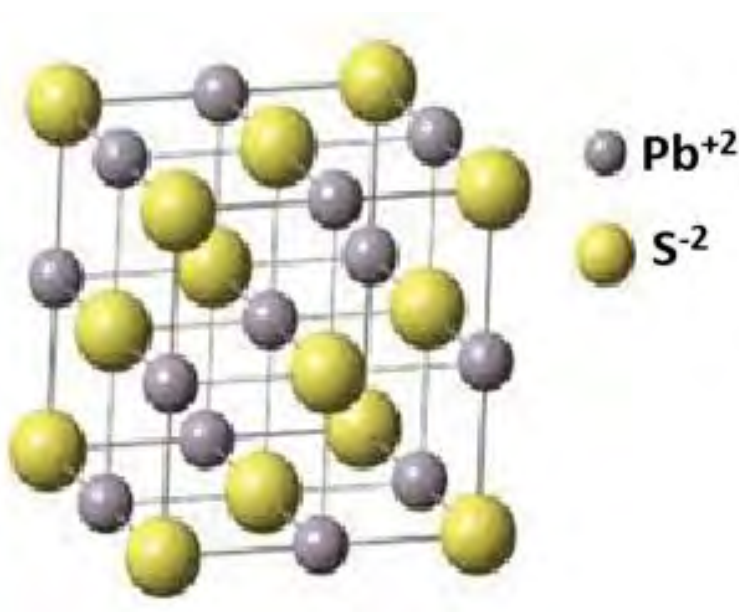
La fórmula química de la galena es  $\text{PbS}$ , presenta una composición de 86.6% de plomo, 13.4% de azufre y estructura cristalina cúbica como se muestra en la Figura 4; a veces aparece truncado el octaedro, con una dureza de 2.5, brillo metálico, color y huella gris plomo. Es el principal mineral de plomo, se encuentra en vetas hidrotermales, generalmente asociado asociada a minerales de plata, como la acantita o la tetraedrita. La galena puede contener pequeñas

cantidades de zinc, cadmio, antimonio, arsénico y bismuto. Como también se puede encontrar en filones asociados a blenda, pirita, marcasita, calcopirita, cerusita, anglesita entre otros (Klein & Cornelius Jr, 2018).

La galena es un mineral del grupo de los sulfuros, porque se forma a partir de la combinación de azufre con otros metales (en este caso, el plomo). Asimismo, la galena es un mineral de gran importancia desde dos puntos de vista; como fuente principal de plomo y como material semiconductor. Además, este mineral juega un rol importante desde el punto de vista ambiental, ya que a menudo es la causa de una mayor acidificación del agua luego de la explotación minera (Restrepo et al., 2007).

#### **Figura 4**

*Estructura cristalina de la galena.*



Fuente: Klein & Cornelius Jr. (2018).

## **2.4. Procesos biohidrometalúrgicos**

### **2.4.1. Biolixiviación**

La biolixiviación es la extracción de metales a partir de minerales utilizando componentes que se encuentran en nuestro entorno, como la presencia de agua, aire y microorganismos (Lock, 2004). La biolixiviación es el proceso que emplea microorganismos para solubilizar minerales (Ortiz B., 2021; Saavedra O., 2018). Este proceso es importante para la extracción de metales en concentrados y minerales sulfurados refractarios, y se utiliza en las industrias mineras para la extracción de cobre (Gautier H., 2009; Saavedra O., 2018).

La biolixiviación es catalizada por microorganismos que aceleran el proceso de disolución de minerales oxidativos y requieren procesos de reacción redox (Lock, 2004; Ortiz B., 2021; Porro et al., 1988; Sany, 2016). Este proceso natural está asociado a la colonización y crecimiento de bacterias que utilizan los minerales como fuente de energía. Este proceso es de naturaleza relativamente lento y está diseñado para usar a escala industrial y aumentar la solubilización de metales de interés económico (Saavedra O., 2018).

### **2.4.2. Soluciones bio-lixiviantes**

En los procesos hidrometalúrgicos, las soluciones lixiviantes son fundamentales para disolver selectivamente los metales presentes en minerales sulfurados y óxidos. Estas soluciones pueden ser de origen químico o biológico, y su elección depende del tipo de mineral, la naturaleza del metal a recuperar, las condiciones operacionales y los objetivos ambientales del proceso (Saavedra & Cortón, 2014; Saavedra O., 2018).

Para minerales sulfurados, como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) o la galena ( $\text{PbS}$ ), se utilizan comúnmente soluciones oxidantes que permitan romper la estructura del sulfuro. Entre los agentes químicos más utilizados se encuentran el ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en combinación con

iones férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ), que actúan como oxidantes del azufre y del metal. También se emplean soluciones de cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), especialmente en sistemas cerrados o a presión, debido a su alta capacidad oxidante. En algunos casos, se ha explorado el uso de hipoclorito de sodio ( $\text{NaClO}$ ) o peróxidos, aunque su aplicación es más limitada por razones de costo y seguridad (Saavedra & Cortón, 2014).

En el caso de los minerales oxidados, como la malaquita ( $\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ), la cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) o la hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), la lixiviación suele ser más directa, ya que estos minerales no presentan estructuras cristalinas tan resistentes como los sulfurados (Kang et al., 2021; Seo et al., 2013). En estos casos, el ácido sulfúrico diluido es suficiente para solubilizar los metales, especialmente el cobre, sin necesidad de agentes oxidantes adicionales. También se utilizan soluciones de amoníaco en presencia de carbonato de amonio, especialmente para minerales de cobre y níquel, debido a su capacidad de formar complejos solubles con estos metales (Ekmekyapar et al., 2015; Kang et al., 2021; Wa et al., 2021).

En cuanto a los procesos biológicos, se utilizan medios de cultivo que favorecen el crecimiento de microorganismos capaces de oxidar compuestos metálicos. El medio 0K es un nutriente libre de iones ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ), compuesto por cloruro de potasio ( $\text{KCl}$ ), sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), fosfato de amonio monobásico ( $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ ) y ajustado con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Este medio permite el crecimiento de microorganismos sin generar corrosión, ya que no contiene agentes oxidantes (Saavedra et al., 2018b; Saavedra O., 2018). Por otro lado, el medio 9K está diseñado para estimular el crecimiento de bacterias como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, que oxidan iones ferrosos a férricos. Este medio contiene fosfato de amonio monobásico, sulfato de magnesio heptahidratado, cloruro de potasio, sulfato ferroso heptahidratado y ácido sulfúrico para el ajuste de pH. Su acción se evidencia por un cambio

de color rojizo, indicando la oxidación del hierro (Delgado C., 2015; Moscoso Y., 1977; Saavedra & Cortón, 2014; Saavedra O., 2018).

Además, en algunos procesos se han utilizado soluciones lixiviantes alternativas como el tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ), especialmente en la recuperación de oro y plata, debido a su menor impacto ambiental en comparación con el cianuro. También se han explorado sistemas basados en ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) o ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) para minerales específicos o en condiciones de alta presión y temperatura (Joshi et al., 2025; Nkabinde et al., 2025; Tran et al., 2025).

En resumen, la selección de la solución lixiviante adecuada depende del tipo de mineral, el metal objetivo y las condiciones del proceso. La combinación de soluciones químicas y biológicas ha permitido desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles para la recuperación de metales en la minería moderna.

## **2.5. Técnicas instrumentales**

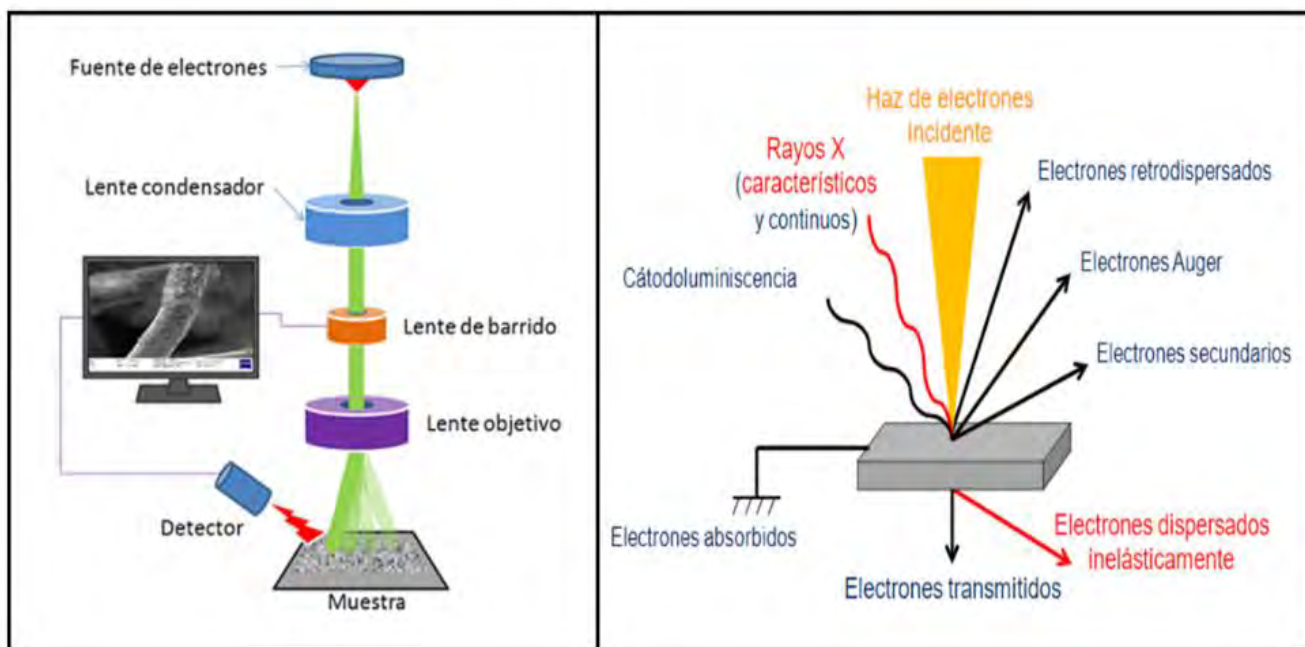
### **2.5.1. Microscopía electrónica de barrido (MEB) y EDS**

La microscopía electrónica de barrido (Scanning Electron Microscopy, MEB), es una técnica instrumental ampliamente utilizada que permite la observación y caracterización superficial de cualquier material, sea orgánico o inorgánico (Egerton, 2005; Goldstein et al., 2003; Sarecka-Hujar et al., 2017). Esta técnica permite obtener imágenes con alta resolución y capacidades de analizar/examinar características morfológicas, estructurales y las composiciones químicas de las muestras analizar (Cori M., 2018; Egerton, 2005; Goldstein et al., 2003; Santo & Otero, 2017; Sarecka-Hujar et al., 2017; Scimeca et al., 2018; Viera et al., 2021).

A diferencia de la microscopía óptica que utiliza una fuente de luz con espectro visible, en el MEB se utiliza un haz de electrones acelerados con voltajes de 1-30 KeV para escanear la muestra examinada (Goldstein et al., 2003; Santo & Otero, 2017; Sarecka-Hujar et al., 2017).

### Figura 5

*Microscopía electrónica de barrido (MEB).*



*Nota.* Partes de la Microscopía electrónica de barrido (MEB). Fuente: Santo & Otero (2017) y Goldstein et al. (2003).

Se observa en la Figura 5, la microscopía electrónica de barrido (MEB), donde el haz de electrones incidentes (electrones primarios) sobre la muestra se dispersa en forma de radiación.

Las principales radiaciones son los electrones secundarios, electrones retrodispersados y un espectrofotómetro de rayos X de energía dispersiva (Goldstein et al., 2003; Santo & Otero, 2017; Zambrano Alva, 2013).

- A) Electrones secundarios:** Son aquellos electrones generados por el haz de electrones primarios en la capa superficial de la muestra, con una energía menor o igual a 50 eV, que se encuentra aproximadamente de 5 - 50 nm de la superficie de los minerales en específicos. La detección de estos electrones nos da una imagen tridimensional, obteniendo así información morfológica superficial de la muestra (Egerton, 2005; Goldstein et al., 2003; Goodhew & Humphreys, 2000; Zambrano Alva, 2013).
- B) Electrones Retro-Dispersado:** Los electrones aparecen con una cantidad significativa de energía en comparación con la energía del haz incidente, normalmente entre el 50 a 80 % de la energía del haz. Estos electrones se generan en regiones que producen más que solo electrones secundarios, con una energía superior a 50 eV, donde las micrografías de esta detección dan como resultado imágenes morfológicas planas en escala de grises que nos proporcionarán información sobre las diferentes fases presentes en la muestra, caracterizadas por su número atómico. Las fases con números atómicos más altos aparecerán como enteros claros o blancos, mientras que las fases con números atómicos más bajos aparecerán como áreas oscuras de color grises oscuros o negros (Egerton, 2005; Goldstein et al., 2003; Goodhew & Humphreys, 2000; Zambrano Alva, 2013).
- C) Rayos X de energía dispersiva (EDS):** Es una técnica analítica que permite la caracterización química/análisis elemental de materiales. En este proceso, la generación de rayos X se produce de forma continua a medida que el haz de electrones escanea e interactúa con la muestra. Cuando un electron es expulsado de su capa interna, los electrones restantes en el átomo ionizado se reordenan y, a medida que buscan niveles de energía más bajos, se generan rayos X característicos del elemento (Egerton, 2005; Goldstein et al., 2003; Goodhew & Humphreys, 2000; Zambrano Alva, 2013).

### 2.5.2. Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (X-ray diffraction, DRX) es una técnica analítica instrumental no destructiva para el análisis de una amplia variedad de materiales, incluyendo líquidos, metales, minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, productos farmacéuticos, recubrimientos de capa fina, cerámicas y semiconductores (Cerquera A. et al., 2017; Egerton, 2005; Goodhew & Humphreys, 2000; Williams & Carter, 2009). La aplicación principal de la difracción de rayos X (DRX) es la identificación y caracterización de la composición de las muestras y determinar el tamaño del cristal (Cerquera A. et al., 2017; Egerton, 2005; Ortiz, 2017; Williams & Carter, 2009). La difracción permite la caracterización de cristales proporcionando información sobre la simetría y los parámetros de la red (Ortiz, 2017; Ramírez F., 2016; Skoog et al., 2008).

La difracción de rayos X se produce cuando un haz de rayos X monocromático incide sobre un material cristalino, se produce la dispersión coherente de dicho haz, con una interferencia constructiva entre los planos paralelos que constituye el material, de forma que la diferencia de caminos recorridos por dos rayos es  $n$  veces la longitud de onda del haz (Goldstein et al., 2003; Skoog et al., 2008). Así, para una longitud de onda dada y una dirección de incidencia del haz, se observan picos intensos de radiación dispersada (Goodhew & Humphreys, 2000; Ortiz, 2017; Skoog et al., 2008).

El principio básico de funcionamiento de esta técnica consiste en que los rayos X son difractados por la estructura de la muestra según la ley de Bragg:

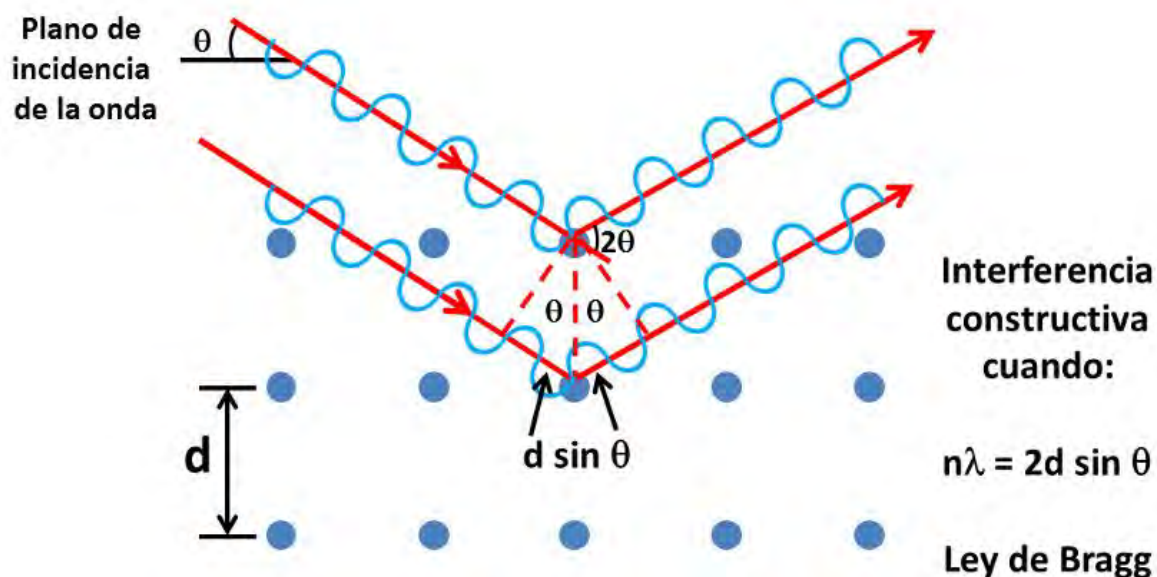
$$n \lambda = 2 d \sin(\theta)$$

Donde:  $n$  es un entero,  $\lambda$  es la longitud de onda,  $d$  es la distancia interplanar de la estructura de la muestra y  $\theta$  el ángulo de incidencia de los rayos X.

La interferencia observada en los parámetros de difracción de rayos X para un sólido ocurre debido a la reflexión de la radiación incidente sobre planos de la red cristalina, con una diferencia de recorrido igual a un número entero de la longitud de onda del haz incidente como se muestra en la Figura 6, la difracción de rayos X de la ley de Bragg (Goldstein et al., 2003; LINAN, 2016; Skoog et al., 2008).

### Figura 6

*Difracción de rayos X.*

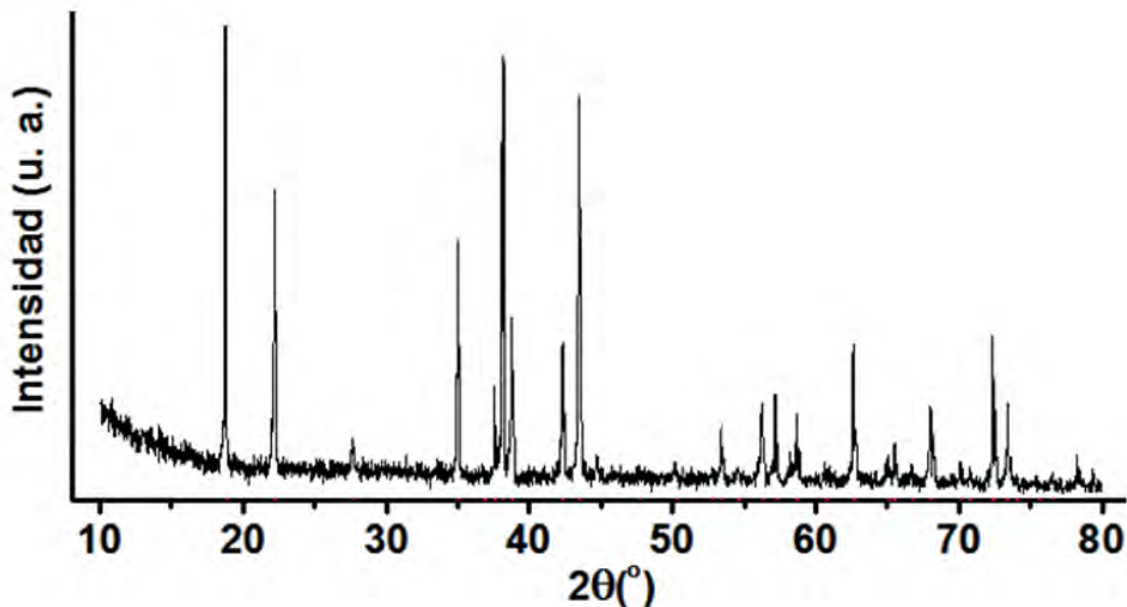


Fuente: LINAN (2016) y Skoog et al. (2008).

Cada vez que se cumpla la ley de Bragg, se difracta el haz primario de la muestra hacia el detector con los elementos electrónicos, se mide la intensidad de dicha radiación e indica la posición angular de la reflexión al controlador. De esta forma, se obtienen los conteos de pulsos que componen la difracción de una muestra de polvo, como ejemplo se muestra en la Figura 7, difractograma típico de rayos X (LINAN, 2016; Skoog et al., 2008; Williams & Carter, 2009).

**Figura 7**

*Difractograma típica de rayos X.*



Fuente: LINAN (2016).

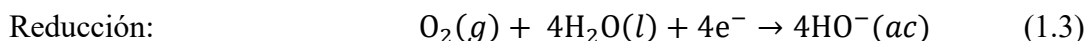
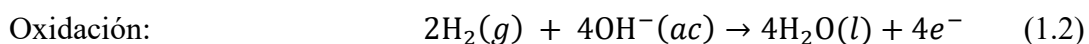
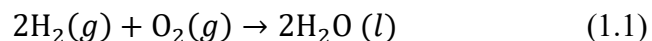
## **2.6. Conceptos básicos sobre electroquímica**

### **2.6.1. Electroquímica**

La electroquímica es el estudio de la transformación entre la energía eléctrica y energía química en los procesos de reacciones redox (oxidación-reducción) donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad, lo que permite inducir una reacción no espontánea, y se le conoce como electrólisis (Bard et al., 2022; Compton & Banks, 2018). Asimismo, la electroquímica estudia los diferentes fenómenos como las celdas galvánicas, termodinámica de las reacciones redox, corrosión, baterías, electrólisis, entre otros (Chang & Goldsby, 2013; Compton & Banks, 2018; Skoog et al., 2008).

Toda reacción redox puede estudiarse desde el punto de vista de los procesos conjugados de oxidación-reducción. En las reacciones redox se transfieren electrones de una sustancia a otra,

por ejemplo, en la siguiente reacción de síntesis del agua, el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) se combinan para formar agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). La reacción se representa mediante con las ecuaciones (Ec.) (1.1), (1.2) y (1.3) (Chang & Goldsby, 2013; Skoog et al., 2008):



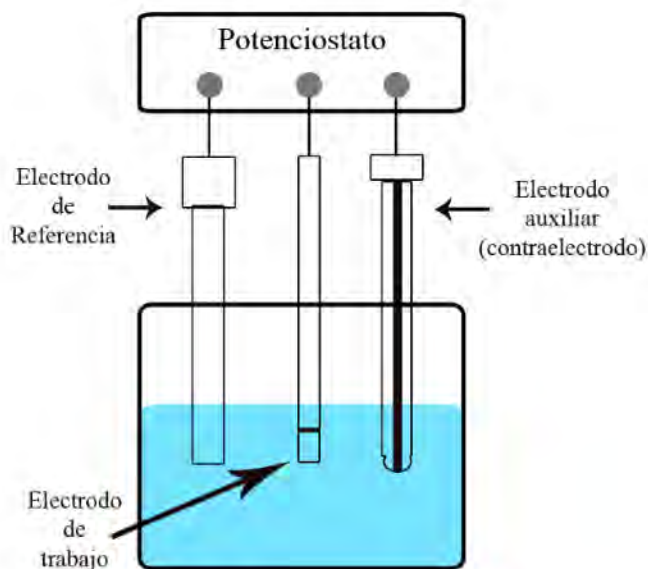
En la reacción de formación del agua los átomos de oxígeno se reducen (aceptan electrones) y los átomos de hidrógeno se oxidan (desprenden electrones) (Chang & Goldsby, 2013; Rivera G., 2012; Skoog et al., 2008).

### 2.6.2. Celda electroquímica de tres electrodos

Una celda electroquímica se define como un conjunto de componentes que consta de un grupo de electrodos (generalmente dos o tres) y una solución electrolítica. Un electrodo es un conductor eléctrico y la carga se transporta a través del material del electrodo mediante el movimiento de electrones (Bard et al., 2022; Skoog et al., 2008). El material de los electrodos es muy variable y puede consistir en materiales conductores o semiconductores. En la Figura 8, se muestra la celda electroquímica consta de tres electrodos, denominados electrodo trabajo (ET), contraelectrodo (CE) y el electrodo de referencia (ER) (Bard et al., 2022; Compton & Banks, 2018; Fuller & Harb, 2018; Saavedra O., 2018).

**Figura 8**

*Celda electroquímica de tres electrodos.*



Fuente: Rivas et al. (2020).

### 2.6.3. Doble capa, corriente faradaicas y no faradaicas

La doble capa eléctrica formada en la superficie del electrodo resulta de los cambios químicos y físicos que ocurren en la interfase electrodo-solución, donde ocurre la corriente debido a la transferencia de carga durante la reacción de oxidación y reducción. La corriente faradaica es la transferencia de carga a través de la interfase entre el electrodo y la solución, por lo que el proceso está relacionado con reacciones de óxido-reducción (Compton & Banks, 2018; Saavedra O., 2018; Skoog et al., 2008).

Por otro lado, las corrientes no faradaicas implican la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-solución. Cuando se aplica un potencial a un electrodo sumergido en un electrolito, un flujo instantáneo de corriente crea un exceso (o una deficiencia) de carga negativa en la superficie del metal. Como resultado de la movilidad de los iones, la capa de solución

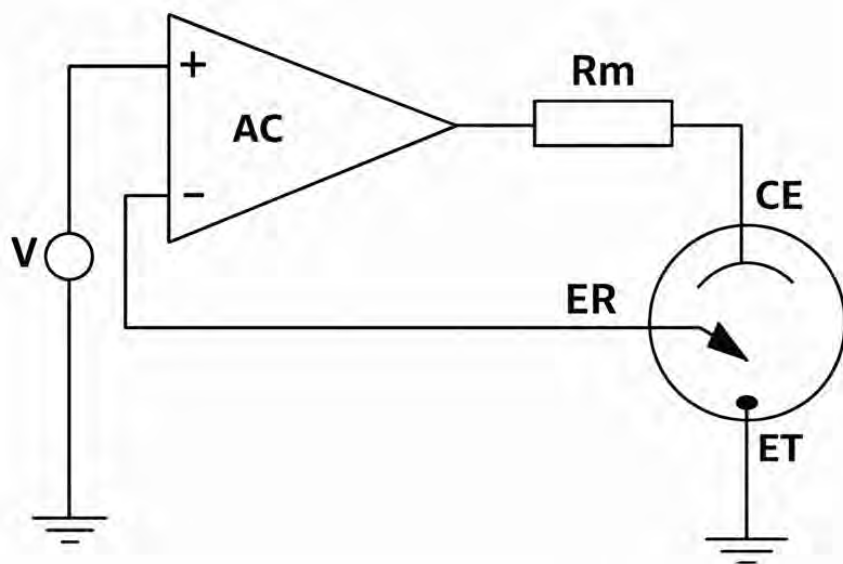
adyacente al electrodo recibe inmediatamente la carga opuesta (Bard et al., 2022; Morales G., 2001; Skoog et al., 2008).

#### 2.6.4. Potenciostato

En la Figura 9, se muestra un diagrama esquemático de la celda de tres electrodos conectada a un potenciostato. Un potenciostato es un equipo que permite controlar la diferencia de potencial entre el electrodo trabajo (ET) y el electrodo de referencia (ER), aplica la corriente a través del contraelectrodo (CE) y mide la corriente como una caída óhmica ( $iR$ ) sobre una resistencia en serie ( $R_m$ ). Actualmente, los potenciostatos comerciales vienen provistos de diversas funciones de potencial en función del tiempo. Además de controlar el potencial, miden con precisión la corriente que circula entre el CE y el ET (Bard et al., 2022; Compton & Banks, 2018; EC08, 2011; Fuller & Harb, 2018; Saavedra O., 2018; Skoog et al., 2008).

**Figura 9**

*Diagrama esquemático de la celda tres electrodos.*



Fuente: Skoog et al. (2008).

Donde el amplificador de control (AC), es un componente electrónico de un amplificador operacional y con realimentación negativa en el potencióstato, manteniendo el voltaje entre el electrodo de referencia (ER) y el electrodo de trabajo (ET) lo más cercano posible al voltaje en la fuente de entrada (Bard et al., 2022; Fuller & Harb, 2018; García G., 2018; Gonzáles R., 2018; Snizhko et al., 2023). El voltaje es aplicado por el amplificador de control, y la corriente se aplica a través del contraelectrodo (CE); ajustando la diferencia de potencial entre el electrodo de referencia (ER) y electrodo de trabajo (ET) (Bard et al., 2022; EC08, 2011; Gonzáles R., 2018).

## **2.7. Electrodo**

### **2.7.1. Electrodo de trabajo**

El electrodo de trabajo (working electrode, ET) es electrodo en el que se producen los cambios electroquímicos de interés. Los ET generalmente pueden ser hechos de materiales inertes como Au, Ag, Pt, grafito, carbón vítreo (GC), etc., o también materiales semiconductores, como los minerales. Para aplicaciones de corrosión, el material del ET es el material que se está investigando (el que realmente se está corroyendo) (Saavedra O., 2018; Skoog et al., 2008). En estas aplicaciones, el electrodo inerte actúa como fuente o sumidero de electrones transferidos desde un sistema redox presente en una solución, y su potencial responde a la ecuación de Nernst y la actividad del par redox involucrado (Bard et al., 2022; EC08, 2011; Saavedra O., 2018; Skoog et al., 2008).

#### **2.7.1.1. Electrodo de pasta de carbón (EPC)**

El electrodo de pasta de carbón (carbon paste electrode, EPC) fue desarrollado y publicado por Adams en 1958, donde se ha encontrado una utilización en el campo de la electroquímica, especialmente en la voltamperometría analítica (Švancara et al., 1996). Desde entonces, el

electrodo de pasta de carbón se ha empleado principalmente con fines analíticos para compuestos orgánicos e inorgánicos (Ahlberg & Asbjörnsson, 1993).

Además, el EPC se basa en la mezcla de carbón en polvo (grafito) y un aglutinante líquido orgánico, se ha convertido en uno de los materiales de electrodo más utilizados para la preparación de diversos electrodos, sensores y detectores (Švancara et al., 2009). El aglutinante puede ser conductor o no conductor. El comportamiento electroquímico de un CPE con un aglutinante conductor, es bastante diferente al de un CPE con aglutinante no conductor. Un EPC de carbón con un aglutinante no conductor ya sea usando aceites orgánicos como el nujol (aceite ligero, aceite mineral, aceite de silicona, aceite de parafina) y otros, puede considerarse un electrodo inerte en el mismo sentido que los electrodos de carbón vítreo y alambre de platino (Ahlberg & Asbjörnsson, 1993; Ghatee et al., 2015; Nava & González, 2005).

### **2.7.2. Electrodo de referencia**

El electrodo de referencia (reference electrode, ER) es un electrodo cuyo potencial es constante y bien conocido, que se utiliza como referencia para el control y la medición del potencial en una celda electroquímica. Donde la superficie del electrodo de referencia (ER) es mayor con respecto al electrodo de trabajo (ET). Se utilizan sistemas como electrodos de referencia Ag/AgCl/KCl (saturado, acuoso) o Ag/AgCl/NaCl (saturado, acuoso) y los electrodos saturados de calomelanos (SCE), Hg/Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>/KCl (saturado, acuoso), Hg/Hg<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (saturado, acuoso), entre otros (Bard et al., 2022; Bedioui et al., 2000; EC08, 2011).

### **2.7.3. Contraelectrodo**

El contraelectrodo o electrodo auxiliar (counter electrode, CE) es el electrodo que se utiliza para cerrar el circuito de la corriente en la celda electroquímica. Por lo general, suele ser de un material inerte que son de Pt, acero inoxidable, grafito, Au, carbón vítreo y otros. El área de su

superficie del contraelectrodo debe ser mayor que el electrodo de trabajo, para que no sea un factor limitante en la circulación de la corriente y su impedancia pueda ser despreciada frente al electrodo de trabajo (WE) (Compton & Banks, 2018; EC08, 2011; Saavedra O., 2018).

## **2.8. Técnicas electroquímicas**

### **2.8.1. Potencial de circuito abierto (PCA)**

El potencial de circuito abierto (open circuit potential, PCA) también se le denomina voltaje de circuito abierto, potencial de corriente cero o potencial de reposo, que es la medición de la condición de equilibrio de la celda electroquímica. También el potencial de circuito abierto de una celda electroquímica es una medición de voltaje realizado entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. La medición del potencial de circuito abierto requiere de un voltímetro, con su resistencia, con alta impedancia de entrada para medir el voltaje sin corriente o voltaje aplicado a la celda. Cuando hay un par redox en cada electrodo y no hay contribución de las uniones líquidas, el potencial de circuito abierto también es un potencial de equilibrio (Bard et al., 2022; Compton & Banks, 2018; Zolis, 2017).

### **2.8.2. Voltamperometría cíclica (VC)**

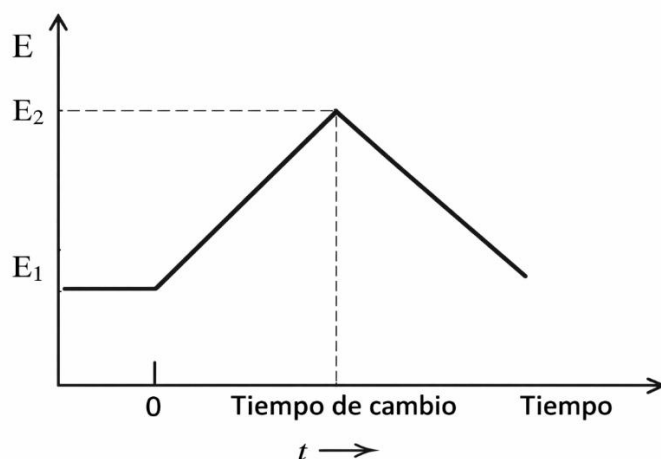
La voltamperometría cíclica (cyclic voltammetry, VC) es la técnica más utilizada en la electroquímica, ya que permite determinar rápidamente los potenciales de oxidación y reducción en los procesos redox, mediante la aplicación de un barrido de potencial lineal en forma de onda triangular (Bard et al., 2022; Compton & Banks, 2018; Ejigu et al., 2025; Enríquez, 2013; García A., 2023; Patiño M.z, 2016). En la VC se aplica sobre el sistema una variación lineal del potencial, a partir de un potencial inicial  $E_1$ . En cada momento, el potencial aplicado,  $E$ , responde a la ecuación (Ec.) (1.4):

$$E = E_1 + vt \quad (1.4)$$

Donde  $v$  es la velocidad de variación del potencial con el tiempo,  $dE/dt$ . En la Figura 10, se muestra la forma en la que puede variarse el potencial aplicando al electrodo de trabajo (working electrode, WE), en función del tiempo (Cortez & Negri, 2011; Fuller & Harb, 2018; Saavedra O., 2018). El potencial se varía linealmente con el tiempo (a una dada velocidad de barrido,  $v$ ), partiendo del potencial inicial ( $E_1$ ) de equilibrio hasta un potencial final ( $E_2$ ), luego se regresa al mismo valor del potencial inicial ( $E_1$ ) u a otro valor y así sucesivamente. La velocidad de barrido usada generalmente se encuentra entre  $1\text{mV/s}$  hasta  $1000\text{mV/s}$  (Compton & Banks, 2018; Cortez & Negri, 2011; Patiño M.z, 2016; Saavedra O., 2018). La representación gráfica más utilizada presenta la respuesta de corriente del sistema en función del potencial aplicado, obteniéndose la curva de la intensidad de corriente vs potencial o la curva voltamperométrica (Compton & Banks, 2018; Cortez & Negri, 2011; Ejigu et al., 2025; García A., 2023; Meza P., 2021; Saavedra O., 2018).

### Figura 10

*Perfil de potencial en función del tiempo.*



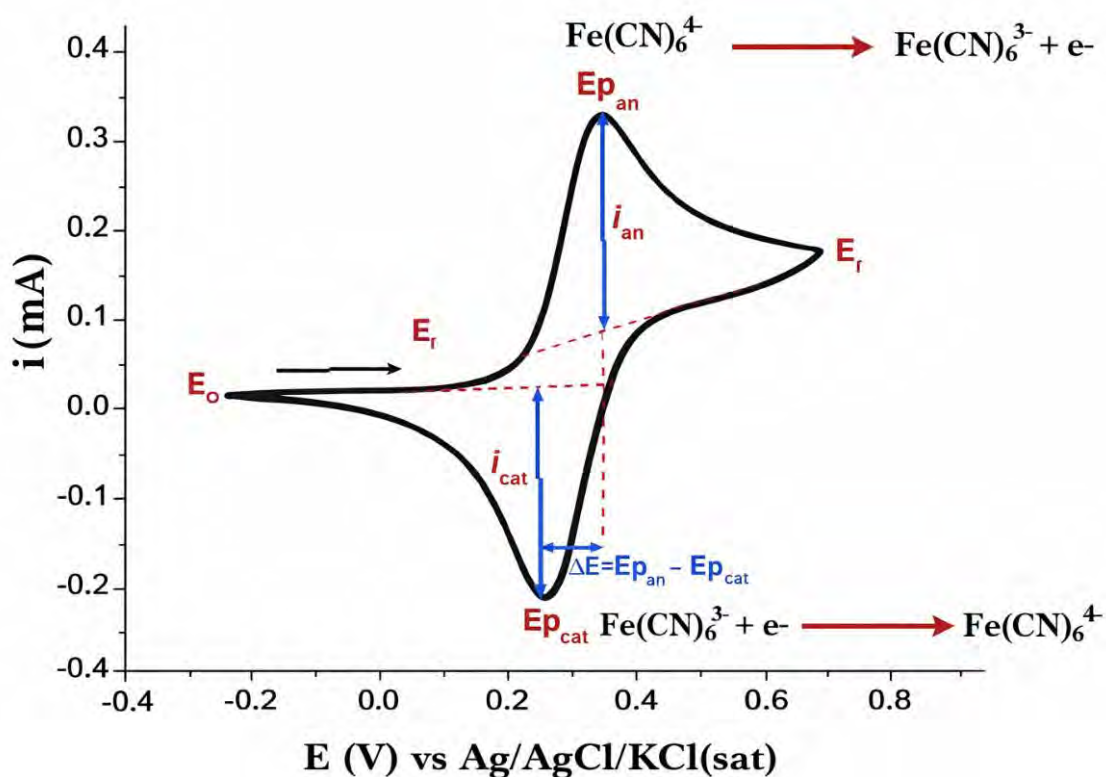
*Nota.* Perfil de potencial en función del tiempo para una medición de la voltamperometría cíclica.

Fuente: Bard et al. (2022).

En la Figura 11, se muestra la voltamperometría cíclica (cyclic voltammetry, VC) donde se presenta un sistema reversible  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$ , se observa la presencia de potenciales de pico catódico ( $E_p \text{ cat}$ ) y anódico ( $E_p \text{ an}$ ), así como también la presencia de la intensidad de corrientes de pico catódico ( $i_p \text{ cat}$ ) y anódico ( $i_p \text{ an}$ ), que están bien definidos a un barrido de potencial con el electrodo de referencia  $\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{KCl}(\text{sat})$  (Alam et al., 2018; Ejigu et al., 2025; Fuller & Harb, 2018; Galicia, 2020; Radhi et al., 2020). La ventana de potencial es desde -0.4 V a 0.8 V con la velocidad de barrido de 5 mV/s (Galicia, 2020).

**Figura 11**

*Voltamperograma cíclico.*



*Nota.* Voltamperograma cíclico obtenido de un electrodo de trabajo de Pt con una disolución de 0.01 M de  $\text{K}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  en 0.1 M de  $\text{KNO}_3$  a una velocidad de barrido de 5 mV/s que va en

dirección anódica, con respecto al el electrodo de referencia Ag/AgCl/ KCl(sat) y el contraelectrodo de barra de grafito. Fuente: Galicia (2020).

### **2.8.3. Interacciones galvánicas**

Las interacciones galvánicas entre diferentes minerales que entran en contacto, producen una transferencia de electrones o una redistribución de carga (Ke & Chen, 2022; Saavedra O., 2018). Por lo tanto, en la interacción galvánica, el mineral de mayor potencial de reposo (mineral noble) actúa como cátodo y evita su solubilización, mientras que el mineral de menor potencial de reposo (mineral activo) actúa como ánodo y se oxida (Ekmekçi & Demirel, 1997; Ke & Chen, 2022; Saavedra et al., 2018a, 2018b).

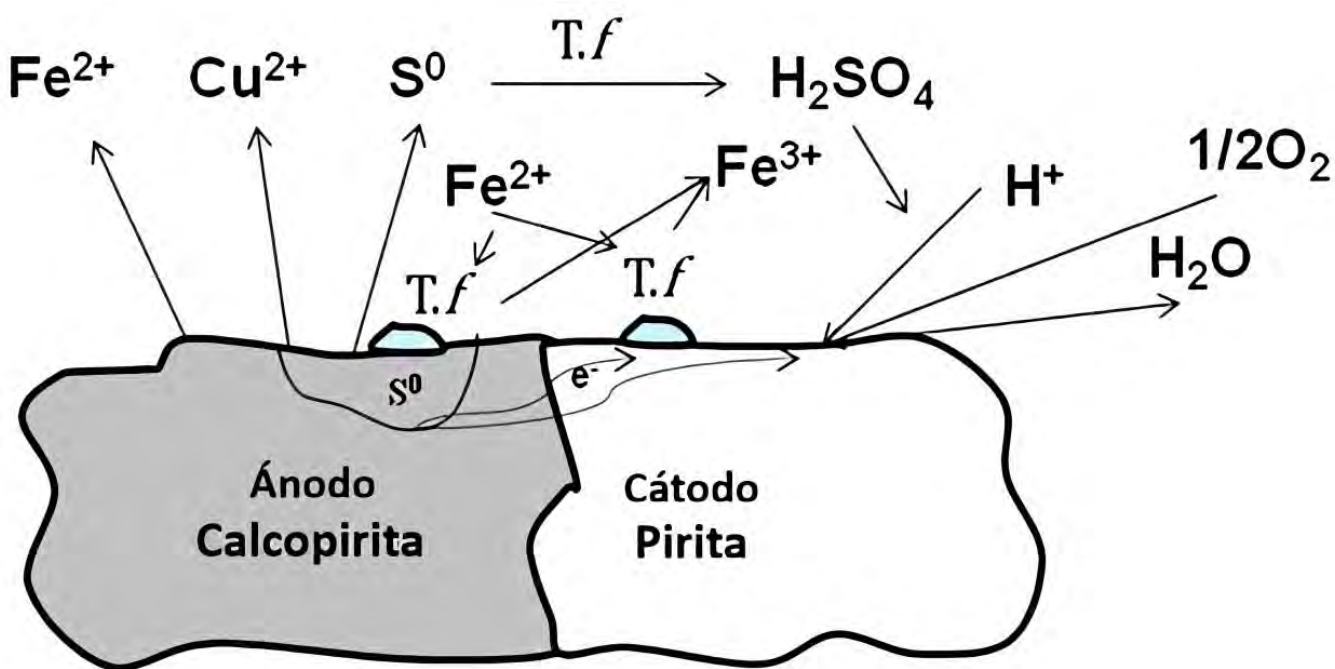
Las interacciones galvánicas entre diferentes minerales de sulfuro cambian el comportamiento de disolución de los minerales, durante el cual el mineral con el potencial de reposo más bajo se disuelve rápidamente mientras que el potencial de reposo más alto está protegido galvánicamente (Ma et al., 2021). Algunas interacciones galvánicas, como galena-esfalerita y pirita-arsenopirita, fueron investigadas en un medio químico lixivante con concentraciones de ácido sulfúrico entre el 4 a 10%. Por otro lado, las interacciones como las calcopirita-bornita y pirita-bornita se han estudiado en un medio de cultivo ácido pH 1.8, utilizado en procesos de biominería (Saavedra et al., 2018b).

En el caso de un par galvánico bien estudiado, como es la combinación de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ), es uno de los minerales que provoca un aumento en la velocidad de disolución de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). La interacción galvánica entre pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la pirita ( $\text{FeS}_2$ ) actúa como cátodo y está protegida, mientras que la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) actúa como ánodo y aumenta su oxidación (Chopard et al., 2017; Liu et al., 2008; Saavedra O., 2018; Sany, 2016). Este par es de gran interés ya que generalmente son minerales que se

encuentran juntos y están en contacto entre sí (Holmes & Crundwell, 1995; Saavedra et al., 2018b; Saavedra O., 2018). Además, a medida que aumenta la concentración de ion férrico en solución y la acidez, la densidad de corriente de corrosión también aumenta y el potencial mixto de la celda galvánica se vuelve más positivo, favoreciendo la oxidación de la calcopirita como se muestra en la Figura 12, diagrama de la interacción galvánica entre minerales de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ) (Berry et al., 1978; Debernardi & Carlesi, 2013; Saavedra et al., 2018b; Saavedra O., 2018; Yang et al., 2021). La adición de microorganismos de biolixiviación también en este caso, puede incrementar aún más la velocidad de disolución del Cu (Bakhti et al., 2024; Noguchi & Okibe, 2020; Saavedra O., 2018).

**Figura 12**

*Diagrama de interacción galvánica entre minerales.*



*Nota.* Diagrama de interacción galvánica entre minerales de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ), en medio de microorganismos (*T. f. Thiobacillus ferrooxidans*). Fuente: Saavedra O (2018).

## 2.9. Formulación de la hipótesis

### A) Hipótesis general

La interacción galvánica entre los minerales combinados de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena, en un medio de cultivo microbiano 0K ácido (pH 1.8), favorecerá un incremento de solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados. Este efecto podrá ser identificado y cuantificado mediante técnicas electroquímicas.

### B) Hipótesis específicas

- La caracterización mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX) permitirá identificar las propiedades del grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena.
- La fabricación de electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%), mostrará una respuesta efectiva al usar aceite mineral como aglutinante.
- La caracterización electroquímica mediante potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC) permitirá diferenciar la respuesta de los EPC y EPC-minerales de calcopirita, magnetita, galena, calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%) en el medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8.
- La interacción galvánica entre los minerales estudiados tendrá un efecto positivo en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y VC.

## **2.10. Identificación de variables**

### **2.10.1. Variables dependientes**

- Solubilización del cobre a partir de la calcopirita en combinación con minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena.

### **2.10.2. Variables independientes**

- Interacción galvánica de la combinación de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena.
- Composición química elemental de los minerales.
- Voltamperometría cíclica con picos anódicos y catódicos para los minerales de calcopirita, magnetita, galena, calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en presente de cobre, hierro y plomo.

### **2.10.3. Variables intervinientes**

- Medio cultivo microbiano 0 K (ácido, pH 1.8).
- Tipo de electrodo a utilizar.
- Condiciones de pH controlado.

## 2.11. Operacionalización de variables

En la Tabla 1 se presenta la operacionalización de las variables que forman parte del trabajo de investigación, detallando sus definiciones conceptuales y operacionales, dimensiones, indicadores, instrumentos y técnicas utilizadas, así como la escala de medición empleada.

**Tabla 1**

*Operacionalización de las variables*

<b>VARIABLES</b>	<b>Definición conceptual</b>	<b>Definición operacional</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Instrumentos / Técnicas</b>	<b>Escala de medición</b>
<b>Variable Independiente: Interacción galvánica de la combinación de minerales de CuFeS<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y CuFeS<sub>2</sub>-PbS.</b>	Proceso de transferencia de electrones y redistribución de carga entre los minerales combinados (CuFeS <sub>2</sub> -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> y CuFeS <sub>2</sub> -PbS) en un medio ácido.	Evaluación del potencial de circuito abierto (PCA), voltamperometría cíclica (VC) y diagramas electroquímicos para determinar el efecto galvanizado sobre la solubilización.	- Transferencia electrónica. - Potencial galvánico. - Reacción catódica y anódica.	- Potencial de corrosión mixto (Ecorr). - Corriente de corrosión (Icorr). - Desplazamientos en los picos VC.	-Potenciostato Galvanostato AUTOLAB. -Electrodos de pasta de carbón-modificados (EPC).	Cuantitativa (voltios, mA/cm <sup>2</sup> ).
<b>Variable Dependiente: Solubilización del cobre a partir de calcopirita en combinación con minerales de CuFeS<sub>2</sub>-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> y CuFeS<sub>2</sub>-PbS.</b>	Proceso mediante el cual el cobre contenido en la CuFeS <sub>2</sub> se disuelve, facilitado por la interacción con minerales combinados de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> y PbS en un medio ácido controlado.	Cuantificación del cobre disuelto y velocidad de disolución mediante técnicas electroquímicas y análisis de superficie mineral.	-Velocidad de disolución. -Eficiencia de recuperación de cobre. - Formación o inhibición de capa pasiva.	- Velocidad de disolución relativa. - Cambios en la densidad de corriente. - Evidencia de pasivación.	- Análisis MEB-EDS y DRX. - Voltamperometría cíclica (VC). - Medición de cobre en solución.	Cuantitativa (mg/L, % de incremento).

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Alcance de la investigación

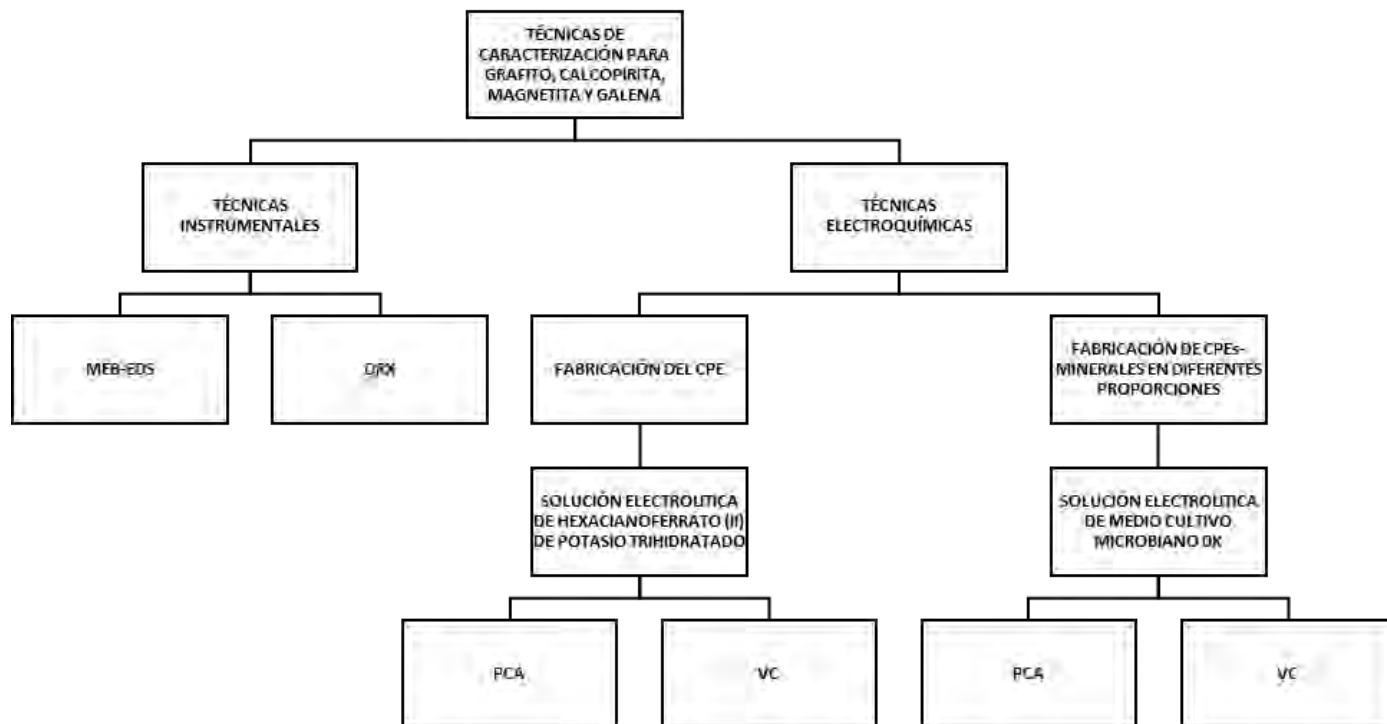
**Descriptivo y exploratorio:** Este proyecto de investigación se plantea conociendo que, en la actualidad, existen pocos estudios sobre las interacciones galvánicas entre distintos minerales, con el fin de incrementar la solubilización del mineral de interés a partir de minerales sulfurados de baja ley, para el uso habitual en los procesos industriales biomineros. Existen referencias bibliográficas de estudios realizados en otros países del mundo con amplio desarrollo y similitud general a este tipo de investigación.

### 3.2. Diseño de la investigación

**Diseño experimental:** En el presente trabajo se realizará la evaluación de la interacción galvánica que resulta de la combinación de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena para incrementar la solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados. Estos minerales se caracterizarán mediante las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido con Espectroscopía de Dispersión de Energía (MEB-EDS); técnicas electroquímicas como Potencial de Circuito Abierto (PCA) y Voltamperometría Cíclica (VC). Luego los electrodos de pasta de carbón-minerales (EPC-minerales) ayudarán a evaluar las interacciones galvánicas entre minerales combinados calcopirita-magnetita ( $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ ) y calcopirita-galena ( $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$ ) en un medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8, con las técnicas electroquímicas Potencial de Circuito Abierto (PCA) y Voltamperometría Cíclica (VC). En la Figura 13, se muestra el diagrama del diseño experimental.

**Figura 13**

*Diagrama del diseño experimental.*



### 3.3. Lugar de estudio

Para aplicar técnicas electroquímicas y estudiar la biolixiviación, los experimentos se realizaron en el laboratorio del Grupo de Investigación en Electroquímica y Materiales (GIE&M) N° 210 del Pabellón de Control de Calidad de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco-Perú.

Las técnicas de análisis de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) se llevaron a cabo en la Universidad Privada Antenor Orrego de Trujillo-Perú.

### 3.4. Muestras de minerales

Las muestras de minerales fueron recolectadas de diferentes localidades, las cuales se detallan a continuación:

- Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ): Mina La Sebastiana, Tacna, Perú.
- Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ): Mina San Luis de Potosí, México.
- Galena ( $\text{PbS}$ ): Mina La Sebastiana, Tacna, Perú.

#### 3.4.1. Tipo de muestreo

**Muestreo no probabilístico:** La investigación empleó un muestreo no probabilístico, seleccionando intencionalmente muestras de calcopirita, magnetita y galena según su disponibilidad y características. Esto permitió un análisis detallado y una caracterización precisa de las propiedades electroquímicas y las interacciones galvánicas entre los minerales, sin buscar representatividad estadística de la población mineralógica. Por ello, el enfoque aplicado siguió criterios de conveniencia y especificidad propios de estudios descriptivos y exploratorios.

### 3.5. Materiales, reactivos y equipos de laboratorio

#### 3.5.1. Materiales

- Gafas de seguridad marca 3M.
- Vasos precipitados.
- Micropipeta automática.
- Puntas de pipeta.
- Celda electroquímica.
- Electrodo de trabajo (electrodo de pasta de carbón-minerales).
- Contraelectrodo/electrodo auxiliar (Alambre de Pt al 99.9%).
- Electrodo de referencia ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ).

- Conexiones cocodrilo.
- Tijera.
- Papel bond.
- Alambre de Pt al 99.9% (Pt para los electrodos de pasta de carbón).
- Varilla de vidrio.
- Cautín soldador de estaño de 40 W con mango de madera.
- Espátula con cuchara.
- Cable de cobre estándar.
- Mortero de ágata.
- Barra de grafito extraída de la pila marca Panasonic D.
- Jeringas de 1 mL.
- Fiolas aforada de 50, 100 y 1000 mL.
- Alambres de estaño.
- Cutter.
- Papel filtro Whatman N° 42.
- Matraz Erlenmeyer.

### 3.5.2. Reactivos

- Agua ultrapura, resistividad 18.2 M $\Omega$ .cm.
- Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), P.a. 95-97%, marca Merck.
- Cloruro de potasio (KCl), Emsure® 99.5%, marca Merck.
- Fosfato de amonio monobásico ((NH<sub>4</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), Reag. 98%, marca Matheson Coleman & Bell.
- Sulfato de magnesio heptahidratado (MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O), ACS 95%, marca Merck.

- Hexacianoferrato (II) de potasio trihidratado ( $K_4Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O$ ), R-JTBaker 98.5%, marca Baker.
- Aceite mineral (nujol), marca Signa-Aldrich.
- Amoniac (NH<sub>3</sub>), ACS 28-30%, marca Merck.

### 3.5.3. Equipos

- Potenciostato/galvanostato 128 N, marca AUTOLAB con software Nova 2.1.
- Laptop Omen.
- Balanza analítica HR-250AZ marca AND rango (250g/0.1 mg).
- Baño de ultrasónico, marca BIOBASE.

## 3.6. Técnicas instrumentales para la caracterización de minerales

Los análisis de los minerales de grafito (pila marca Panasonic D), calcopirita ( $CuFeS_2$ ), magnetita ( $Fe_3O_4$ ) y galena (PbS) se realizaron mediante Microscopía electrónica de barrido con espectroscopia de dispersión de energía (MEB-EDS) y Difracción de rayos X (DRX). Estas técnicas permitieron determinar la morfología, cristalinidad, tamaño aproximado, identidad y composición química de los minerales estudiados en esta tesis.

### 3.6.1. Microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS)

Para la caracterización de los minerales se empleó un microscopio electrónico de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS), modelo TESCAN Vega 3 LMU, con el propósito de analizar la morfología y composición química de las partículas en polvo. Las muestras fueron colocadas sobre un portamuestras adheridas a una cinta de carbón conductiva y posteriormente introducidas en la cámara del equipo para su análisis. El MEB utilizó una sonda

Bruker modelo Advance, aplicando un voltaje de aceleración entre 15 a 30 KeV, mientras que la detección por EDS se realizó en un rango de 0 a 10 KeV.

### **3.6.2. Difracción de rayos x (DRX)**

La caracterización por difracción de rayos X (DRX) de los minerales de grafito (pila marca Panasonic D), calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y galena ( $\text{PbS}$ ) se realizó con un difractómetro Bruker-D8-Eco Modelo Advance, utilizando un voltaje de 40 kV y 30 mA, con fuente de radiación de cobre ( $\lambda=1,5418 \text{ \AA}$ ) y una velocidad de barrido de  $2^\circ/\text{min}$ . El ángulo de escaneo de medición se fijó entre  $10^\circ$  a  $70^\circ$  y  $80^\circ$  en  $2\theta$ , con un paso de barrido de  $0.02^\circ$ .

Las muestras fueron molidas y colocadas en el anillo a través del orificio central de la placa circular. Posteriormente, se aplanaron con un cilindro de acero y se presionaron durante 5 a 8 segundos antes de retirar verticalmente la placa circular. El anillo con la muestra compactada fue retirado y se eliminó el material sobrante. Finalmente, el anillo se ensambla en el soporte correspondiente para el análisis por DRX.

### **3.7. Técnicas de caracterización electroquímica de los minerales**

Para las mediciones electroquímicas se utilizó un potencióstato/galvanostato, marca AUTOLAB 128N, con el software Nova 2.1. Se aplicaron diversas técnicas de caracterización, como el potencial de circuito abierto (PCA) y la voltamperometría cíclica (VC). Para caracterizar los minerales de calcopirita, magnetita, galena, y las interacciones galvánicas en las combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75/, 50:50% y 75:25%), se empleó un medio de cultivo 0K ajustado a pH 1.8 con ácido sulfúrico.

Se utilizó una celda electroquímica típica de tres electrodos: el electrodo de trabajo (WE) consistió en electrodo de pasta de carbón minerales (EPC) y electrodos de pasta de carbón-

minerales (EPC-minerales); el contraelectrodo o electrodo auxiliar (CE) fue un alambre de platino (Wong et al., 2021) y el electrodo de referencia (ER) fue de Ag/AgCl.

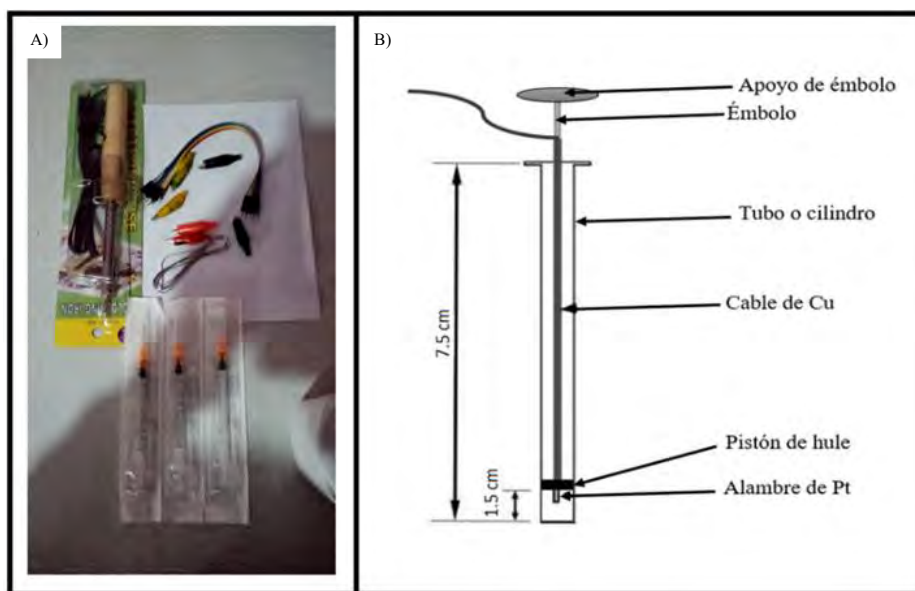
### 3.7.1. Diseño y fabricación de electrodos

Se fabricaron los cuerpos de los electrodos de pasta de carbón (EPC), los cuales se emplearon como electrodos de trabajo (ET). Se utilizaron jeringas de 1mL sin agujas como se muestra en la Figura 14.

Se cortaron 30cm de cable de cobre y se retiró el aislamiento, dejando un extremo con 5cm y el otro con 1cm sin cubierta. El extremo con 5cm de cable pelado se conectó al potenciostato mediante una pinza de cocodrilo, mientras que el extremo de 1cm se soldó al Pt de igual longitud utilizando un cautín soldador de estaño de 40W con mango de madera, para asegurar un buen contacto con la pasta de carbón. Finalmente, se cortó la punta del émbolo de goma.

#### Figura 14

*Diseño y fabricación del electrodo.*



*Nota.* A) Materiales a utilizar y B) Estructura del cuerpo del electrodo.

### 3.7.2. Fabricación del electrodo de pasta de carbón (EPC)

#### 3.7.2.1. Preparación de la pasta de carbón

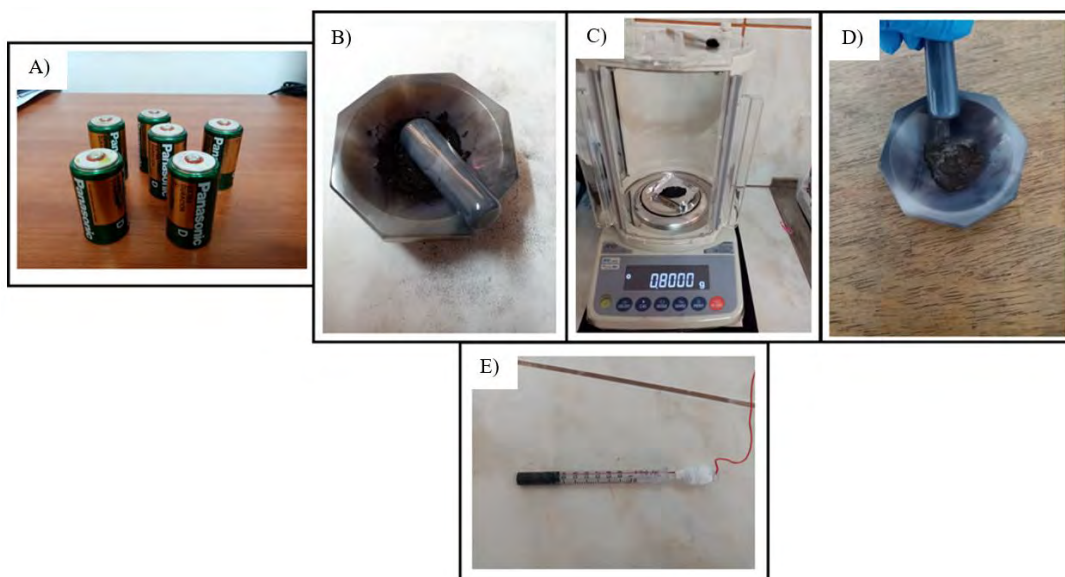
Se utilizó grafito de la barra de la pila marca Panasonic D, el cual fue molido en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino.

Se pesaron 0.8g de polvo de grafito y se vertieron en un mortero de ágata; posteriormente, se añadieron 0.18mL de aceite mineral (nujol). A continuación, se mezclaron ambos componentes hasta obtener una pasta homogénea y brillante. Luego, esta mezcla se introdujo en una jeringa de 1mL.

Después, se presionó el émbolo sobre una hoja de papel bond colocada sobre la mesa, y la superficie del electrodo de trabajo (EPC) se pulió sobre el papel bond al ejercer presión con el émbolo. Finalmente, el EPC se dejó a temperatura ambiente durante 10 días, tal como se muestra en la Figura 15.

#### Figura 15

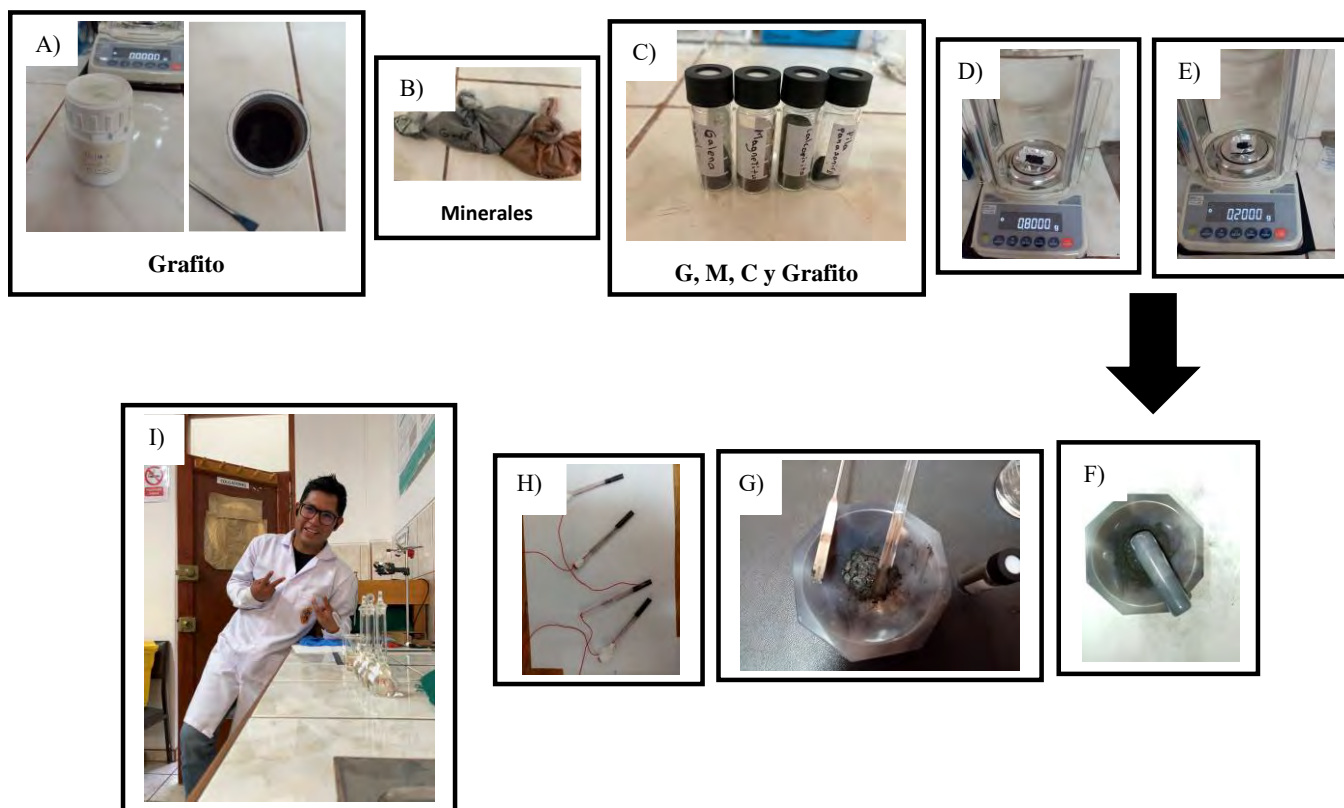
*Preparación del EPC.*





**Figura 16**

*Preparación de los diferentes EPC-minerales.*



*Nota.* A) Grafito; B) Minerales de C, M y G; C) Grafito, C, M y G; D) Pesado de grafito; E) Pesado de cada mineral; F) Mezcla de grafito y minerales; G) adición de aceite mineral para obtener la pasta; H) CPEs-minerales y I) Imagen de mi persona en el laboratorio.

### 3.7.3.2. Preparación de la pasta de carbón con diferentes proporciones de minerales

Las muestras combinadas de minerales de  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  fueron codificadas con las letras CM y CG, respectivamente. Asimismo, los electrodos de pasta de carbón-minerales (EPC-minerales) se denominaron EPC-CM y EPC-CG.

En primer lugar, se pesaron 0.8g de polvo de grafito y los diferentes pesos de las diferentes proporciones de los minerales CM (25:75%, 50:50% y 75:25%) y CG (25:75%, 50:50% y 75:25%), para luego colocarlos en un mortero de ágata. Posteriormente, se agregaron 0.3 mL de

aceite mineral, y se mezclaron hasta obtener pastas homogéneas. A continuación, las pastas preparadas se introdujeron en jeringas y se presionó el émbolo sobre una hoja de papel bond.

Finalmente, los diferentes EPC-minerales se dejaron reposar durante 10 días a temperatura ambiente, tal como se muestra la Figura 17. Los cálculos correspondientes a las proporciones de los minerales CM (25:75%, 50:50% y 75:25%) y CG (25:75%, 50:50% y 75:25%) se encuentran en el Anexo 1.

### Figura 17

*Preparación de las diferentes proporciones de EPC-minerales.*

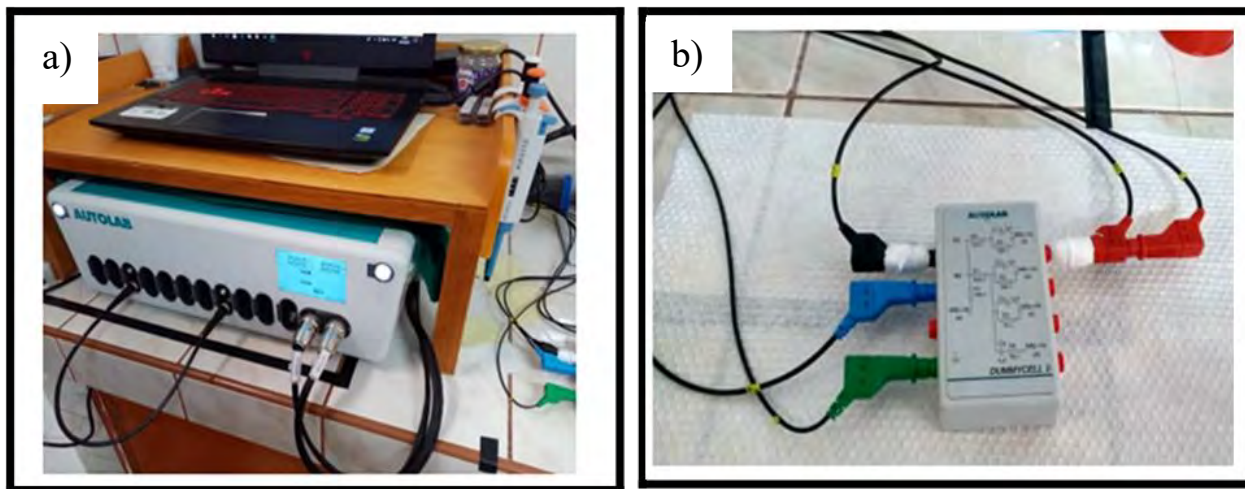


#### 3.7.4. Caracterización electroquímica de EPC y EPC-minerales

Se realizó la prueba de calibración del equipo del Potenciostato/Galvanostato 128N, marca AUTOLAB, usando la DUMMY CELL, como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**

*Calibración del Potenciostato/Galvanostato.*

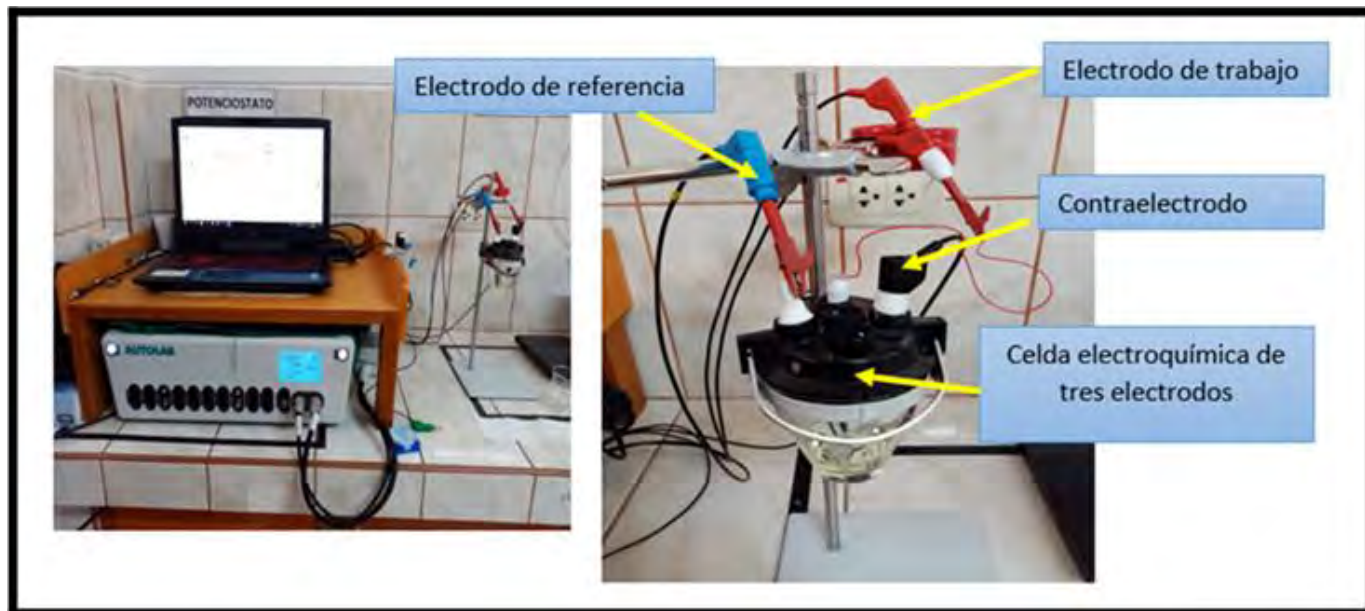


*Nota.* A) Equipo de Potenciostato/Galvanostato y B) la DUMMY CELL.

En la Figura 19, se muestra el equipo del Potenciostato/Galvanostato marca AUTOLAB, con la celda electroquímica de tres electrodos. Asimismo, este equipo se utilizó para la caracterización electroquímica de electrodos de pasta de carbón (EPC) y de los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales), aplicando las técnicas de potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC). Por otro lado, los componentes etiquetados correspondieron al electrodo de referencia (ER), al electrodo de trabajo (ET), al contraelectrodo o electrodo auxiliar (CE) y a la celda electroquímica de tres electrodos.

**Figura 19**

*Equipo Potenciostato/Galvanostato.*



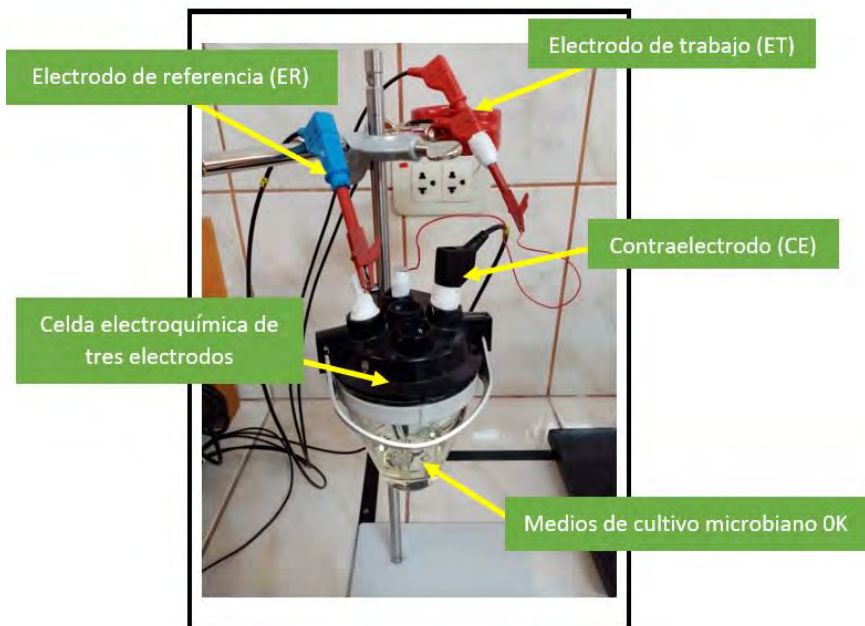
*Nota.* Potenciostato/Galvanostato marca AUTOLAB con la celda electroquímica de tres electrodos.

### 3.7.4.1. Celda electroquímica y medio de cultivo microbiano

Para el estudio de la interacción galvánica, se utilizó una celda electroquímica típica de tres electrodos: 1) el electrodo de trabajo (ET) consistió en electrodos de pasta de carbón-minerales (EPC-minerales); 2) el contraelectrodo (CE) fue un alambre de platino (Pt); y 3) el electrodo de referencia (RE) fue Ag/AgCl, con una celda de volumen de 50 mL. Además, como electrolito se utilizó un medio cultivo microbiano denominado 0K (Kim et al., 2002; Saavedra et al., 2018b), cuya composición fue la siguiente: 1 g/L KCl, 0.2 g/L MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O, 2.6 g/L (NH<sub>2</sub>)H<sub>2</sub>PO<sub>2</sub>, con un pH ajustado a 1.8 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 N. Asimismo, en la Figura 20, se muestra la celda electroquímica de tres electrodos en un medio de cultivo 0K. Los cálculos para el medio de cultivo microbiano se encuentran en el Anexo 2.

**Figura 20**

*Celda de tres electrodos en un medio cultivo 0K.*



### 3.7.4.2. Potencial de circuito abierto (PCA)

Se realizó la medición del potencial de circuito abierto (PCA) para cada electrodo sumergiendo el electrodo de trabajo (EPC) en la solución de  $K_4[Fe(CN)_6]$  0.025 M con un electrolito soporte de KCl 0.1M, hasta obtener valores de potencial constante.

Las mediciones del OCP se realizaron para cada uno de los electrodos de trabajo (EPC-C, EPC-M, EPC-G, EPC-CM y EPC-CG) sumergiéndolos en medio de cultivo microbiano 0K, tal como se especificó en la sección 3.7.4.1, hasta alcanzar potenciales constantes. Se esperó a la estabilización del PCA, cuyos valores fueron necesarios para aplicarlos en la técnica de voltamperometría cíclica (VC).

### 3.7.4.3. Voltamperometría cíclica (VC)

La caracterización mediante voltamperometría cíclica (VC) de los electrodos de pasta de carbón (EPC) y de pasta de carbón-minerales (EPC-minerales) se realizó en direcciones negativas

y positivas. Posteriormente, los EPC y EPC-minerales se retiraron de la celda, se enjuagaron con agua ultrapura y se renovaron las superficies. Para ello, se presionó el émbolo, se descartó una pequeña porción de pasta de carbón y se homogenizó la superficie antes de proceder con la siguiente medición.

La caracterización electroquímica mediante voltamperometría cíclica (VC) de los electrodos de trabajo (EPC y EPC-minerales), utilizada para evaluar la solubilización del cobre, se presenta en la Tabla 2 según los rangos de potencial indicados. En dicha tabla, los elementos con una marca de verificación (✓) señalan que se realizó la parte experimental correspondiente, mientras que los espacios en blanco indican que no fue ejecutada. Todos los voltamogramas se generaron mediante el electrodo de referencia Ag/AgCl, y posteriormente se convirtieron a potenciales referentes al electrodo normal de hidrogeno (Normal hydrogen electrode, NHE).

**Tabla 2**

*Caracterización voltamperométrica del EPC y EPC-minerales.*

	GRAFITO	CALCOPIRITA C	MAGNETITA M	GAELNA G	25:75% CM	50:50% CM	75:25% CM	25:75% CG	50:50% CG	75:25% CG
OCP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rango de potencial	-0.5 a 1 V	-0.68 a 0.82 V	-0.68 a 0.82 V	-1 a 1 V	-0.68 a 0.82 V	-0.68 a 0.82 V	-0.68 a 0.82 V	-1 a 1 V	-1 a 1 V	-1 a 1 V
Velocidad de barrido	25 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s	20 mV/s
$K_4[Fe(CN)_6]$ 0.025 M con KCl 0.1M	✓									
Medio de cultivo microbiano OK		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

*Nota.* Datos tomados de los rangos de potenciales de Lima et al. (2013), Saavedra et al. (2018b) y Urbano et al. (2016).

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Resultados de la caracterización de MEB-EDS y DRX de grafito y minerales

#### 4.1.1. Resultados de la caracterización de MEB-EDS

##### Grafito

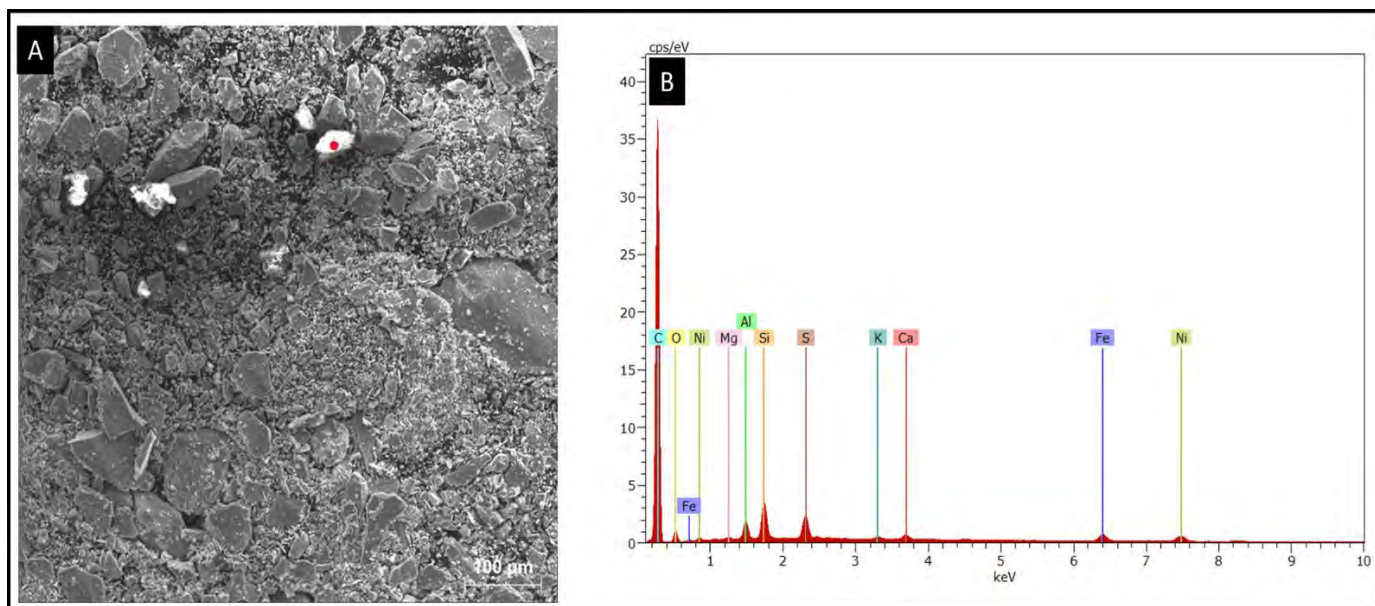
En la Figura 21 se muestra el análisis MEB-EDS de grafito (pila marca Panasonic D). En la Figura 21A, se observa la micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) del grafito (pila marca Panasonic D), en la cual se aprecian partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. Asimismo, se observa que dichas partículas presentan morfologías irregulares en su estructura, lo cual concuerdan con lo señalado por Papanikolau et al. (2020); Soltani et al. (2019) y Wong et al. (2021), quienes describen que el grafito suele presentar superficies rugosas y bordes irregulares, en los procesos de molienda o dispersión utilizados durante su preparación.

Por otro lado, en la Figura 21B el análisis elemental mediante espectroscopía de dispersión de energía (EDS), el cual muestra que el carbono es el elemento principal en el pico correspondiente característico del grafito (pila marca Panasonic D). Asimismo, se observan señales de otros elementos en menor proporción, como O, Mg, Si, S, Ca, Fe y Ni. La presencia de estos elementos traza que podría deberse a impurezas o a contaminación superficial originada durante la preparación de la muestra.

En conjunto, tanto la morfología observada y el análisis elemental identificado confirman que el material analizado corresponde a un grafito de alta pureza, con estructura laminar bien conservada y una cantidad mínima de contaminación. Por otro lado, estos resultados respaldan su adecuada calidad para ser empleado en procesos de modificación superficial o funcionalización superficial, orientados a mejorar sus propiedades fisicoquímicas o electroquímicas.

## Figura 21

*Análisis MEB-EDS de grafito.*



*Nota.* A) Micrografía de MEB de las partículas de grafito y B) Espectro EDS grafito.

En la Tabla 3 se presenta el análisis elemental del grafito (pila marca Panasonic D), se expresan en porcentaje en peso (% en peso) y porcentaje atómico (% atómico). Es importante señalar que estos resultados corresponden al análisis elemental por EDS realizado en los puntos de la muestra promedio (P). Según la Tabla 3, el análisis elemental revela que el carbono es el componente principal, lo que confirmando la alta pureza del grafito (pila marca Panasonic D). Además, se observa una ligera presencia de óxidos, los cuales probablemente se originan por la exposición al aire durante la preparación de la muestra. Por otra lado, también se detectan otros elementos como Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe y Ni, cuya presencia coinciden con los resultados reportados por Zhang et al. (2021); Boroujerdi et al. (2022); Torrinha et al. (2018) y Kouchakinejad et al. (2020), quienes señalan que el grafito (pila marca Panasonic D) tiende a formar una capa superficial oxidada tras el contacto con la atmósfera. Donde los resultados EDS confirman que el

grafito analizado presenta una composición principal de carbono y una baja cantidad de impurezas inorgánicas, evidenciando así su pureza elevada y estabilidad estructural, cualidades que lo convierten en un material favorable para aplicaciones industriales y científicas.

**Tabla 3**

*Análisis elemental por EDS grafito.*

Elemento	M (Grafito)	
	% en peso	% atómico
	P (Promedio)	P (Promedio)
C K	87.23	91.89
O K	8.02	6.34
Mg K	0.14	0.07
Al K	0.75	0.35
Si K	1.38	0.62
S K	0.83	0.33
K K	0.10	0.03
Ca K	0.26	0.08
Fe K	0.65	0.15
Ni K	0.64	0.14
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

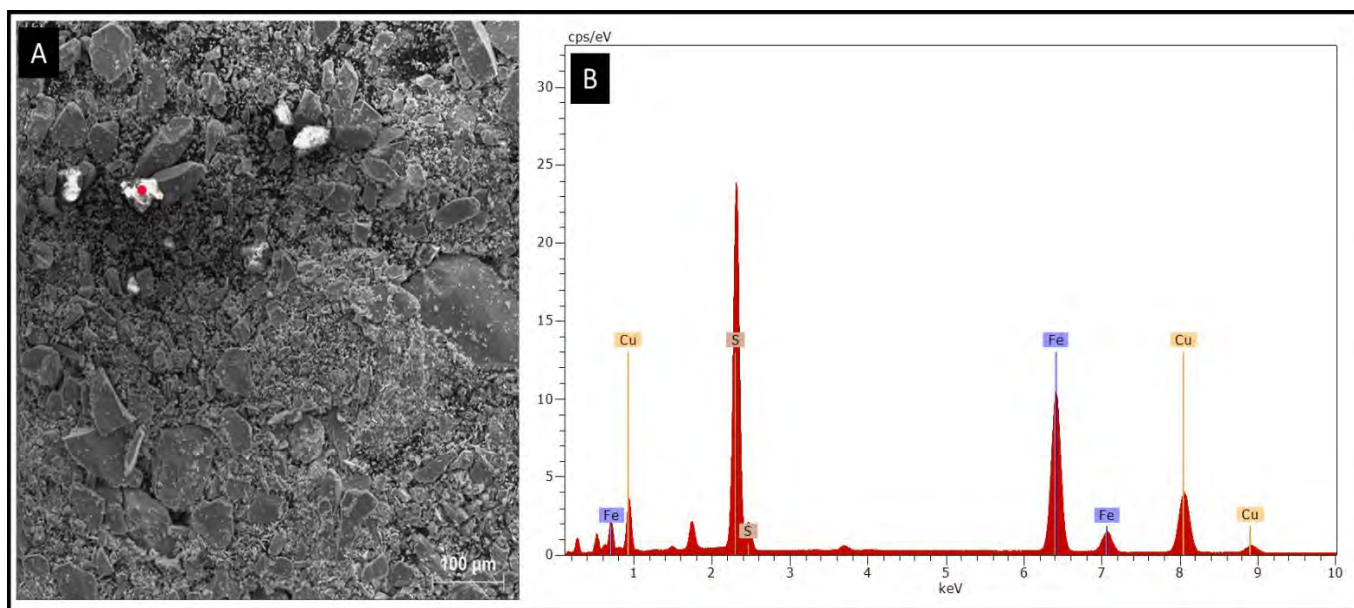
En resumen, el análisis MEB-EDS del grafito (pila marca Panasonic D) muestra partículas de formas irregulares, con predominio de carbono, acompañada de trazas de elementos metálicos y alcalinos, teniendo la presencia de impurezas menores, como oxígeno, magnesio y otros elementos. Esto confirma que el grafito (pila marca Panasonic D) tiene alta pureza y una estructura laminar bien conservada, lo que lo hace adecuado para aplicaciones industriales y científicas.

### Calcopirita

En la Figura 22, correspondiente al análisis MEB-EDS del mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), se observa la Figura 22A la micrografía obtenida mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), en las que se observan partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. Por otro lado, la Figura 22B muestra el análisis elemental por espectroscopía de dispersión de energía (EDS), en el cual se identifican picos de S, Cu y Fe, elementos que confirman la presencia del mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Estos resultados coinciden con los hallazgos reportados por Chen et al. (2021), Ghomani et al. (2020) y Kizilca & Copur (2016), quienes observaron elementos similares en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

### Figura 22

*Análisis MEB-EDS del mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).*



Nota. A) Corresponde a la micrografía de SEM del mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) B) Espectro EDS de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

En la Tabla 4 se presenta el análisis elemental por EDS de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), se expresan en porcentaje en peso (% en peso) y porcentaje atómico (% atómico). Los resultados corresponden al análisis elemental efectuado en los puntos de la muestra promedio (P). Según la Tabla 4, se observa el análisis elemental EDS del Cu, S y Fe, los cuales se relacionan con el mineral de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Sin embargo, existe una dispersión de estos elementos en el punto analizado del promedio (P). Además, se detectan otros elementos como Al, Si, Ca, C y O, los cuales podrían deberse a impurezas presentes en la muestra. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Chen et al. (2021), Ghomani et al. (2020) y Kizilca & Copur (2016), quienes también identificaron la presencia de estos mismo elementos similares en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

**Tabla 4**

*Análisis elemental por EDS calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).*

Elemento	M ( $\text{CuFeS}_2$ )	
	% en peso	% atómico
	P (Promedio)	P (Promedio)
Al K	0.19	0.19
Si K	1.18	1.12
S K	<b>31.96</b>	<b>37.14</b>
Ca K	0.31	0.20
Fe K	<b>30.47</b>	<b>20.37</b>
Cu K	<b>21.99</b>	<b>12.95</b>
C K	9.09	20.07
O K	4.81	7.96
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

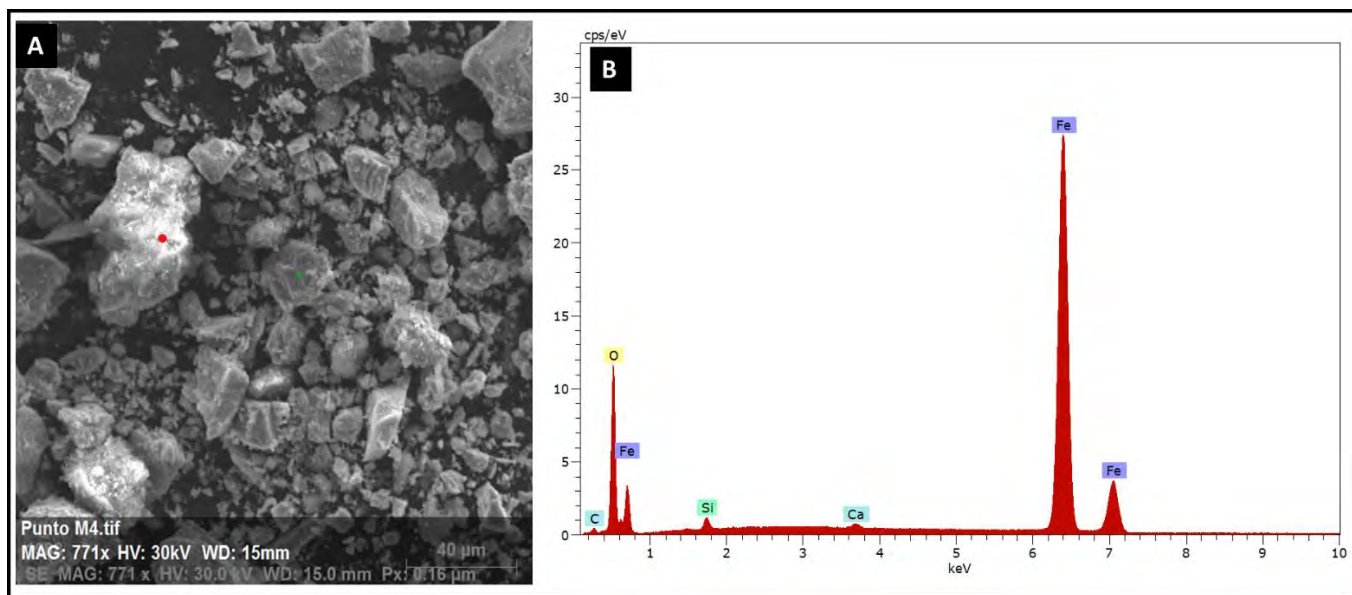
En resumen, en la Figura 22A, la micrografía MEB evidencia partículas de diferentes tamaños y formas irregulares, mientras que el espectro EDS (Figura 22B) confirma la presencia de los elementos característicos de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), aunque con cierta dispersión en los puntos analizados. A su vez, la detección de elementos adicionales como Al, Si, Ca, C y O se atribuye a impurezas o contaminación superficial.

### Magnetita

En la Figura 23 se presenta el análisis MEB-EDS del mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). En primer lugar, la Figura 23A muestra la micrografía SEM del mineral, en la que se observan partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. Por otro lado, la Figura 23B presenta el análisis elemental por espectroscopía EDS, el cual identifica picos correspondientes a elementos como S, Zn, Cu, C, Fe y O. Es fundamental señalar que tanto el hierro (Fe) como el oxígeno (O) son elementos característicos del mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Estos resultados coinciden con los estudios encontrados por Aftabtalab & Sadabadi (2015), Fahlepy & Tiwow (2018) y Lee & Kim (2019), quienes también reportaron la presencia de elementos similares en la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

### Figura 23

*Análisis MEB-EDS del mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).*



*Nota:* A) Micrografía MEB del mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y B) Espectro EDS de la muestra de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

En la Tabla 5 se muestra el análisis elemental por EDS de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) se expresan en porcentaje en peso (% en peso) y porcentaje atómico (% atómico). Los resultados se obtuvieron

a partir del análisis elemental EDS realizado en diferentes puntos de la misma muestra del promedio (P). Según la Tabla 5, se identificó la presencia de Fe y O, elementos asociados al mineral de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Sin embargo, existe una dispersión de estos elementos en el punto analizados de la muestra del promedio (P). Además, se identificaron otros elementos como C, Mg, Si, S, Ca, Zn, Cu, Na y K, los cuales podrían corresponder a impurezas. Estos hallazgos coinciden con los estudios de Aftabtalab & Sadabadi (2015), Fahlepy & Tiwow (2018) y Lee & Kim (2019), quienes también identificaron elementos similares en la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

**Tabla 5**

*Análisis elemental por EDS de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).*

Elemento	M ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )	
	% en peso	% atómico
	P (Promedio)	P (Promedio)
C K	9.33	18.68
O K	<b>33.90</b>	<b>49.35</b>
Mg K	0.65	0.58
Al K	1.47	1.18
Si K	2.86	2.52
S K	5.83	6.06
Ca K	1.00	0.54
Fe K	<b>33.94</b>	<b>14.95</b>
Zn K	10.20	5.57
Cu K	0.41	0.23
Na K	0.3	0.25
K K	0.1	0.07
<b>Total</b>	<b>99.99</b>	<b>99.98</b>

En resumen, En la Figura 23A, la micrografía MEB de la magnetita muestra partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. De igual modo, el análisis EDS de la Figura 23B muestra varios elementos, destacando Fe y O, característicos de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Por su parte, la Tabla 5 presenta los resultados del punto promedio (P) de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), donde si bien Fe y O predominan, existe variabilidad en su distribución entre los diferentes puntos analizados. Además, se han identificado otros elementos como C, Mg, Si, S, Ca, Zn, Cu, Na y K, que probablemente

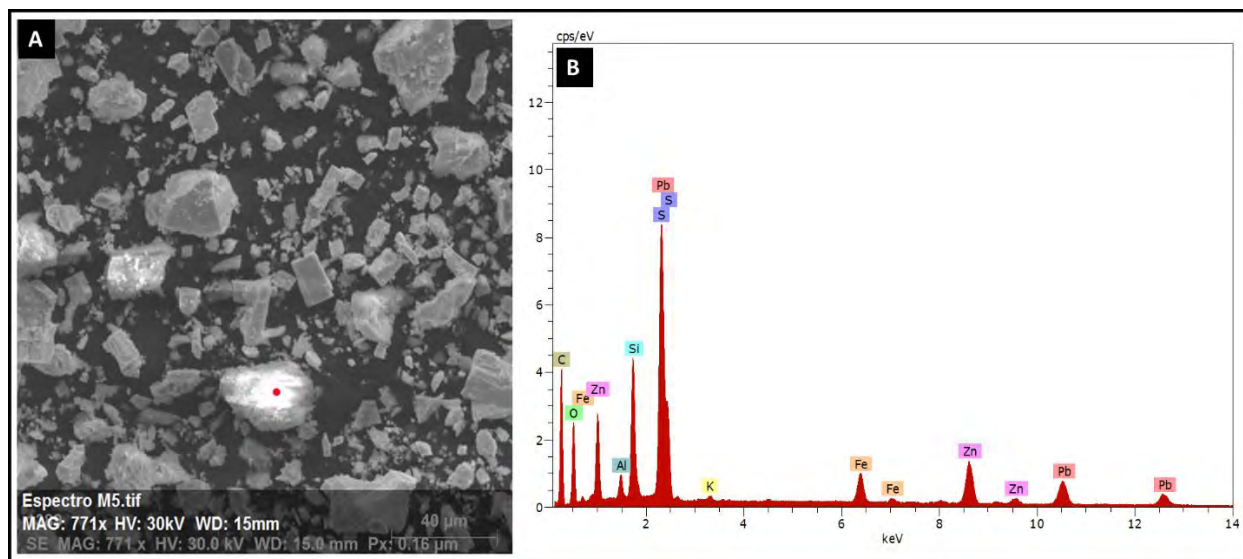
correspondan a impurezas. En consecuencia, los resultados obtenidos son coherentes con estudios previos.

### Galena

En la Figura 24, el análisis MEB-EDS del mineral de galena (PbS). En la Figura 24A, se observa la micrografía MEB del mineral de galena (PbS), donde se aprecian partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. Por otro lado, en la Figura 24B, se muestra el espectro elemental obtenido mediante espectroscopía EDS, que muestra picos correspondientes a la presencia de C, O, Fe, Zn, Al, Si, K, Pb y S. Es importante destacar que el Pb y S son elementos representativos del mineral galena (PbS), lo cual concuerda con los estudios de Al-Saqrat et al. (2023), Flores-Álvarez et al. (2017) y Xie et al. (2021), quienes también reportan la presencia de elementos similares en la galena (PbS).

### **Figura 24**

*Análisis MEB-EDS del mineral de galena (PbS).*



*Nota:* A) Micrografía MEB del mineral de galena (PbS) y B) Espectro EDS de la muestra de galena (PbS).

Los resultados mostrados en la Tabla 6 provienen del análisis elemental por EDS de galena (PbS) realizado en los puntos promedio de la muestra (P) se expresan en porcentaje en peso (% en peso) y porcentaje atómico (% atómico). En dicha Tabla 6, se evidencia la presencia de Pb y O, elementos asociados al mineral de galena (PbS). Sin embargo, existe una dispersión de estos elementos en el punto analizados de la muestra del promedio (P). Además, se identifican otros componentes como O, C, Al, Si, Fe, Zn, K, Ti, As, P, Mg y Na, lo cual estos resultados concuerdan con los estudios de Al-Saqr et al. (2023), Flores-Álvarez et al. (2017) y Xie et al. (2021), quienes describen elementos similares presentes en la galena (PbS).

**Tabla 6**

*Análisis elemental por EDS de galena (PbS).*

Elemento	M (PbS)	
	% en peso P (Promedio)	% atómico P (Promedio)
O K	23.86	15.48
C K	14.06	41.89
Al K	5.82	5.22
Si K	8.54	7.57
S K	<b>13.02</b>	<b>14.38</b>
Fe K	2.01	1.01
Zn K	10.97	12.18
Pb K	<b>8.93</b>	<b>0.88</b>
K K	1.58	0.91
Ti K	0.11	0.053
As K	0.34	0.10
P K	0.58	0.43
Mg K	0.09	0.09
Na K	0.09	0.09
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

En resumen, En la Figura 24A, la micrografía MEB de galena (PbS) revela una estructura con partículas de diferentes tamaños y formas irregulares. El análisis EDS (Figura 24B) confirma la presencia de Pb y S, elementos clave del mineral galena (PbS), y muestra trazas de O, C, Al, Si, Fe, Zn, K, Ti, As, P, Mg y Na, las cuales se atribuyen a impurezas, fases asociadas o contaminación

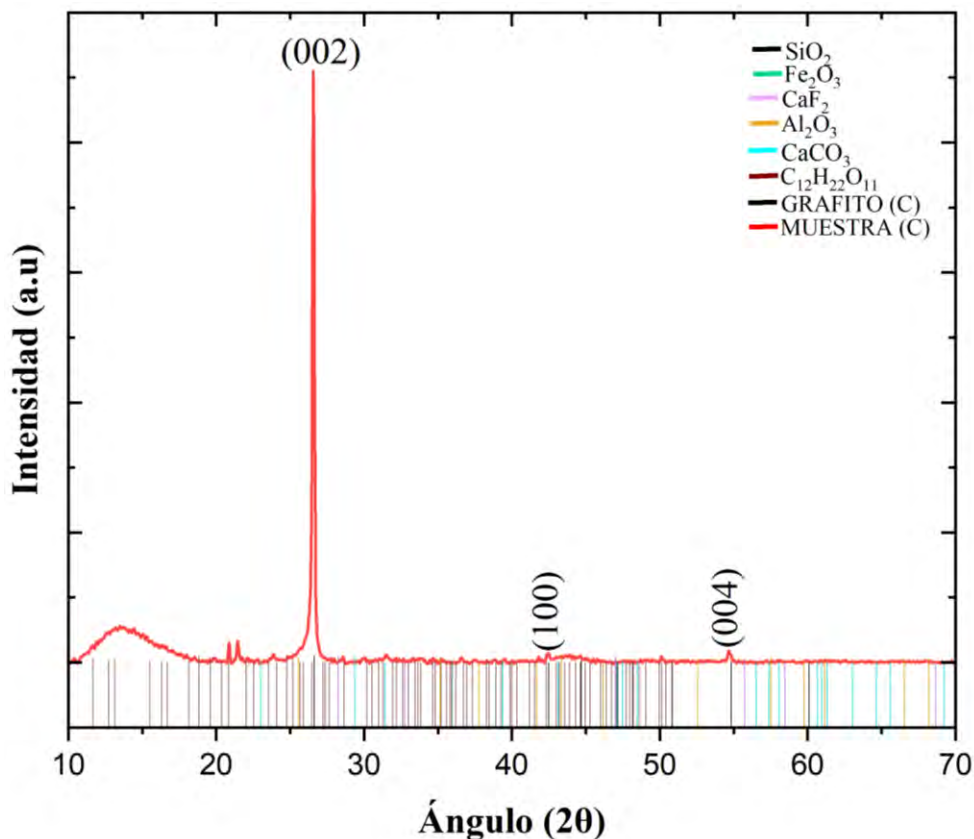
superficial. De acuerdo con los resultados de la Tabla 6, el análisis realizado en los puntos de la muestra promedio (P) evidencia una dispersión en la distribución elemental, detectándose Pb y S. Los resultados coinciden con los encontrados en investigaciones anteriores sobre la caracterización de la galena (PbS).

#### **4.2. Resultados de la difracción de rayos X (DRX)**

En la Figura 25 se presenta el difractograma de la muestra de grafito (C) en polvo caracterizada mediante DRX. Se identifican 3 picos de intensidad característicos en los ángulos  $2\theta$  (26.63, 42.50 y 54.84), correspondientes a los planos cristalográficos con índice de Miller (002, 100 y 004), lo que confirma la presencia de grafito (C) en la muestra. Este material presenta un sistema cristalino hexagonal con grupo espacial  $P6_3/mmc$ . Es importante señalar que los cristales de grafito (pila marca Panasonic D) suelen encontrarse asociados a impurezas con cuarzo ( $SiO_2$ ), óxido férrico ( $Fe_2O_3$ ), fluoruro de calcio ( $CaF_2$ ), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ), carbonato de calcio ( $CaCO_3$ ) y sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ). De manera similar, resultados obtenidos en análisis de DRX han sido realizados por Albertran (2020), Ban et al. (2012), Kalamabate et al. (2016), Muhsan & Lafdi Muhsan and Lafdi (2019), Sheshmani & Fashapoyeh (2013), quienes también reportan hallazgos similares, lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos en el DRX. En conjunto, los resultados confirman que la muestra corresponde mayoritariamente a grafito bien cristalizado, con bajo grado de desorden estructural y sin contribuciones relevantes de fases secundarias detectables por esta técnica.

**Figura 25**

*Difractograma de DRX de grafito (C).*



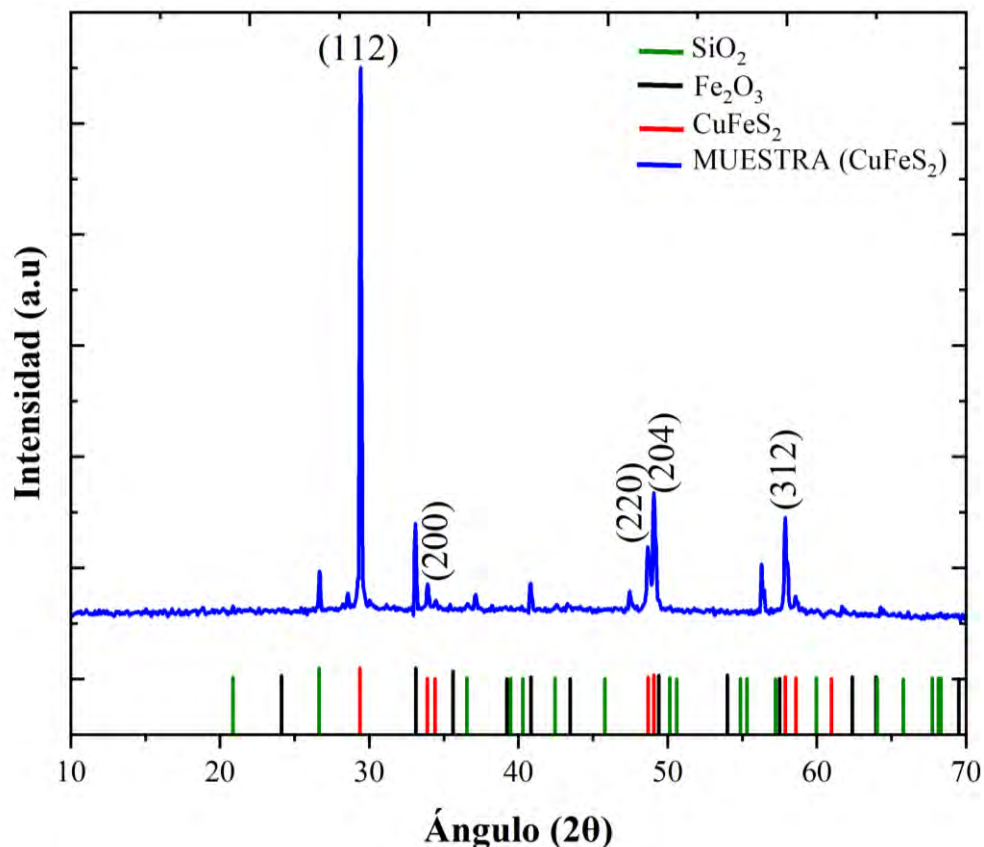
*Nota:* Difractograma de DRX de grafito (C) y sus fases identificadas con bases de datos. Fuente: Lukesh & Pauling (1950).

La Figura 26 se presenta el difractograma de la muestra de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en polvo, caracterizada mediante el análisis de DRX. Se identifica 5 picos de intensidad en los ángulos  $2\theta$  (29.39, 33.89, 48.69, 49.08 y 57.90), correspondientes a los planos cristalográficos con índices de Miller (112, 200, 220, 204 y 312). La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) muestra un sistema cristalino tetragonal con el grupo espacial  $I4_2d$ . Los picos de difracción presentan elevada intensidad y una reducida anchura a media altura, lo evidencia una estructura interna homogénea y un ordenamiento regular de las partículas cristalinas. Es importante señalar que los cristales de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) suelen

encontrarse asociados con cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). En este sentido, resultados similares en análisis de DRX han sido reportados por Turkmen & Kaya (2010), Wang et al. (2016) y Wen et al. (2019), lo que refuerza la consistencia de los hallazgos obtenidos en el DRX.

### Figura 26

*Difractograma de DRX de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).*



*Nota:* Difractograma de DRX de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y sus fases identificadas con bases de datos.

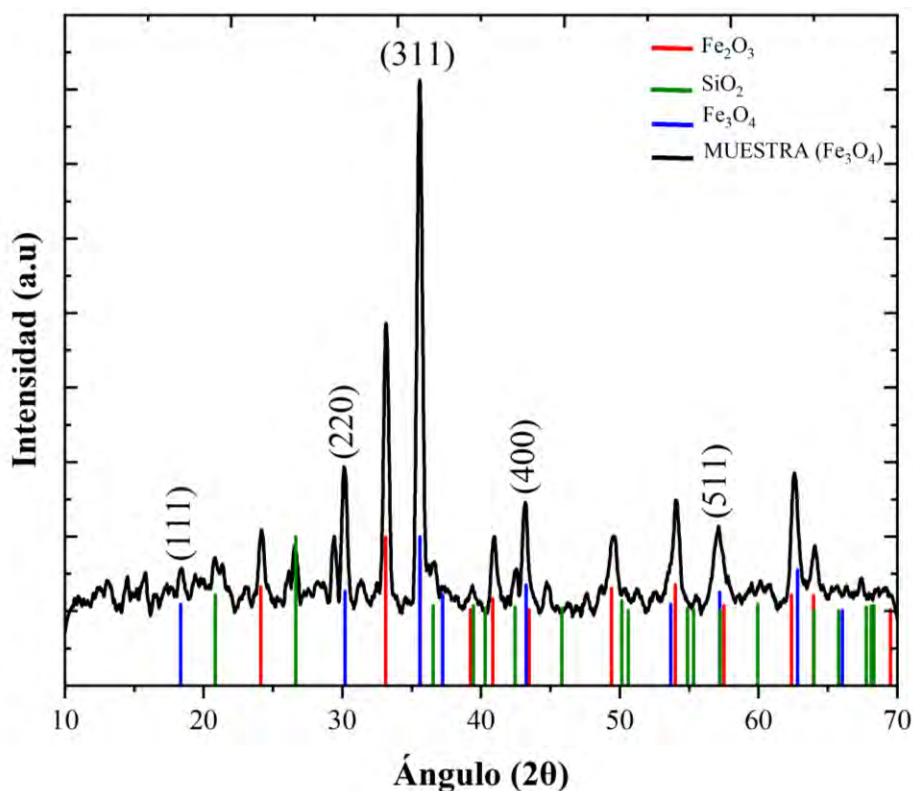
Fuente: Knight et al. (2011).

En la Figura 27, se observa el difractograma de la muestra de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en polvo donde se realizó la caracterización mediante el análisis de DRX. En dicho difractograma, se identifican 5 picos de intensidad correspondiente de magnetita en los ángulos  $2\theta$  (18.36, 30.21, 35.58, 43.25 y 57.20), con índice de Miller (111, 220, 311, 400 y 511). Estos resultados indican

que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) posee un sistema cristalino cúbico y pertenece al grupo espacial  $\text{Fd}\bar{3}m$ . Además, es común que los cristales de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) estén rodeados por cristales de cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). De manera similar, estudios previos realizados por Song et al. (2015) y Zhao et al. (2021), quienes también han reportado resultados similares en su análisis de DRX, lo que refuerza la validez de los hallazgos obtenidos en el DRX.

### Figura 27

*Difractograma de DRX de magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).*



*Nota:* Difractograma de DRX de magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y sus fases identificadas con bases de datos.

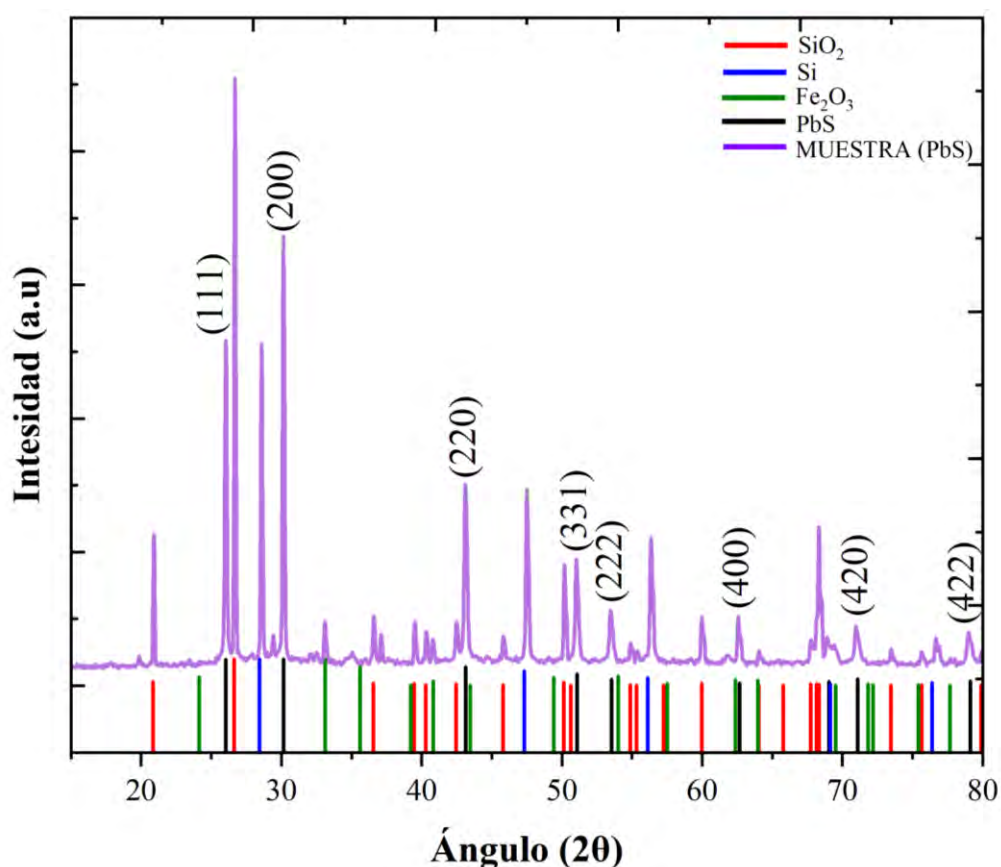
Fuente: Haavik et al. (2000).

En la Figura 28, se presenta el difractograma de la muestra de galena ( $\text{PbS}$ ) en polvo, caracterizada mediante el análisis de DRX. En este difractograma, se puede observar 8 picos de

intensidad que corresponden a galena en los ángulos  $2\theta$  (26.03, 30.14, 43.15, 51.08, 53.53, 62.67, 71.10 y 79.12), con índice de Miller (111, 200, 220, 331, 222, 400, 420 y 422). Estos resultados indican que la galena (PbS) presenta un grupo espacial  $fm\bar{3}m$  y un sistema cristalino cúbico. Además, los cristales de galena (PbS) están generalmente rodeados por cristales de cuarzo ( $SiO_2$ ), silicio (Si) y hematita ( $Fe_2O_3$ ). Es importante señalar que estos resultados coinciden con los reportes en el análisis de DRX, como los de Bai et al. (2013) y Ikumapayi et al. (2012), quienes también identificaron características similares en el análisis de DRX.

### Figura 28

*Difractograma de DRX de galena (PbS).*



*Nota:* Difractograma de DRX de galena (PbS) y sus fases identificadas con bases de datos. Fuente: Ramsdell (1925).

### **4.3. Resultado de la fabricación de EPC y EPC-minerales**

#### **4.3.1. Fabricación de EPC**

En este estudio, la fabricación de electrodos de pasta de carbón (CPE) se llevó a cabo utilizando una proporción específica de polvo de grafito y aceite mineral, con el fin de obtener una pasta homogénea y adecuada para su aplicación en dispositivos electroquímicos. Los resultados indican que la proporción de grafito de grafito y aceite mineral en la formulación de los electrodos afecta la calidad de la pasta. Una buena mezcla asegura una buena conductividad eléctrica y un electrodo estable, mejorando su desempeño en aplicaciones electroquímicas. Estos hallazgos coinciden con los estudios realizada por Cahytomo et al. (2024), Gamez et al. (2021), Nava & Gonzáles (2006) y Nava & Gonzáles (2005), quienes afirman que las características de la pasta de carbón (homogeneidad y proporción de sus componentes) son determinantes para la fabricación de electrodos de alto rendimiento.

#### **4.3.2. Fabricación de EPC-minerales**

Este proceso busca elaborar electrodos estables y con buena conductividad a partir de los minerales escogidos. La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la galena ( $\text{PbS}$ ) son minerales con propiedades electroquímicas que podrían afectar el comportamiento de los electrodos en ciertas aplicaciones como señalan Cahytomo et al. (2024), Gamez et al. (2021), Nava et al. (2008), Nava & Gonzáles (2006) y Nava & Gonzáles (2005), en particular en sensores o celdas electroquímicas. La calidad de la pasta es determinante para el buen funcionamiento de los electrodos en estas aplicaciones, y su homogeneidad y la proporción adecuada de sus componentes garantizan un rendimiento óptimo.

#### **4.4. Resultados de la caracterización electroquímica**

##### **4.4.1. Caracterización electroquímica de EPC y EPC-minerales**

###### **4.4.1.1. Potencial de circuito abierto (PCA)**

###### **4.4.1.1.1. Potencial de circuito abierto (PCA) de EPC**

Para verificar la estabilidad electroquímica de la superficie de electrodos de pasta de carbón (EPC), se tomaron mediciones de potencial de circuito abierto (PCA) durante 15 min. El electrodo se sumergió en una disolución 0.025 M de  $K_4[Fe(CN)_6]$  con electrolito soporte de KCl 0.1M, mostrando la estabilidad electroquímica de la superficie del electrodo.

El valor constante de OCP de 0.34 V (vs NHE) sugiere que el sistema alcanzó el equilibrio electroquímico, es decir, las reacciones de oxidación y reducción en la interfaz electrodo-solución se equilibraron. Este comportamiento es característico de un sistema estable, ya que no se apreciaron cambios importantes de potencial en el tiempo que duró la medición.

En resumen, el valor de 0.34 V vs NHE tras 15 minutos sugiere que el sistema ha alcanzado el equilibrio electroquímico, por lo que el electrodo de pasta de carbón es apropiado para aplicaciones electroquímicas futuras, tales como la medición de especies redox en solución o la fabricación de sensores. Además, los 15 minutos fueron suficientes para que el sistema se estabilizara sin cambios significativos en el comportamiento del PCA.

###### **4.4.1.1.2. Potencial de circuito abierto (PCA) de EPC-minerales**

Con el objetivo de evaluar la estabilidad electroquímica de la superficie de electrodos de pasta de carbón-mineral (EPC-minerales), se realizaron mediciones del potencial de circuito abierto (PCA) durante 60 minutos. Los electrodos fueron sumergidos en un medio de cultivo microbiano 0K, ácido, con un pH de 1.8. Este medio, libre de agentes oxidantes, permite observar el comportamiento pasivo o activo de cada sistema frente a procesos de corrosión o reacciones

redox. Asimismo, en la Tabla 7 se presentan los valores obtenidos del PCA (V vs NHE) en función del tiempo, correspondientes a los minerales analizados.

**Tabla 7**

*Valores de datos del PCA (V vs NHE) vs tiempo (min) en minerales.*

Nº	EPC-MINERALES	PCA
1	EPC-C	0.46 V
2	EPC-M	0.1 V
3	EPC-G	0.44 V
4	25:75% EPC-CM	0.5 V
5	50:50% EPC-CM	0.43 V
6	75:25% EPC-CM	0.41 V
7	25:75% EPC-CG	0.42 V
8	50:50% EPC-CG	0.47 V
9	75:25% EPC-CG	0.44 V

El análisis de estos valores permite establecer comparaciones sobre la estabilidad relativa de cada sistema. En general, un valor de PCA más positivo indica una mayor estabilidad frente a la corrosión, mientras que valores negativos reflejan una mayor tendencia a la oxidación o reactividad.

El sistema de la proporción 25:75% EPC-CM presentó el valor de PCA más alto (0.5 V), lo que sugiere una excelente estabilidad electroquímica. Este resultado indica que una mayor proporción de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en la mezcla con calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) mejora la resistencia a la corrosión del electrodo. Por el contrario, el sistema EPC-M ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  pura) mostró el valor más bajo (0.1 V), lo que evidencia una alta reactividad y menor estabilidad en el medio ácido.

Los electrodos de  $\text{CuFeS}_2$  (EPC-C) y  $\text{PbS}$  (EPC-G) mostraron valores positivos de PCA (0.46 V y 0.44 V, respectivamente), lo que indica un comportamiento pasivo moderadamente estable. Las combinaciones EPC-CG también mostraron buena estabilidad, destacándose el sistema de la proporción 50:50% EPC-CG con un valor de 0.47 V, superior incluso al de los minerales puros.

En resumen, las combinaciones de minerales en proporciones específicas pueden mejorar la estabilidad electroquímica de los electrodos. La mezcla de  $\text{CuFeS}_2$  con  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en una proporción 25:75% resultó ser la más estable, mientras que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) pura fue la menos favorable en términos de resistencia a la corrosión en el medio ácido 0K.

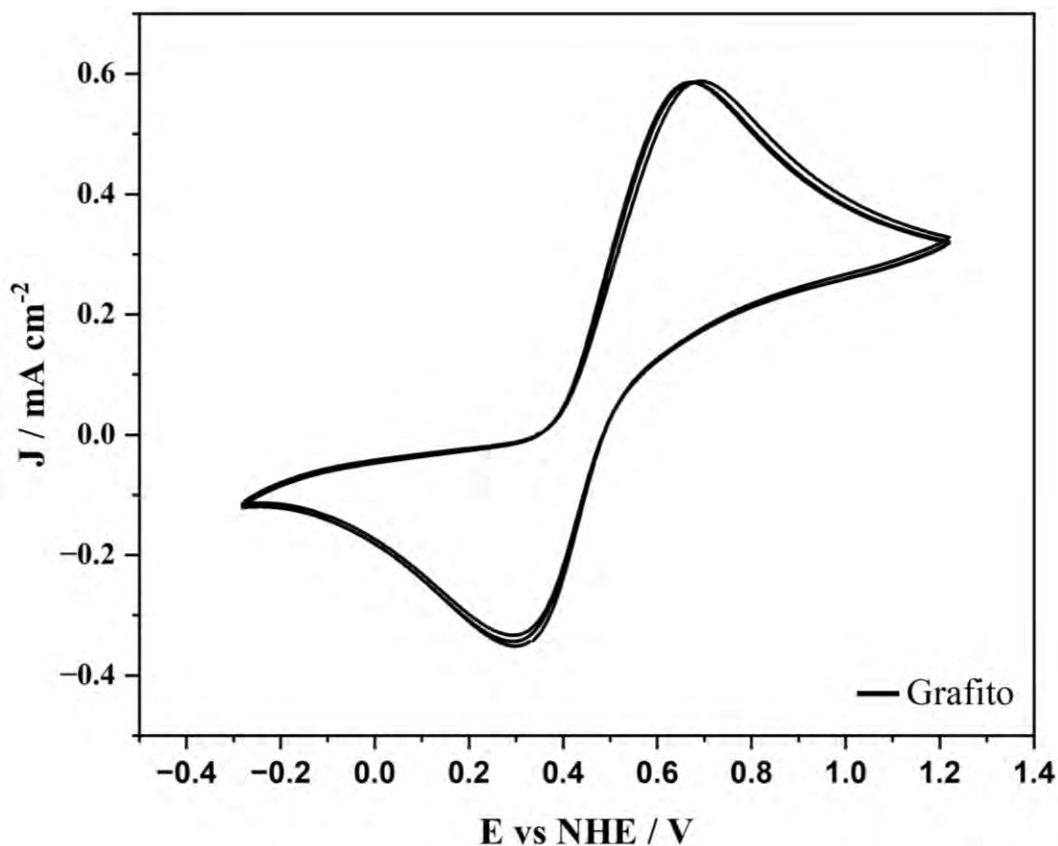
#### **4.4.1.2. Voltamperometría cíclica (VC)**

##### **4.4.1.2.1. Voltamperometría cíclica (VC) de EPC**

En la Figura 29 se muestra el voltamperograma cíclico del EPC del grafito (pila marca Panasonic D). Como puede apreciarse, en el voltamperograma se muestra el par redox característico del ferrocianuro/ferricianuro ( $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ ) a 0.68 V y 0.29 V vs NHE para los picos de oxidación y reducción de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ , respectivamente. De igual manera, los picos anódico y catódico en intensidad a medida que incrementa el número de ciclos. Este crecimiento indica que el hierro (Fe) se está depositando en la superficie del EPC, ya que no hay otra especie en la solución como, tal como indican Apetrei et al. (2011), Estrada-Aldrete et al. (2020), Kouchakinejad et al. (2020), Radhi et al. (2020) y Ejigu et al. (2025).

**Figura 29**

*Voltamperograma del EPC.*



*Nota:* Voltamperograma del EPC de una disolución 0.025 M de  $K_4[Fe(CN)_6]$  con electrolito soporte de KCl 0.1M. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA, a una velocidad de barrido 25 mV/s, durante 5 ciclos.

La relación de las alturas de los picos anódico y catódico evidencia una transferencia de electrones eficiente y una adecuada reversibilidad electroquímica para el sistema bajo estudio. Además, la estabilidad de la señal a lo largo de los ciclos sugiere que la superficie del electrodo de grafito no presenta una pasivación relevante, lo que facilita la difusión recurrente de las especies electroactivas hacia el electrodo. Esto confirma el buen rendimiento electrocatalítico del material de grafito (pila marca Panasonic D) empleado como EPC.

En resumen, el voltamperograma presentado en la Figura 29 corresponde a un sistema redox reversible de ferrocianuro/ferricianuro ( $[Fe(CN)_6]^{4-}/[Fe(CN)_6]^{3-}$ ) en el EPC de grafito (pila marca Panasonic D) y exhibe un comportamiento estable y eficiente frente al sistema hexacianoferrato bajo las condiciones experimentales dadas, respaldando su aplicación en estudios electroquímicos.

#### **4.4.1.2.2. Voltamperometría cíclica (VC) de EPC-minerales**

La voltamperometría cíclica (VC) constituye una herramienta fundamental para la caracterización electroquímica de minerales, ya que permite identificar los procesos de oxidación y reducción que ocurren en la superficie de los electrodos durante la interacción con el medio de cultivo. En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante VC para los electrodos de pasta de carbón-mineral (EPC-minerales), elaborados con calcopirita (C), magnetita (M), galena (G) y sus combinaciones en distintas proporciones. Los ensayos se realizaron en un medio de cultivo microbiano 0K ácido (pH 1.8), iniciando el barrido de potencial desde el valor de PCA previamente estabilizado. El análisis de los voltamperogramas permite identificar los picos característicos de oxidación y reducción asociados a las transformaciones superficiales de cada mineral, así como evidenciar la influencia de las interacciones galvánicas en la reactividad electroquímica. Estos resultados son clave para comprender los mecanismos de solubilización del cobre y el comportamiento pasivo o activo de los minerales en condiciones de biolixiviación.

#### **Calcopirita**

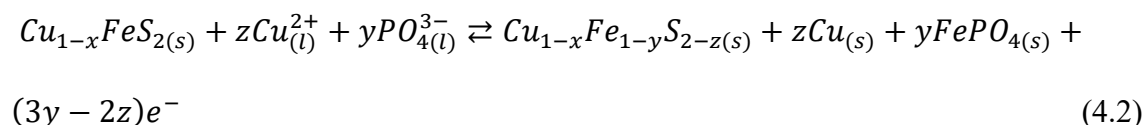
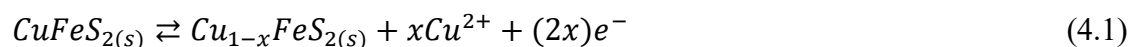
El estudio voltamperométrico para el EPC-C se muestra en la Figura 30, cuando el barrido inicia en dirección positiva (Figura 30A), se observan seis picos de oxidación A1<sub>C</sub>, A2<sub>C</sub>, A3<sub>C</sub>, A4<sub>C</sub>, A5<sub>C</sub> y A6<sub>C</sub>, aparecen a 0.55, 1.04, -0.01, 0.07, 0.21 y 0.37 V, cuando el barrido se invierte se

observan cuatro picos de reducción C1<sub>C</sub>, C2<sub>C</sub>, C3<sub>C</sub>, C4<sub>C</sub> y C5<sub>C</sub> aparecen a 0.33, -0.02, -0.10, -0.14 V y -0.46 V.

Cuando el barrido de potencial se inicia en la dirección negativa para EPC-C, se muestra en la Figura 30A<sup>I</sup>, se observan tres picos de reducción C1<sub>C</sub>, C2<sub>C</sub>, C3<sub>C</sub> y C4<sub>C</sub>, aparecen a -0.01, -0.10, -0.15 V y -0.46, cuando el barrido se invierte se observan seis picos de oxidación A1<sub>G</sub>, A2<sub>G</sub>, A3<sub>G</sub>, A4<sub>G</sub>, A5<sub>G</sub> y A6<sub>G</sub>, que aparecen a 0.56, 1.04, -0.02, 0.07, 0.21 y 1.04 V.

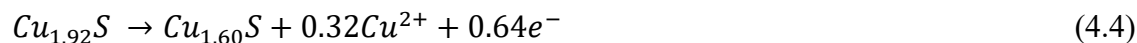
La Figura 30 también muestra cinco voltamogramas cíclicos (A y A<sup>I</sup> abajo) y uno solo (A y A<sup>I</sup> arriba), para observar mejor los potenciales de los procesos de óxido-reducción.

La electroquímica de la calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) en medio de cultivo microbiano 0K, es compleja y se debe establecer las transformaciones electroquímicas en la superficie del electrodo. El pico A1<sub>C</sub> en la Figura 30A, y el pico A1<sub>C</sub> en la Figura 30A<sup>I</sup>, han sido asociados con la oxidación de la calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) en un medio de cultivo similar al usado en este trabajo, proponiendo las Ec. (4.1) y (4.2) se obtienen por Lara et. (2015) y Saavedra et al. (2018b).



Los componentes no estequiométricos (Cu<sub>1-x</sub>Fe<sub>1-y</sub>S<sub>2-z(s)</sub> y FePO<sub>4(s)</sub>) formados durante la oxidación inicial de la calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), presentan características pasivas y son importantes en la reactividad del mineral.

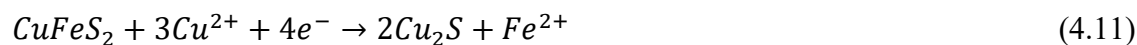
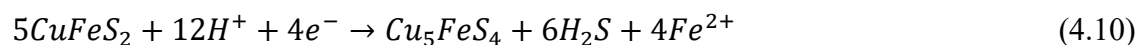
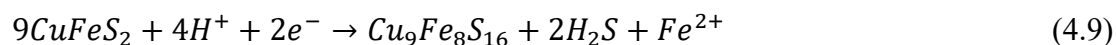
Los picos A2<sub>C</sub>, pueden ser correspondientes a la oxidación de la calcocita (Cu<sub>2</sub>S), que se oxida a través de una serie de sulfuros secundarios, como djurleita (Cu<sub>1.92</sub>S), digenita (Cu<sub>1.60</sub>S) y covelita (CuS), como son mostrados en las Ec. (4.3), (4.4) y (4.5) se describen por Arce & González (2002), Gu et al. (2013), Liang et al. (2011), Peng et al. (2021) y Saavedra et al. (2018b).



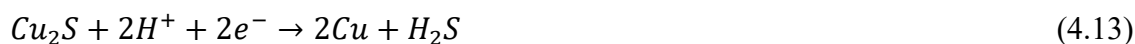
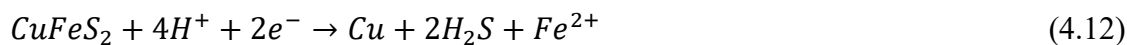
El proceso catódico del pico C1<sub>C</sub>, corresponde a las reacciones de reducción de los productos formados en la interfase en el barrido de potencial, este pico no está presente cuando el barrido es iniciado en dirección negativa. Corresponde a las siguientes Ec. (4.6), (4.7) y (4.8), se encuentran representados por Saavedra et al. (2018b), Sauber & Dixon (2011) y Zhang et al. (2021b).



Los procesos catódicos de los picos C2<sub>C</sub>, C3<sub>C</sub> y C4<sub>C</sub>, están asociados a la reducción de la calcopirita, a especies de sulfuros secundarios, tales como talnaquita (Cu<sub>9</sub>Fe<sub>8</sub>S<sub>16</sub>), bornita (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>) y calcocita (Cu<sub>2</sub>S) correspondientes a las Ec. (4.9), (4.10) y (4.11), estos procesos han sido representados en estudios previos por Gu et al. (2013), Liang et al. (2011), Saavedra et al. (2018b), Sauber & Dixon (2011).



En los procesos catódicos C5<sub>C</sub>, la calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y calcocita (Cu<sub>2</sub>S) se redujeron a cobre metálico, como se muestra en las Ec. (4.12) y (4.13), este proceso ha sido descrito por Chang et al. (2019).

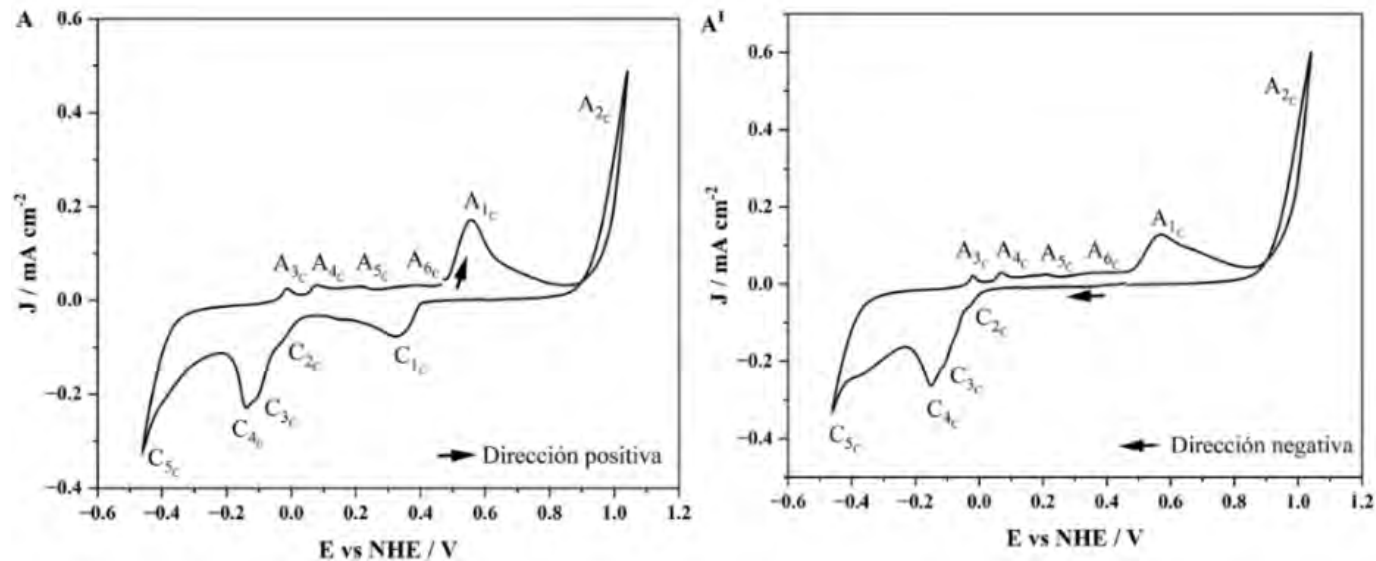


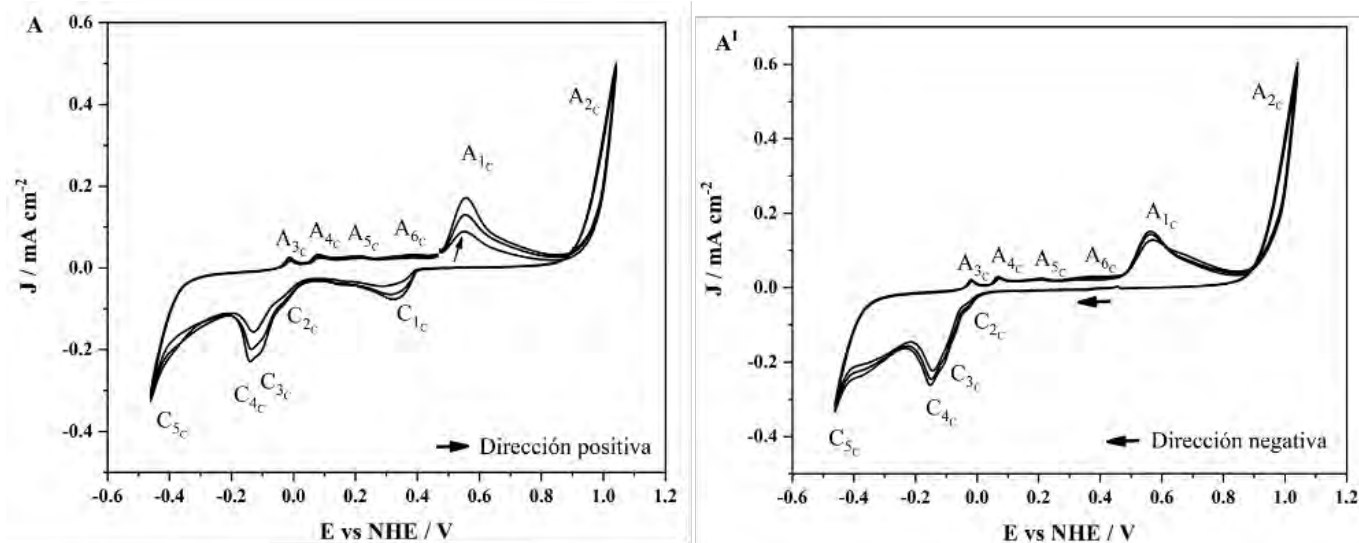
Los picos A3<sub>C</sub> y A4<sub>C</sub>, presentan un comportamiento de activación, mostrando que el cobre es oxidado formando calcocita (Cu<sub>2</sub>S) acorde a la Ec. (4.14). Cuando el potencial fue invertido, se observan picos de oxidación anódica A5<sub>C</sub> y A6<sub>C</sub>, que representan la oxidación de sulfuro de hidrogeno a azufre elemental, estas reacciones están representadas en la Ec. (4.15), estos procesos ha sido descritos por Chang et al. (2019) y Saavedra et al. (2018b).



**Figura 30**

*Voltamperograma de EPC-C.*





*Nota.* Voltamperograma de EPC-C estudiado en medio cultivo microbiano 0K. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA en dirección negativa y positiva para el EPC-C. Velocidad de barrido a 20 mV/s, durante 5 ciclos.

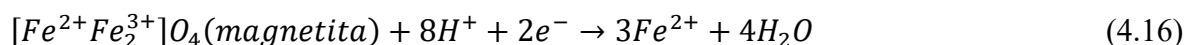
En resumen, el análisis voltamperométrico del electrodo EPC-C revela una compleja secuencia de procesos redox que reflejan la naturaleza multifásica de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en medio ácido 0K. Al iniciar el barrido en dirección positiva, se identifican múltiples picos de oxidación ( $A_{1c}$  -  $A_{6c}$ ), entre los cuales destacan  $A_{1c}$  y  $A_{2c}$ , asociados a la oxidación directa de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la formación de sulfuros secundarios como calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), djurleita ( $\text{Cu}_{1.92}\text{S}$ ) y covelita ( $\text{CuS}$ ). La presencia de entrecruzamientos entre los picos anódicos y catódicos, especialmente en los ciclos sucesivos, indica la formación de productos pasivos en la superficie del electrodo, como  $\text{Cu}_{1-x}\text{Fe}_{1-\gamma}\text{S}_{2-z}$  y  $\text{FePO}_4$ , que limitan la transferencia electrónica y reducen la eficiencia del proceso. Este comportamiento pasivo es más evidente cuando el barrido se inicia en sentido positivo, donde se observa una mayor acumulación de especies oxidadas. En contraste, al iniciar el barrido en dirección negativa, se registran picos catódicos más definidos ( $C_{1c}$  -  $C_{4c}$ ), correspondientes a la reducción de especies intermedias y la formación de sulfuros metálicos y cobre elemental. Esta diferencia sugiere que el sentido del barrido influye en la secuencia de

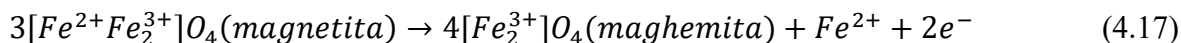
reacciones y en la estabilidad de la superficie del electrodo. En conjunto, los resultados confirman que la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) presenta una reactividad electroquímica moderada, pero propensa a la pasivación, lo que representa una limitación para su solubilización sostenida en condiciones de biolixiviación.

### **Magnetita**

En cuanto a la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), cuando el barrido de potencial inicia en la dirección positiva para EPC-M, como se muestra en la Figura 31B, se observan dos picos de oxidación  $A_{1M}$  y  $A_{2M}$  a 0.47 y -0.16 V, y al invertir el barrido de potencial, se observan otros dos picos de reducción  $C_{1M}$  y  $C_{2M}$ , aparecen a 0.29 y -0.08 V. Cuando el barrido de potencial se inicia en la dirección negativa, como se muestra en la Figura 31B<sup>1</sup>, se observan dos picos de reducción  $C_{1M}$  y  $C_{2M}$ , que ocurren a -0.03 y 0.31 V, cuando se invierte el barrido de potencial se tiene dos picos de oxidación  $A_{1M}$  y  $A_{2M}$  que aparecen a 0.51 y -0.19 V. Por otro lado, cuando el barrido de potencial inicia en la dirección positiva, como se muestra en la Figura 31B, la voltamperometría mostró un comportamiento similar al voltamograma en dirección negativa, pero con una densidad de corriente baja asociada a los procesos de reducción. La diferencia puede ser debido a la oxidación del mineral ocurrido en el barrido en dirección positiva el cual presenta una pequeña oxidación en el pico  $A_{1M}$  a 0.47 V y una pequeña reducción en el pico  $C_{1M}$  y  $C_{2M}$ , aparecen a 0.29 y -0.08 V.

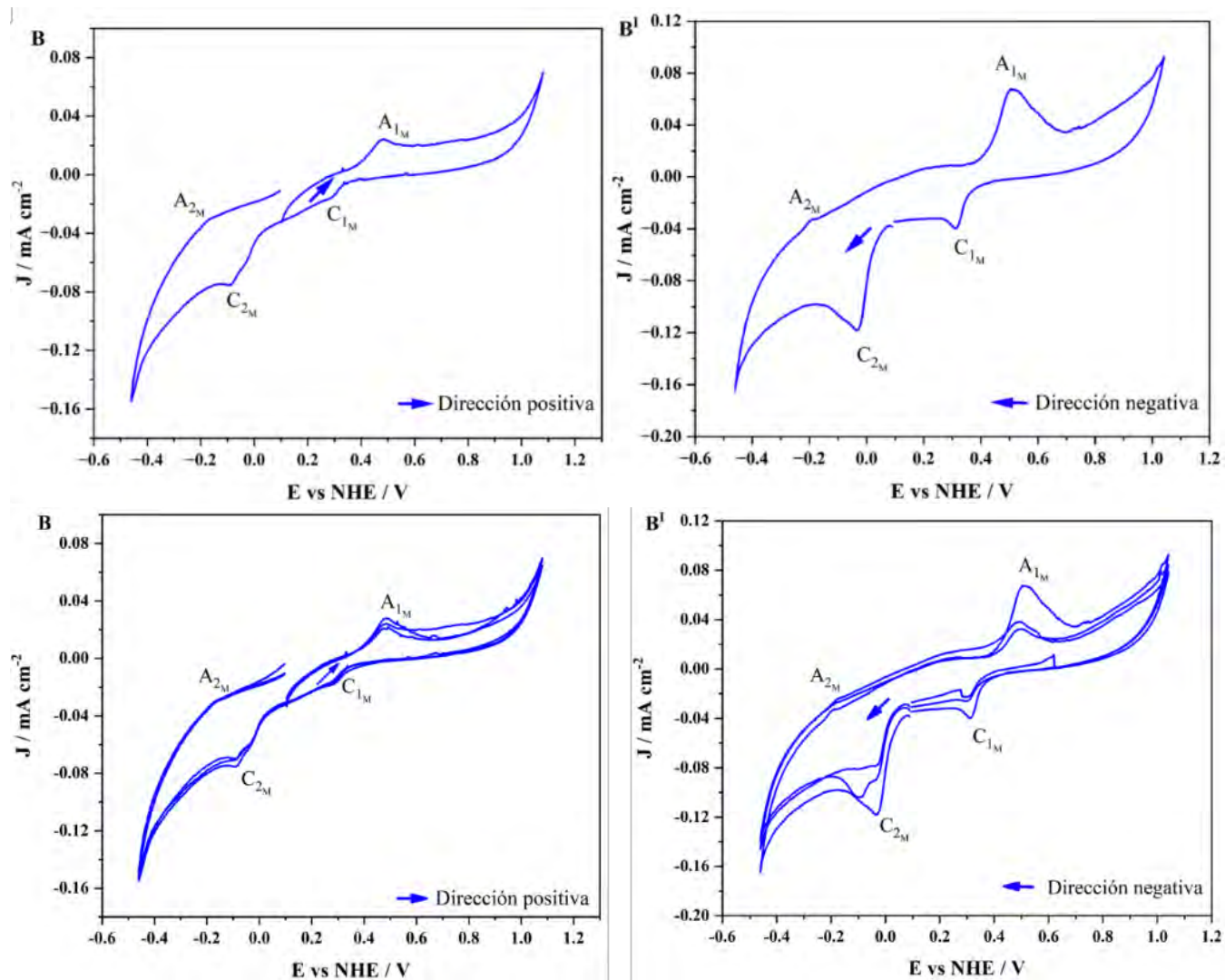
El EPC-M puede ser solubilizado en dirección anódica y catódica como se ve en la Ec. (4.16), como también se muestran en la Figura 31, los picos anódicos y catódicos que pueden ser asociados a esta reacción. A más altos potenciales la magnetita puede ser oxidada a maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  o  $\gamma\text{-FeOOH}$ ), Ec. (4.17), están descritos por Saavedra et al. (2018b), White et al. (1994) y Yuan et al. (2015).





**Figura 31**

*Voltamperograma de EPC-M.*



*Nota.* Voltamperograma de EPC-M estudiados en medio cultivo microbiano 0K. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA en dirección negativa y positiva para el EPC-M. Velocidad de barrido a 20 mV/s, durante 4 ciclos

La Figura 31 también muestra cinco voltamogramas cíclicos (B y B<sup>I</sup> abajo) y uno solo (B y B<sup>I</sup> arriba), para observar mejor los potenciales de los procesos de óxido-reducción.

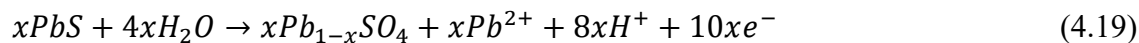
En resumen, el comportamiento voltamperométrico del electrodo EPC-M revela una respuesta electroquímica menos compleja que la observada en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pero con características distintivas que permiten evaluar su reactividad en medio ácido 0K. Al iniciar el barrido en dirección positiva, se identifican dos picos de oxidación ( $A_{1M}$  y  $A_{2M}$ ), mientras que al invertir el barrido se observan dos picos de reducción ( $C_{1M}$  y  $C_{2M}$ ), lo que indica que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) puede participar tanto en procesos anódicos como catódicos. Sin embargo, la densidad de corriente registrada es baja, lo que sugiere una limitada actividad redox y una menor capacidad de transferencia electrónica. Este comportamiento se mantiene cuando el barrido se inicia en dirección negativa, aunque se observan ligeras variaciones en los potenciales de los picos. A diferencia de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), no se evidencia entrecruzamiento de picos anódicos, lo que indica una menor tendencia a la formación de productos pasivos en la superficie del electrodo. Las reacciones observadas están asociadas a la oxidación de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) a fases como maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) o  $\gamma\text{-FeOOH}$ , y a la reducción de especies férricas ( $\text{Fe}^{+3}$ ) a ferrosas ( $\text{Fe}^{2+}$ ), según las ecuaciones propuestas. En conjunto, estos resultados sugieren que la magnetita presenta una reactividad electroquímica moderada, con baja pasivación, lo que la convierte en un mineral estable y potencialmente útil como cátodo en sistemas galvánicos para favorecer la oxidación de minerales más activos como la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

### **Galena**

Por otro lado, en el estudio de la galena ( $\text{PbS}$ ), en la Figura 32, se muestra la respuesta voltamperométrica para EPC-G, cuando el barrido de potencial inicia en dirección positiva para EPC-G, se observan cinco picos de oxidación  $A_{1G}$ ,  $A_{2G}$ ,  $A_{3G}$ ,  $A_{4G}$  y  $A_{5G}$ , aparecen los potenciales 0.51, 1.22, -0.42, -0.37 y -0.29 V. Sin embargo, cuando se invierte el barrido de potencial se observan seis picos de reducción  $C_{1G}$ ,  $C_{2G}$ ,  $C_{3G}$ ,  $C_{4G}$ ,  $C_{5G}$  y  $C_{6G}$  aparecen los valores de 0.18, -

0.28, -0.55, -0.67, -0.84 y -1.22 V. También se muestra en la Figura 32, cuando el barrido de potencial inicia en la dirección negativa se observan cinco picos de reducción C2<sub>G</sub>, C3<sub>G</sub>, C4<sub>G</sub>, C5<sub>G</sub> y C6<sub>G</sub>, aparecen a -0.28, -0.56, -0.70, -0.85 y -1.22 V. Por lo tanto, cuando se invierte el barrido de potencial se observan seis picos de oxidación A1<sub>G</sub>, A2<sub>G</sub>, A3<sub>G</sub>, A4<sub>G</sub>, A5<sub>G</sub> y A6<sub>G</sub> aparecen a 0.51, 1.22, -0.42, -0.39, -0.30 y -0.15 V. En relación con a la Figura 32, los picos anódicos y catódicos presentan un comportamiento similar, pero con una densidad de corriente más alta en el proceso de oxidación, como se muestran en la voltamperometría que van en dirección positiva y negativa.

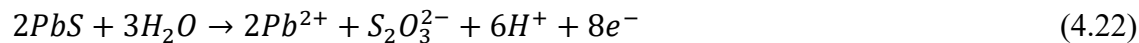
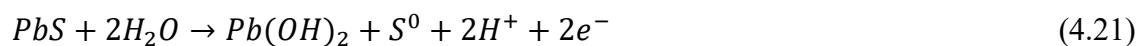
El primer proceso anódico en el pico A1<sub>C</sub> se identificó como la oxidación de galena (PbS), formando iones de plomo y azufre elemental en la Ec. (4.18) y (4.19). Este proceso ha sido detallado por Flores-Álvarez et al. (2017) y Urbano et al. (2016).

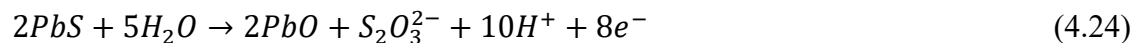


En el pico A2<sub>G</sub> se identificó la oxidación de PbS formando azufre elemental y iones de hidrogeno como se muestra en la Ec. (4.20), este proceso ha sido descritos por Mendiratta et al. (1999).

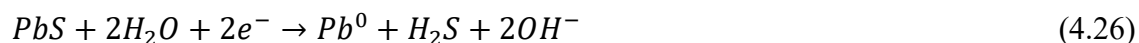


Los picos A3<sub>G</sub>, A4<sub>G</sub>, A5<sub>G</sub> y A6<sub>G</sub>, son asociados con la oxidación de la PbS en un medio ácido, proponiendo las Ec. (4.21), (4.22), (4.23) y (4.24), este proceso lo describieron Urbano et al. (2007).

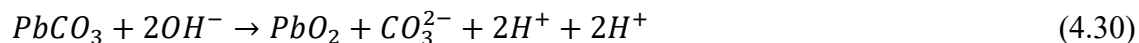
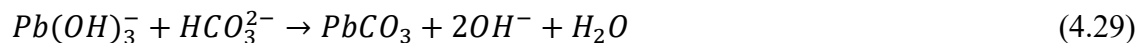




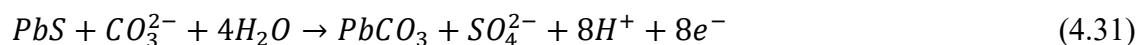
En el proceso catódico C1<sub>G</sub>, corresponden a las reacciones de reducción de los productos formados en la interfase del barrido de potencial en dirección positiva, y este pico no se presenta cuando el barrido es iniciado en la dirección negativa, corresponden a las siguientes Ec. (4.25) y (4.26), como explicaron Urbano et al. (2007).



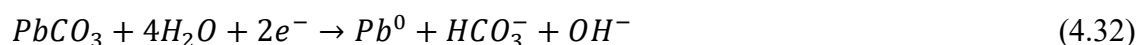
Los procesos catódicos C1<sub>G</sub>, C2<sub>G</sub>, C3<sub>G</sub> y C4<sub>G</sub> están asociadas con la reducción de la PbS a especies secundaria de la cerusita (PbCO<sub>3</sub>). Sin embargo, el proceso de transformación de anglesita (PbCO<sub>4</sub>) en cerusita puede implicar reacción directa con carbonatos y precipitación en la superficie del mineral, con difusión de especies a través de los poros de la cerusita (PbCO<sub>3</sub>). Corresponden a los mecanismos de la formación de cerusita fueron en la Ec. (4.27), (4.28), (4.29) y (4.30), tal y como explicaron Urbano et al. (2016).



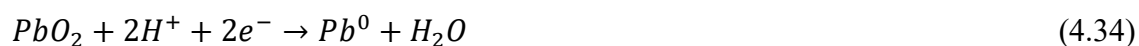
Después, la pasivación de anglesita se disuelve en la superficie de galena (PbS); está reacciona electroquímicamente de forma progresiva según la Ec. (4.31), como lo informaron Urbano et al. (2016).



Además, el proceso C5<sub>C</sub> está asociado a una reacción de reducción de cerusita a plomo metálico, según la Ec. (4.32) y (4.33), como detallaron Urbano et al. (2016).

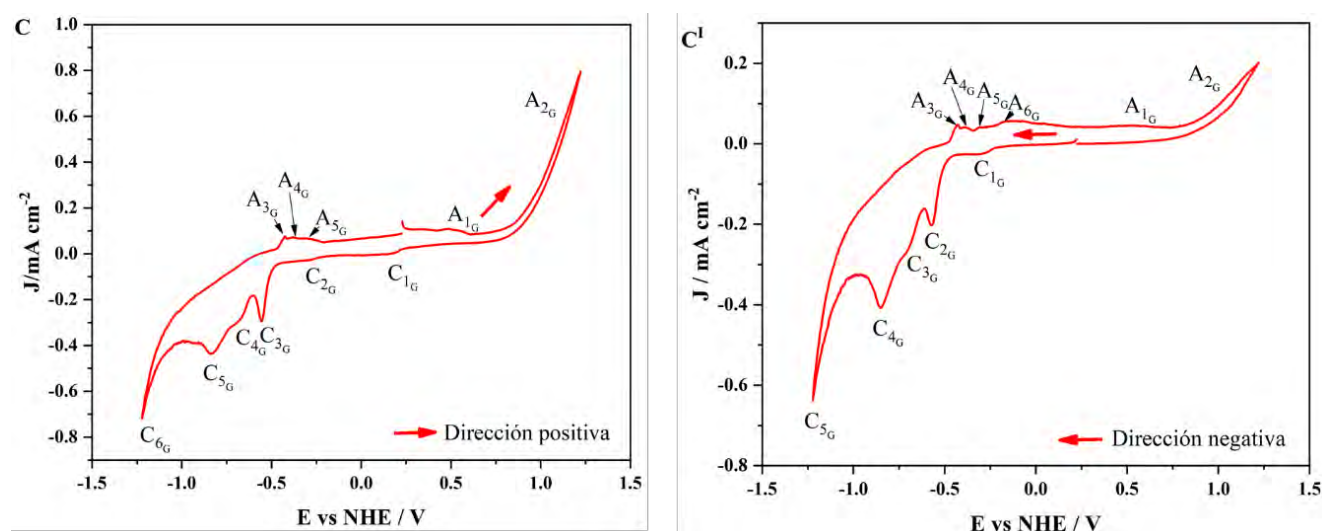


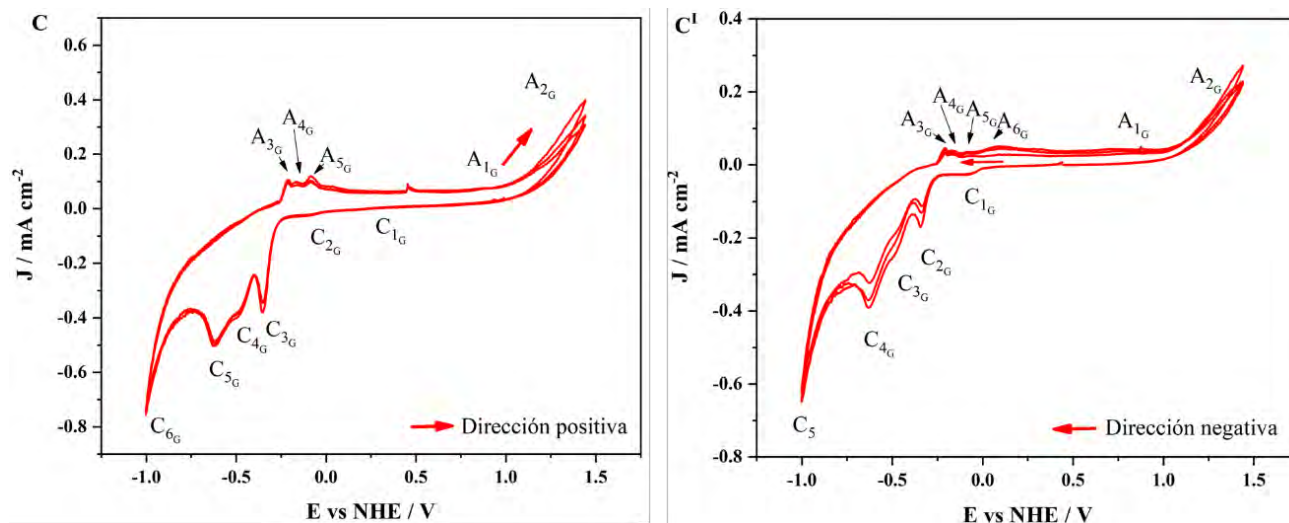
La especie oxidada resultante de plomo (PbO<sub>2</sub>), se reduce a plomo metálico en el proceso de reducción C6<sub>C</sub>, según la Ec. (4.34) como explicaron Urbano et al. (2016).



### Figura 32

Voltamperogramas de EPC- G.





*Nota.* Voltamperograma de EPC-G estudiados en medio cultivo microbiano 0K. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA en dirección negativa y positiva para el EPC-G. Velocidad de barrido a 20 mV/s, durante 4 ciclos.

La Figura 32 también muestra cinco voltamogramas cíclicos (C y C<sup>I</sup> abajo) y uno solo (C y C<sup>I</sup> arriba), para observar mejor los potenciales de los procesos de óxido-reducción.

En resumen, el comportamiento voltamperométrico del electrodo EPC-G evidencia una actividad electroquímica compleja, caracterizada por múltiples procesos de oxidación y reducción que reflejan la reactividad de la galena en medio ácido 0K. Al iniciar el barrido en dirección positiva, se identifican cinco picos anódicos (A<sub>1G</sub> - A<sub>5G</sub>), asociados a la oxidación progresiva del PbS hacia especies como Pb<sup>2+</sup>, PbSO<sub>4</sub>, PbO y azufre elemental (S<sup>0</sup>), según las ecuaciones (4.18) a (4.24). Al invertir el barrido, se observan seis picos catódicos (C<sub>1G</sub> - C<sub>6G</sub>), que corresponden a la reducción de productos intermedios como PbSO<sub>4</sub>, PbCO<sub>3</sub> y PbO<sub>2</sub> hacia plomo metálico, lo cual indica una reversibilidad parcial de los procesos redox. Cuando el barrido se inicia en dirección negativa, se mantiene la presencia de múltiples picos de reducción, aunque con ligeras variaciones en los potenciales, y al invertir el barrido se recuperan los picos de oxidación, lo que sugiere una

cierta estabilidad en la respuesta electroquímica. A diferencia de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), la galena ( $\text{PbS}$ ) no presenta un entrecruzamiento marcado de picos anódicos, lo que indica una menor tendencia a la formación de capas pasivas persistentes; sin embargo, la presencia de múltiples especies intermedias y la amplitud de los picos sugieren una superficie activa pero susceptible a transformaciones complejas. En conjunto, estos resultados indican que la galena posee una reactividad electroquímica significativa, con procesos redox bien definidos, aunque con una mayor densidad de corriente en la oxidación, lo que podría favorecer su uso como cátodo en sistemas galvánicos, aunque con menor capacidad para inhibir la pasivación que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

### **Mezcla Calcopirita - Magnetita**

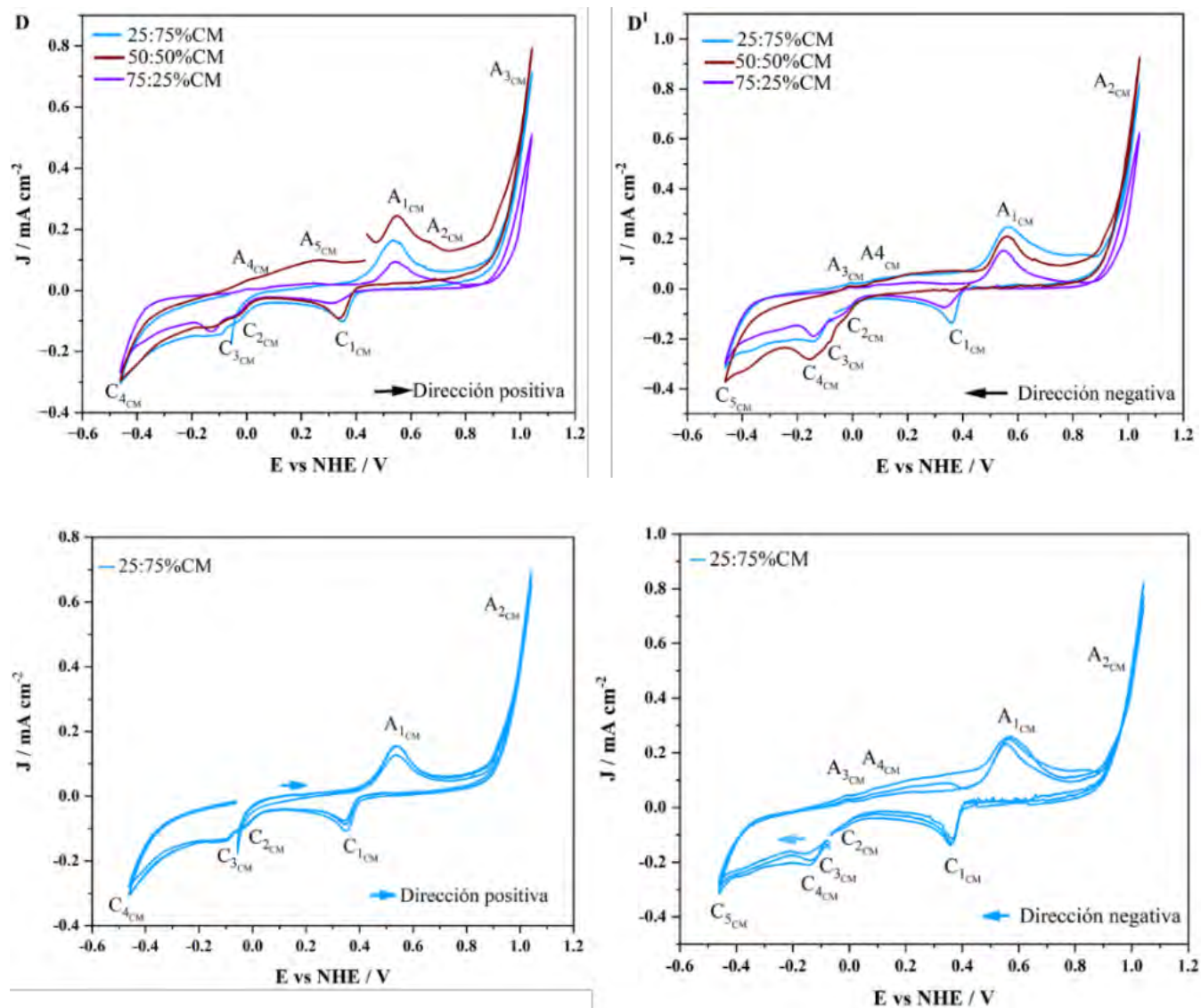
El comportamiento voltamperométrico del mineral CM (50:50%, 25:75% y 75:25%) como se muestra en la Figura 33, es compleja y con cierta similitud a la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) como esta en la Figura 30, que inicia en dirección positiva, pero con ciertas diferencias en los procesos de oxidación. En los picos  $A1_{\text{CM}}$ ,  $A3_{\text{CM}}$  y  $A4_{\text{CM}}$  corresponden a la calcopirita. Los picos  $C1_{\text{CM}}$ ,  $C2_{\text{CM}}$ ,  $C3_{\text{CM}}$  y  $C4_{\text{CM}}$  corresponden a la calcopirita. El pico  $A2_{\text{CM}}$  aparece a 0.67 V, podría pertenecer a magnetita como se ve en la Figura 31, en el proceso de oxidación. Para la Figura 33, su comportamiento es similar a la calcopirita a la Figura 30, que inicia en dirección negativa, en los procesos de reducción de los picos  $C2_{\text{CM}}$ ,  $C3_{\text{CM}}$  y  $C4_{\text{CM}}$ , corresponde a calcopirita. El comportamiento para los picos de oxidación  $A1_{\text{CM}}$ ,  $A2_{\text{CM}}$ ,  $A3_{\text{CM}}$ ,  $A4_{\text{CM}}$  y  $A5_{\text{CM}}$  corresponden a calcopirita, como se muestra en la Figura 30, con sus respectivos picos.

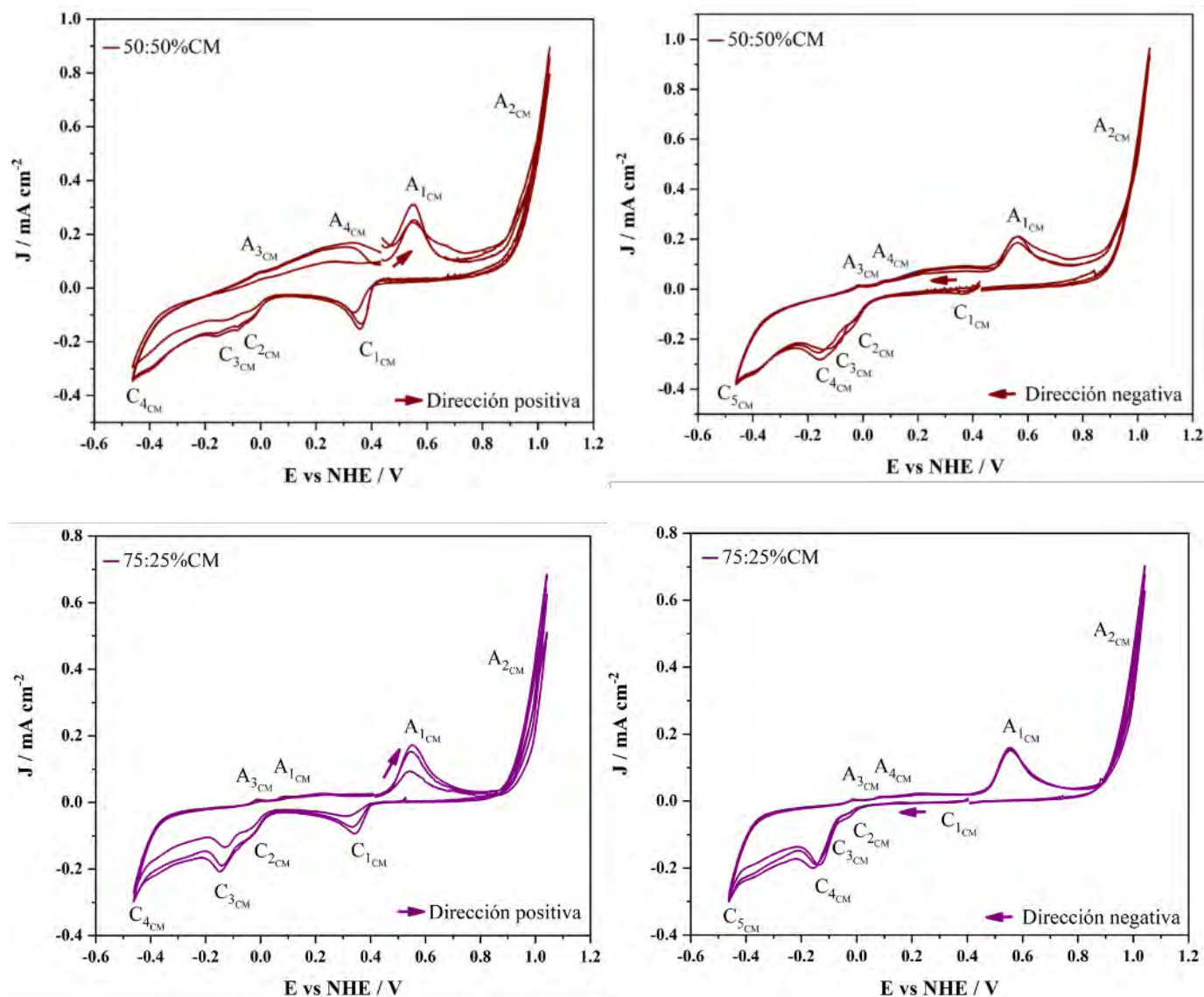
Este comportamiento se atribuye a la interacción galvánica entre calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), ya que el sobrepotencial de oxidación de esta última es menos positivo, lo que favorece la oxidación de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). El incremento en la reactividad del mineral

combinado se puede a la mayor solubilización del mineral. El resultado representa los procesos anódicos y catódicos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en el mineral combinado  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ .

**Figura 33**

*Voltamperograma de EPC-CM.*





*Nota.* Voltamperograma de EPC-CM en diferentes proporciones estudiados en medio cultivo microbiano 0K. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA en dirección negativa y positiva para el EPC-CM (25:75%, 50:50% y 75:25%). Velocidad de barrido a 20 mV/s, durante 5 ciclos.

En resumen, el comportamiento voltamperométrico de los electrodos EPC-CM, compuestos por combinaciones de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en distintas proporciones, revela una respuesta electroquímica compleja, pero con características que reflejan una mejora significativa respecto a la  $\text{CuFeS}_2$  pura. En los voltamperogramas obtenidos (Figura

33), se observa que los picos de oxidación  $A1_{CM}$ ,  $A3_{CM}$  y  $A4_{CM}$  corresponden a procesos típicos de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), mientras que el pico  $A2_{CM}$ , ubicado en 0.67 V, puede atribuirse a la presencia de magnetita ( $Fe_3O_4$ ), indicando su participación activa en la oxidación. Los picos catódicos  $C1_{CM}$  a  $C4_{CM}$  también se asocian a la reducción de especies derivadas de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ). Al comparar con el comportamiento de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ) sola (Figura 30), se evidencia que la incorporación de magnetita ( $Fe_3O_4$ ) modifica la dinámica redox del sistema, reduciendo la intensidad de los entrecruzamientos anódico-catódicos, lo cual sugiere una menor formación de capas pasivas. Esta disminución en la pasivación es especialmente notoria en las proporciones 25:75% y 50:50%, donde la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) actúa como cátodo en la interacción galvánica, favoreciendo la oxidación sostenida de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ). Además, el inicio del barrido en dirección negativa permite observar una mayor definición de los procesos reductivos, mientras que en dirección positiva se destacan los procesos de activación superficial. En conjunto, estos resultados indican que las combinaciones EPC-CM presentan una sinergia electroquímica favorable, donde la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) no solo estabiliza el sistema, sino que también mejora la reactividad de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ) al disminuir la formación de productos pasivos, lo cual es altamente beneficioso para procesos de biolixiviación.

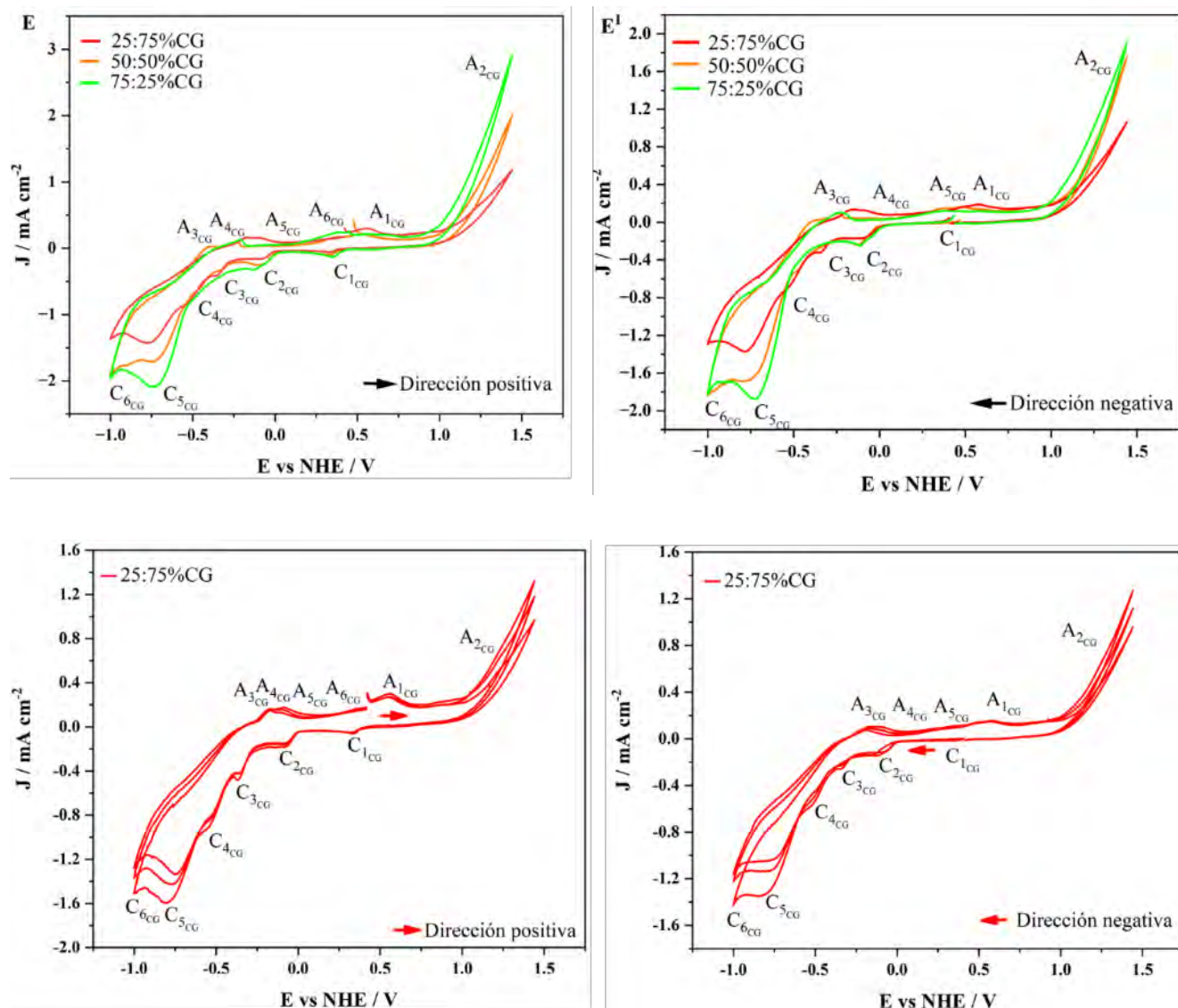
### **Mezcla Calcopirita - Galena**

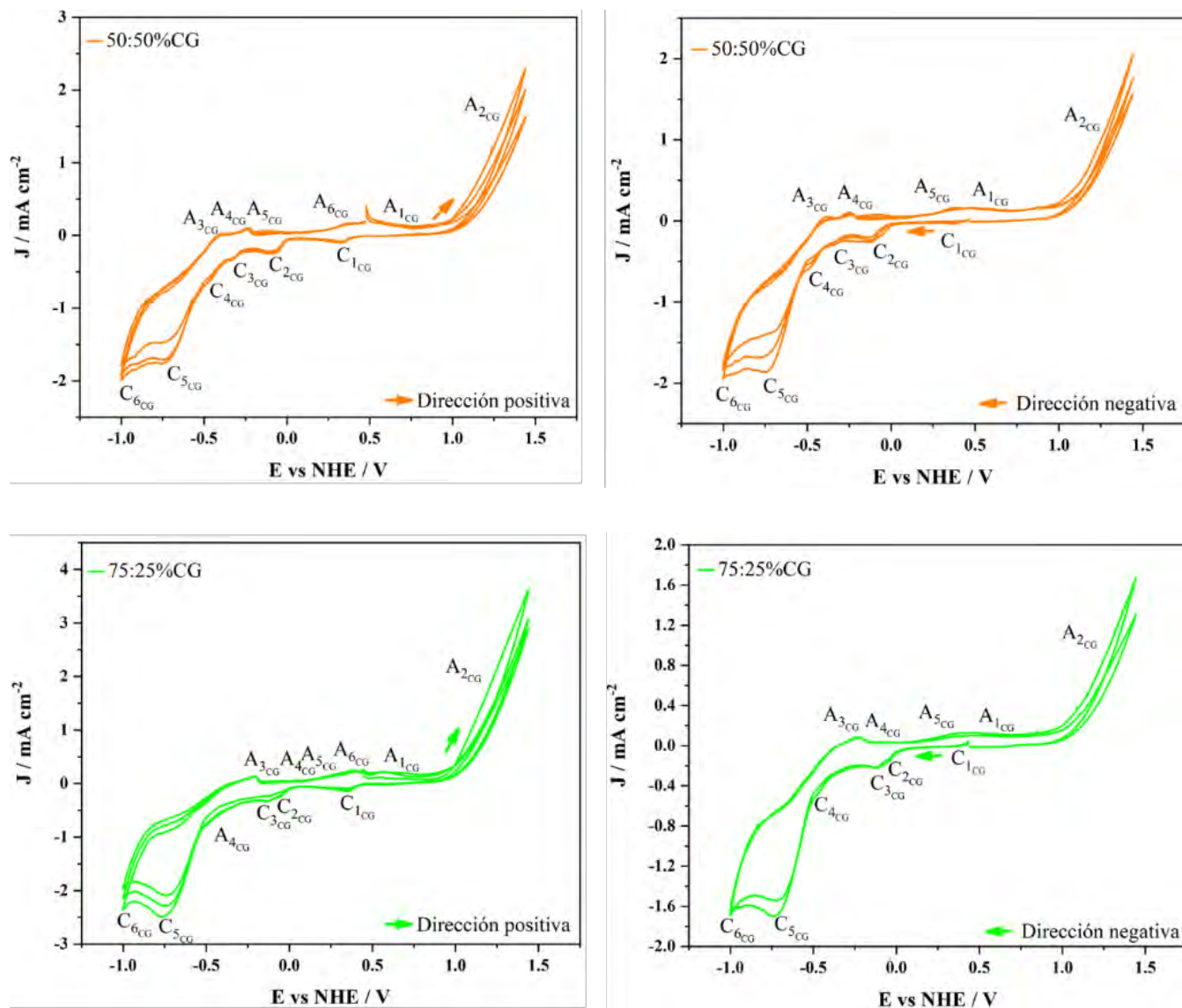
Para el comportamiento voltamperométrico del mineral CG (50:50%, 25:75% y 75:25%), se muestra en la Figura 34, es compleja y con cierta similitud a la galena como está en la Figura 32, inicia en dirección positiva, pero con cierta diferencia en los procesos de oxidación. En los picos  $A1_{CG}$ ,  $A2_{CG}$ ,  $A3_{CG}$ ,  $A4_{CG}$  y  $A5_{CG}$ , corresponden a la galena, pero el pico  $A6_G$  aparece a 0.16 V y corresponde a la calcopirita ( $CuFeS_2$ ). Los picos  $C1_{CG}$ ,  $C2_{CG}$  y  $C3_{CG}$  corresponden a la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), pero los picos  $C5_{CG}$  y  $C6_{CG}$  corresponden a la galena (PbS). En la Figura 30,

su comportamiento es similar a la galena (PbS) como se ve en la Figura 32, que inicia en dirección negativa en los procesos de reducción de los picos  $C_{1CG}$ ,  $C_{2CG}$ ,  $C_{3CG}$  y  $C_{4CG}$ , corresponde a la galena (PbS). El comportamiento para los picos de oxidación  $A_{1CG}$  y  $A_{5CG}$  son correspondientes a la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), los picos de oxidación de los picos  $A_{2CG}$ ,  $A_{3CG}$  y  $A_{4CG}$  corresponden a galena (PbS).

**Figura 34**

*Voltamperograma de EPC-CG.*





*Nota.* Voltamperograma de EPC-CG en diferentes proporciones estudiados en medio cultivo microbiano 0K. Barrido de potencial iniciado a partir del PCA en dirección positiva y negativa a diferentes concentraciones para el EPC-CG (25:75%, 50:50% y 75:25%). La velocidad de barrido a 20 mV/s, durante 5 ciclos.

En resumen, en este sistema CuFeS<sub>2</sub>-PbS, el comportamiento voltamperométrico de los electrodos EPC-CG, compuestos por combinaciones de calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>) y galena (PbS) en distintas proporciones, muestra una respuesta electroquímica compleja, con características que

reflejan la interacción entre ambos minerales en medio ácido 0K. En los voltamperogramas obtenidos (Figura 35), se observa que los picos de oxidación  $A_{2CG}$ ,  $A_{3CG}$  y  $A_{4CG}$  corresponden a procesos típicos de la galena (PbS), mientras que los picos  $A_{1CG}$  y  $A_{5CG}$  se asocian a la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), y el pico  $A_{6CG}$ , ubicado en 0.16 V, confirma la participación activa de este último mineral. En cuanto a los procesos de reducción, los picos  $C_{1CG}$ ,  $C_{2CG}$  y  $C_{3CG}$  se atribuyen a la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), mientras que  $C_{5CG}$  y  $C_{6CG}$  corresponden a la galena, evidenciando una superposición de reacciones redox entre ambos componentes. A diferencia de las combinaciones con magnetita ( $Fe_3O_4$ ), los voltamperogramas de CPE-CG presentan una mayor densidad de corriente en los procesos de oxidación, lo que indica una superficie más activa, pero también una mayor susceptibilidad a la formación de productos pasivos. Aunque no se observa un entrecruzamiento anódico tan marcado como en la calcopirita pura, la presencia de múltiples especies intermedias sugiere que la galena no inhibe eficazmente la pasivación. El inicio del barrido en dirección negativa permite identificar con mayor claridad los procesos reductivos asociados a la galena (PbS), mientras que en dirección positiva se destacan los picos de oxidación compartidos entre ambos minerales. En conjunto, los resultados indican que las combinaciones EPC-CG presentan una reactividad electroquímica significativa, pero con menor capacidad para reducir la pasivación que las combinaciones con magnetita ( $Fe_3O_4$ ), lo que limita parcialmente su efectividad en procesos de bio-lixiviación.

En términos generales, los resultados de voltamperometría cíclica revelan diferencias significativas en la reactividad electroquímica de la calcopirita cuando se encuentra sola y cuando forma parte de sistemas combinados con magnetita ( $Fe_3O_4$ ) o galena (PbS). La  $CuFeS_2$  pura (EPC-C) mostró múltiples picos anódicos y catódicos, con un marcado entrecruzamiento de picos anódicos en el ciclo de barrido, lo cual es indicativo de procesos de pasivación superficial. Este

fenómeno sugiere la formación de capas no conductoras, como sulfuros no estequiométricos o azufre elemental ( $S^0$ ), que limitan la continuidad de la oxidación y, por ende, la eficiencia del proceso de disolución. Sin embargo, al combinarse con  $Fe_3O_4$  (EPC-CM), especialmente en proporciones 25:75% y 50:50%, se observa una disminución o ausencia de estos entrecruzamientos, lo que indica una menor formación de productos pasivos. Esta condición representa una ventaja significativa, ya que la magnetita ( $Fe_3O_4$ ) actúa como cátodo en la interacción galvánica, favoreciendo la oxidación sostenida de la calcopirita y mejorando su solubilización. Por otro lado, en los sistemas combinados con galena (EPC-CG), si bien se mantiene una actividad redox apreciable, los voltamperogramas muestran una mayor complejidad y persistencia de señales asociadas a procesos de pasivación, lo que sugiere que la galena no inhibe con la misma eficacia la formación de capas pasivas como lo hace la magnetita ( $Fe_3O_4$ ). En consecuencia, se concluye que la interacción galvánica con magnetita ( $Fe_3O_4$ ) no solo mejora la reactividad de la calcopirita ( $CuFeS_2$ ), sino que también reduce los efectos de pasivación, lo cual es altamente favorable para procesos de biolixiviación y recuperación de cobre en medios ácidos.

Los voltamperogramas de la calcopirita revelan numerosos picos anódicos correspondientes a la sucesiva conversión de  $CuFeS_2$  en fases no estequiométricas ( $Cu_{1-x}FeS_2$ ), la formación de sulfuros secundarios como bornita ( $Cu_5FeS_4$ ) y covelita ( $CuS$ ), y finalmente la generación de azufre elemental ( $S^0$ ). En el barrido inverso aparecen picos catódicos de reducción de  $Fe^{3+}$  a  $Fe^{2+}$ , de  $S^0$  a  $S^{2-}$  y de  $Cu^{2+}$  a  $Cu^0$ . Sin embargo, con cada ciclo la corriente anódica decae de forma pronunciada, evidencia de que la superficie de la calcopirita queda rápidamente cubierta por un film de polisulfuros ( $S_n^{-2}$ ) y azufre que impide el intercambio de carga y ralentiza la cinética de disolución.

En contraste, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) muestra corrientes mucho más estables y una única pareja de picos redox asignable a la transformación  $\text{Fe}^{2+} \rightleftharpoons \text{Fe}^{3+}$  sin acompañarse de caída apreciable en intensidades, lo que demuestra su resistencia a la pasivación. La galena, por su parte, exhibe picos anódicos de oxidación de  $\text{PbS}$  a  $\text{Pb}^{2+}$  y  $\text{PbSO}_4$ , seguidos de corrientes catódicas de reducción a plomo metálico, pero tras pocos ciclos la corriente colapsa: la formación de una capa de sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) insoluble bloquea la superficie y detiene la actividad. Cuando se mezclan calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), los voltamperogramas conservan los picos de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pero con corrientes 30:50 % superiores y sin el acusado descenso cíclico, pues la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) funge como cátodo eficiente que consume electrones y evita la deposición de azufre pasivante en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). En cambio, la combinación  $\text{CuFeS}_2$ - $\text{PbS}$  no sólo no mejora las intensidades, sino que potencia la pasivación mutua, ya que los productos de oxidación de la galena ( $\text{PbS}$ ) obstruyen ambos minerales.

Este conjunto de observaciones demuestra que la magnetita actúa como un activador galvánico ideal: su superficie conductiva mantiene activo el flujo de electrones, retarda la formación de la capa de polisulfuros ( $\text{S}_n^{-2}$ ) y prolonga la velocidad de corrosión de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) sin autopasivarse. En cambio, la galena ( $\text{PbS}$ ) carece de esa capacidad catódica en medio ácido y genera sales insolubles que detienen la reacción. De este modo, la presencia de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) maximiza la lixiviación de cobre al retrasar eficazmente la pasivación superficial de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), mientras que la galena ( $\text{PbS}$ ) no aporta beneficio electroquímico alguno.

#### 4.4.1.3. Diagrama de Evans

El diagrama de Evans permite visualizar de forma simultánea las curvas de polarización anódica y catódica y así determinar el potencial mixto ( $E_{\text{corr}}$ ) y la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) resultantes de la interacción galvánica. Para construirlo, se proyectan las ramas anódicas

medidas en voltamperometría de la  $\text{CuFeS}_2$  y las catódicas de la  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o la  $\text{PbS}$ , trazando sus rectas de Tafel hasta el punto de intersección. Este punto refleja el equilibrio electroquímico del par y cuantifica la velocidad neta de corrosión que, en nuestro caso, equivale directamente al ritmo de solubilización de cobre.

La Figura 35 presenta los diagramas de Evans del sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  en tres proporciones (25:75%, 50:50% y 75:25 % en peso), superponiendo la rama anódica de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) con la rama catódica de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). En cada mezcla, la curva anódica (derivada de la cinética de oxidación de  $\text{CuFeS}_2$ ) conserva la misma pendiente de Tafel que la calcopirita pura, pero su intersección con la curva catódica (la reducción de  $\text{Fe}^{3+}$  a  $\text{Fe}^{2+}$  en  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) avanza consistentemente hacia potenciales más nobles. El punto de corrosión mixto ( $E_{\text{corr}}$ ) asciende desde  $-0,05$  V en la  $\text{CuFeS}_2$  sola hasta  $+0,10$  V en la mezcla 25:75 %, reflejando un desplazamiento de  $0,15$  V que indica una fuerte ganancia de nobleza electroquímica.

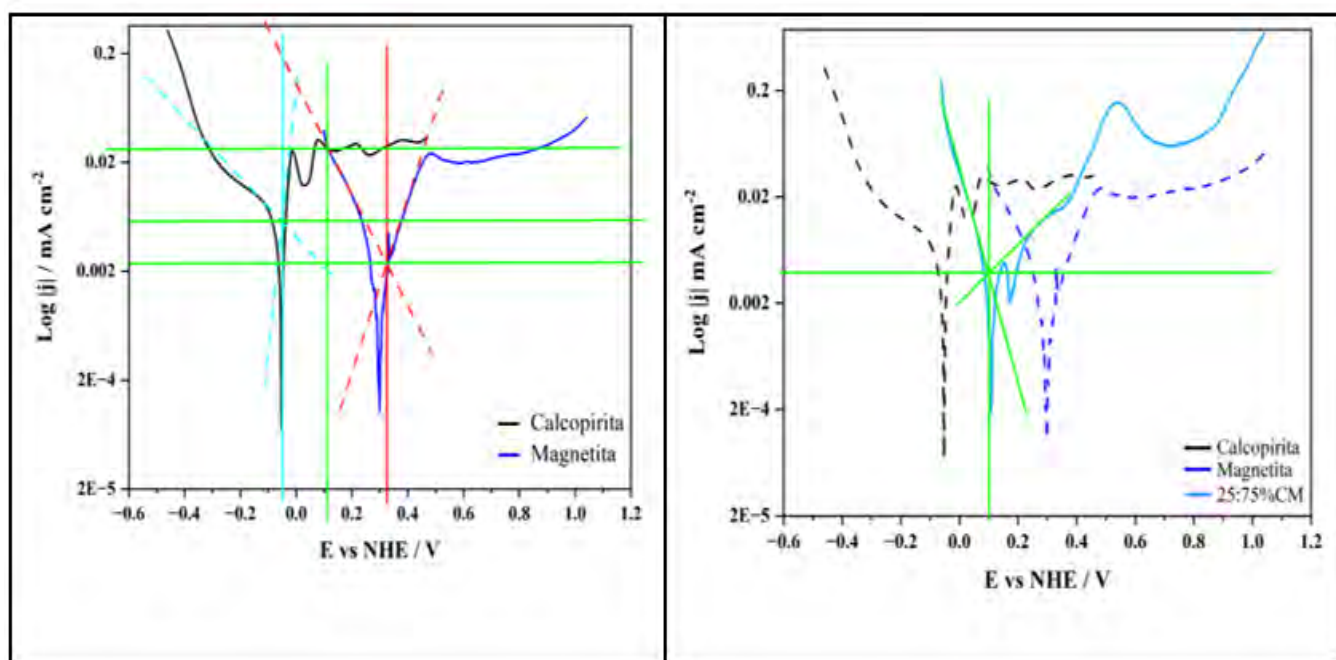
Junto al corrimiento de potencial, la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) exhibe un salto notable: desde  $0,006$   $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) pura hasta  $0,03$   $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  en 25:75 % C:M, casi triplicando el valor teórico de  $0,01$   $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Este aumento provocó una mayor velocidad de disolución anódica, pues la magnetita actúa como un cátodo de área efectiva amplia y mantiene un flujo continuo de electrones, consumiéndolos en la reducción de especies férricas ( $\text{Fe}^{+3}$ ) antes de que puedan acumularse polisulfuros ( $\text{S}_n^{-2}$ ) o azufre elemental ( $\text{S}^0$ ) sobre la superficie de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). De este modo, la película pasivante se gestiona de forma dinámica, retrasando su crecimiento y asegurando que la fase ánodo permanezca activa.

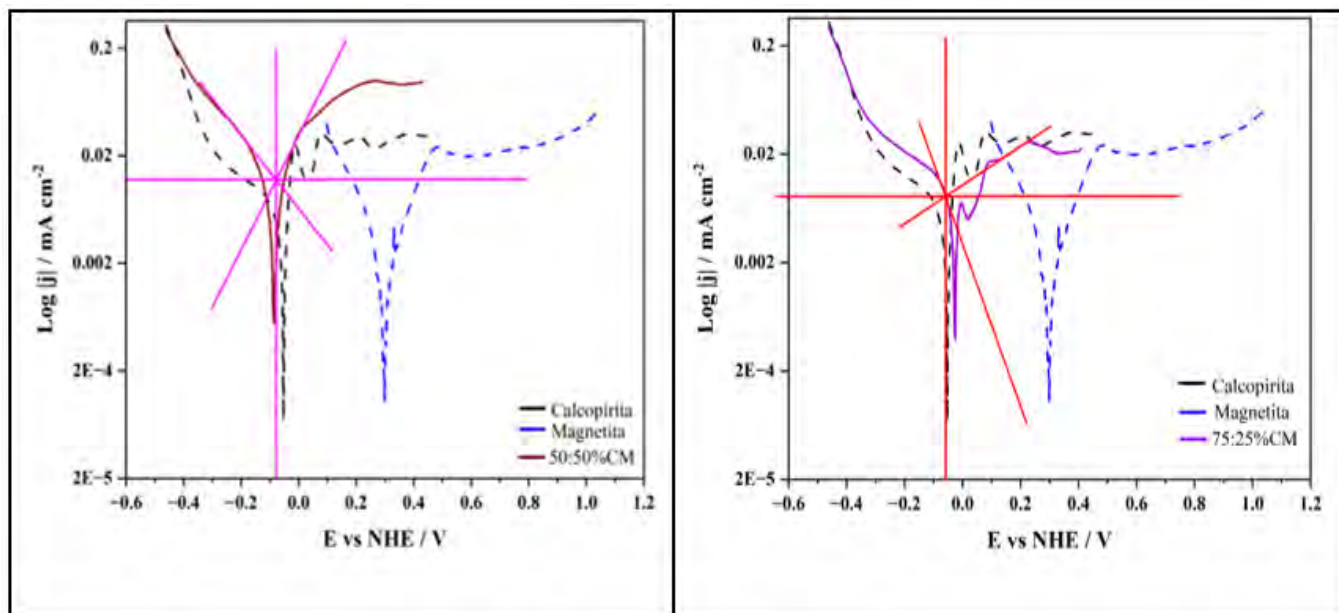
A medida que la proporción de magnetita disminuye (50:50% y 75:25%), los diagramas muestran un descenso progresivo de  $i_{\text{corr}}$  ( $0,02$  y  $0,008$   $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , respectivamente) y un ligero retroceso de  $E_{\text{corr}}$ . Esto revela que existe un punto óptimo en torno a 25:75 % donde la geometría

de contacto y la relación ánodo-cátodo maximizan la sinergia galvánica. Con menos magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ), la zona ánodo de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) empieza a sufrir pasivación parcial, y con menos área catódica no se consume el exceso de electrones con la misma eficiencia. En conjunto, los datos de la Figura 34 validan que la magnetita no solo desplaza el equilibrio electroquímico a potenciales más nobles, sino que también multiplica la corriente de corrosión, confirmando su papel como el activador galvánico más eficaz para mejorar la disolución y retrasar la pasivación de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

### Figura 35

*Las curvas  $\log |j|$  vs  $E$  del sistema galvánico CM.*





*Nota.* Curvas  $\log |j|$  vs  $E$  del sistema galvánico formados por calcopirita-magnetita. Diagramas de Evans presentados para la  $\text{CuFeS}_2$  (C) y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (M); y del mineral  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  (CM) en diferentes proporciones.

La Figura 36 muestra los diagramas de Evans construidos para las combinaciones  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  en proporciones 25:75%, 50:50% y 75:25 % (CG), superponiendo la rama anódica de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) con la rama catódica de la galena (PbS). En cada caso, la intersección de las rectas de Tafel arroja un potencial mixto ( $E_{\text{corr}}$ ) cercano a -0,32 V en 25:75 %, -0,34 V en 50:50 % y -0,31 V en 75:25 %. Estos valores apenas difieren del de la  $\text{CuFeS}_2$  pura (-0,05 V) y no se ajustan a la gran  $\Delta E$  teórica de -0,26 V calculada, lo que ya anticipa una débil activación galvánica.

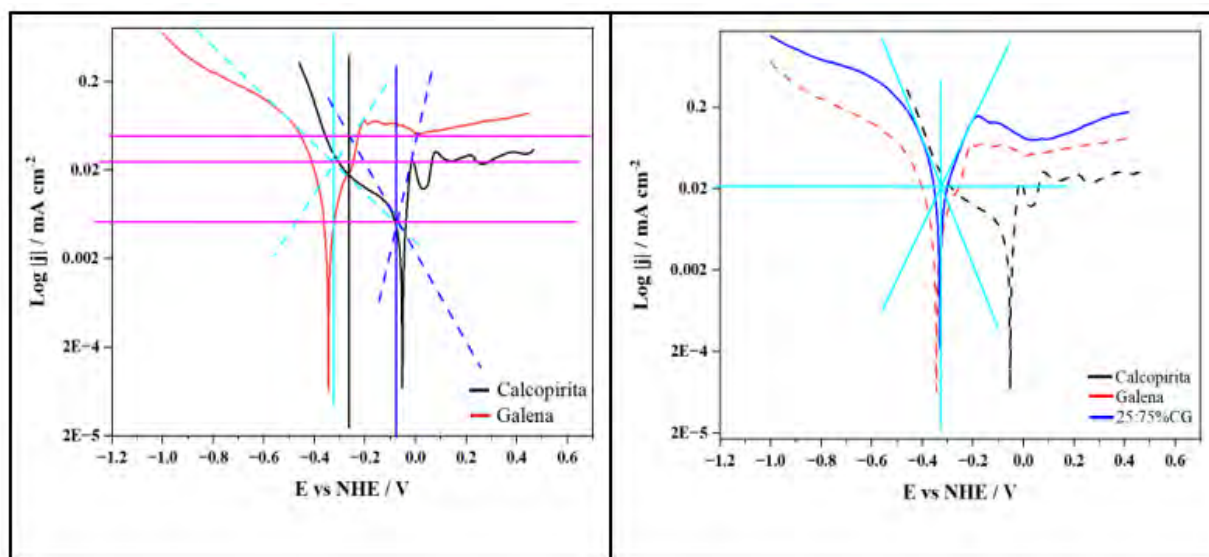
Junto al potencial, la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) de las combinaciones no supera los  $0,021 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  (25:75 %),  $0,014 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  (50:50 %) y  $0,010 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  (75:25 %), pese a que la galena (PbS) sola alcanza  $0,023 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Esto significa que ningún cociente de CG logra

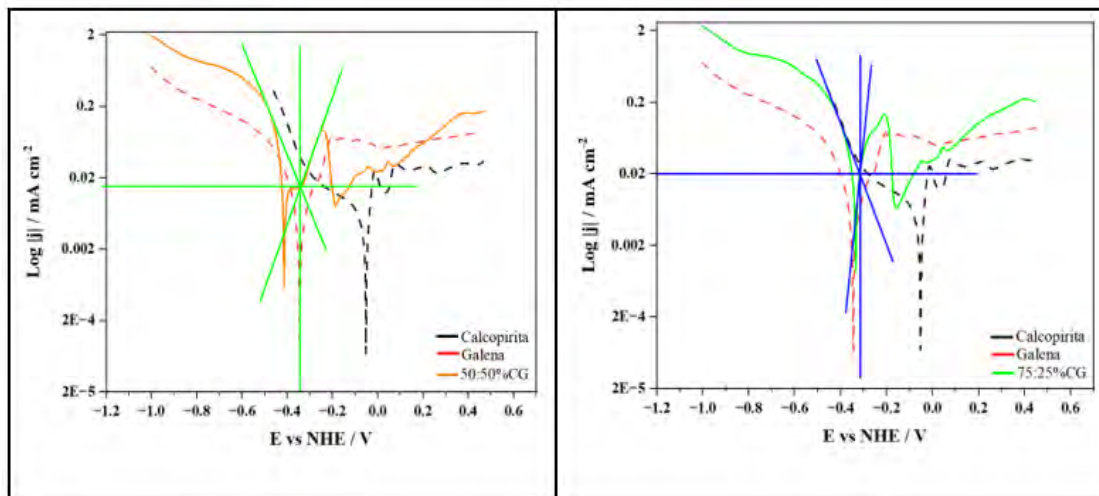
mejorar la capacidad de consumo de electrones de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ); más bien, las corrientes resultantes son inferiores a las que cabría esperar por simple “promedio” de sus áreas activas.

Esa pobre sinergia se explica por la rápida pasivación de la galena: al oxidarse, forma en la interfase una capa de  $\text{PbSO}_4$  (anglesita) de baja conductividad, que paraliza simultáneamente las reacciones anódicas en la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y las catódicas en la galena ( $\text{PbS}$ ). En consecuencia, el circuito galvánico no se cierra eficazmente, la película de bloqueo impide tanto la formación de  $\text{Cu}^{2+}$  como la reducción de  $\text{Pb}^{2+}$ , y la velocidad global de corrosión (y por ende de disolución de cobre), queda prácticamente inalterada respecto a la calcopirita pura. Este análisis confirma que, a diferencia de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la galena ( $\text{PbS}$ ) no aporta ninguna ventaja galvánica en medios ácidos y, por el contrario, refuerza la pasivación mutua de ambas fases.

### Figura 36

*Las curvas  $\log |j|$  vs  $E$  del sistema galvánico CG.*





*Nota.* Curvas  $\log |j|$  vs  $E$  del sistema galvánico compuestos por calcopirita-galena. Se muestran diagramas de Evans presentados para la  $\text{CuFeS}_2$  (C) y  $\text{PbS}$  (G); y del mineral  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  (CG) en diferentes proporciones.

En la Tabla 8, se tiene resultados de los parámetros electroquímicos obtenidos a partir del análisis de los diagramas de Evans de los minerales combinados.

**Tabla 8**

*Análisis del diagrama de Evans de los minerales combinados.*

ELECTRODO	Eelectrodo (V)	Egalvanico (V)	Jelectrodo ( $ j  \text{ mAcm}^{-2}$ )	Jgalvánico ( $ j  \text{ mAcm}^{-2}$ )	Brazo anódico	Brazo catódico
CALCOPIRITA	-0.05		0.006			
MAGNETITA	0.33		0.002			
GALENA	-0.32		0.023			
CALCOPIRITA-MAGNETITA TEORICO		0.11	0.01	0.027	Calcopirita	Magnetita
CALCOPIRITA-MAGNETITA (mezclas) 25-75%		0.1		0.03		
CALCOPIRITA-MAGNETITA (mezclas) 50-50%	-0.07		0.01			
CALCOPIRITA-MAGNETITA (mezclas) 75-25%		-0.05		0.008		
CALCOPIRITA-GALENA TEORICO		-0.26		0.049	Calcopirita	Galena
CALCOPIRITA-GALENA (mezclas) 25-75%		-0.32		0.021		
CALCOPIRITA-GALENA (mezclas) 50-50%		-0.34		0.014		
CALCOPIRITA-GALENA (mezclas) 75-25%		-0.31		0.01		

Los datos de la Tabla 8 muestran que cada mineral por separado ocupa un lugar claro en la serie galvánica y presenta corrientes de corrosión propias que reflejan su tendencia a disolverse en medio ácido. La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), con un potencial de reposo de  $-0,05$  V y una densidad de corriente de  $0,006 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , actúa de ánodo natural: se oxida con relativa facilidad. La magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), en cambio, tiene un potencial mucho más noble ( $0,33$  V) y una corriente muy baja ( $0,002 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), lo que la consagra como un cátodo eficiente y resistente a la pasivación. La galena ( $\text{PbS}$ ), aunque su potencial nominal ( $-0,32$  V) sugiere un ánodo menos activo que la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), desarrolla una densidad de corriente mayor ( $0,023 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) en apariencia favorable, pero su rápido bloqueo por sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ) la inutiliza como cátodo galvánico.

Al comparar los valores teóricos de la diferencia de potencial ( $\Delta E$ ) y la corriente galvánica ( $i_{\text{corr}}$ ) con los experimentales para las combinaciones, se observa que en el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  la  $\Delta E$  teórica de  $0,11$  V y corriente estimada de  $0,01 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  pueden superarse en la práctica. La mezcla 25:75% (CM) alcanzó una  $\Delta E$  de  $0,10$  V y un  $i_{\text{corr}}$  de  $0,03 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , casi el triple del valor teórico. Esto se explica por una mejor distribución de fases y mayor área de contacto eléctrico, que optimiza la transferencia de electrones y retrasa la pasivación de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Sin embargo, al aumentar la proporción de calcopirita (50:50% y 75:25 %), la corriente galvánica disminuye, pues la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) deja de ser suficiente para mantener activo el circuito y la superficie ánodo vuelve a formarse parcialmente pasiva.

En el caso de la  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$ , la  $\Delta E$  teórica apunta a una diferencia aún mayor ( $-0,26$  V), con una corriente de  $0,049 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , pero las combinaciones prácticas (25:75%, 50:50%, 75:25%) sólo alcanzan corrientes de  $0,021$ ,  $0,014$  y  $0,010 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  respectivamente. Este desempeño inferior confirma que un gran desfase de potencial no garantiza un galvanismo efectivo: la galena, al formar rápidamente una capa de sulfato pasivante, carece de conductividad superficial y no

consume eficientemente los electrones del ánodo. En conjunto, la Tabla 6 ilustra con nitidez cómo la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) se alza como el activador galvánico idóneo para incrementar la velocidad de disolución de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y postergar la pasivación, mientras que la galena ( $\text{PbS}$ ) no aporta más que autobloqueo y estancamiento de la lixiviación.

En resumen, para la elaboración de cada diagrama de Evans, se trazaron las curvas de polarización anódica (oxidación de la  $\text{CuFeS}_2$ ) y catódica (reducción de la  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  o la  $\text{PbS}$ ) por separado, y luego se superpusieron para determinar el punto de corrosión mixto ( $E_{\text{corr}}$ ) y la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) resultantes de la interacción. En el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ , la intersección de ambas curvas mostró un desplazamiento del potencial de corrosión desde  $-0,05$  V ( $\text{CuFeS}_2$  pura) hasta  $+0,11$  V, acompañado de un incremento de la  $i_{\text{corr}}$  de aproximadamente  $0,006 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  a  $0,027 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Este cambio evidencia una activación anódica pronunciada de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) facilitada por el papel catódico de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), que consume electrones y previene la deposición de azufre elemental pasivante. La magnetita, al mantener un flujo electrónico continuo, favorece reacciones corrosivas más rápidas y estables sin llegar a autopasivarse, de modo que la velocidad de disolución del cobre se acelera de forma sostenida.

En contraste, el diagrama de Evans para  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  apenas varió respecto a la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) sola: el potencial mixto se situó cercano a  $-0,32$  V y la  $i_{\text{corr}}$  prácticamente no se incrementó. Esto indica que la galena ( $\text{PbS}$ ), aunque posee un potencial de reposo más noble, carece de capacidad catódica efectiva en medio ácido; su superficie se cubre rápidamente de sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), un film de baja conductividad que impide la transferencia electrónica necesaria para activar la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). En consecuencia, no se crea un circuito galvánico vigoroso y la solubilización de cobre no mejora.

Estos resultados subrayan dos lecciones clave: primero, no basta con elegir un mineral “más noble”, sino que éste debe ser un cátodo capaz de reducir especies disueltas sin pasivarse; segundo, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) cumple ese rol de forma óptima, ofreciendo una vía práctica y económica para intensificar la lixiviación de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), retrasar la pasivación y reducir los tiempos de procesamiento. Por ello, su inclusión controlada en reactores de (bio)lixiviación o sistemas químicos emerge como una estrategia de alto impacto para optimizar la recuperación de cobre y la vida útil de las celdas electroquímicas.

#### **4.5. Resultados de identificación del efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados**

##### **4.5.1. Análisis del diagrama de Evans y sus repercusiones en procesos de lixiviación de cobre**

El análisis del diagrama de Evans constituye una herramienta fundamental para evaluar interacciones galvánicas entre fases minerales electroactivas, ya que permite estimar visual y cuantitativamente el potencial mixto del sistema ( $E_{\text{corr}}$ ) y la densidad de corriente galvánica ( $i_{\text{corr}}$ ). Estas variables determinan la dirección y magnitud de la transferencia electrónica entre un ánodo y un cátodo, y, por ende, la posibilidad de activación galvánica que pueda favorecer o inhibir la disolución de especies metálicas. En esta investigación, se aplicó este análisis a sistemas binarios formados por  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$ , con el fin de establecer su repercusión en la lixiviación de cobre en condiciones ácidas, simulando un medio 0K libre de hierro, y sin la acción directa de microorganismos.

##### **4.5.2. Comportamiento del sistema calcopirita-magnetita**

Los resultados obtenidos revelan que el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  presenta una interacción galvánica clara, activa y sostenida. El diagrama de Evans generado por la superposición de las

curvas de polarización anódica (correspondiente a la C) y catódica (M) mostró un desplazamiento evidente del potencial mixto ( $E_{\text{corr}}$ ) hacia valores más positivos, indicando una reducción del sobrepotencial de oxidación para la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). A su vez, se observó un incremento marcado en la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ), especialmente en la mezcla con proporción 75:25% (CM), que alcanzó un valor más de 2.3 veces superior al sistema con  $\text{CuFeS}_2$  pura.

Este comportamiento demuestra que la magnetita actúa como un cátodo galvánico eficiente, capaz de facilitar reacciones catódicas, posiblemente reducción de oxígeno disuelto o especies férricas residuales que permiten sostener el flujo electrónico desde la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), acelerando su oxidación y disolución. La eficiencia de esta interacción se debe en parte a la naturaleza semiconductor de tipo n de la magnetita, su estabilidad superficial en medios ácidos, y su capacidad para evitar la pasivación que normalmente limita la disolución de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ).

Es importante destacar que los diagramas de Evans construidos en esta tesis también mostraron que, en el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ , la corriente de corrosión aumentó proporcionalmente al porcentaje de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), hasta cierto punto. A partir de proporciones mayores al 25% de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la densidad de corriente se estabilizó o incluso se redujo levemente, lo cual podría atribuirse a un efecto dilución de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) o a limitaciones difusionales en la zona activa del electrodo.

Desde una perspectiva práctica, este efecto se traduce en un incremento real en la velocidad de disolución de cobre, medible incluso sin necesidad de condiciones biológicas extremas. El sistema se mantuvo activo durante el tiempo de ensayo, sin evidencia de pasivación temprana, lo cual es un indicador prometedor de su estabilidad y reproducibilidad para aplicaciones en escala real.

### 4.5.3. Comportamiento del sistema calcopirita-galena

En contraste, el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$  no mostró un comportamiento galvánico favorable. El diagrama de Evans correspondiente reveló un potencial mixto similar al de la  $\text{CuFeS}_2$  sola, y la densidad de corriente de corrosión se mantuvo en niveles bajos, sin incremento apreciable. Esto indica que no se estableció una transferencia electrónica sostenida entre la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y la galena ( $\text{PbS}$ ) que pudiera favorecer la disolución del cobre.

Este resultado puede explicarse por varias razones. En primer lugar, la galena ( $\text{PbS}$ ), si bien posee un potencial de reposo más noble que la calcopirita, presenta una baja conductividad electrónica en condiciones ácidas, especialmente cuando se forma una capa superficial de sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), que es eléctricamente inerte. En segundo lugar, la actividad catódica de la galena ( $\text{PbS}$ ) es limitada, es decir, su capacidad para reducir especies oxigenadas o férricas ( $\text{Fe}^{3+}$ ) es baja, lo cual impide cerrar eficazmente la celda galvánica. En consecuencia, no se produce una activación anódica de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), y el sistema no mejora la lixiviación del cobre.

### 4.5.4. Repercusiones prácticas e industriales

Los hallazgos obtenidos mediante el análisis del diagrama de Evans tienen implicancias directas y relevantes para el diseño y optimización de procesos hidrometalúrgicos, en particular aquellos orientados a la recuperación de cobre a partir de minerales sulfurados refractarios. La efectividad galvánica de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sugiere que su adición controlada podría emplearse como estrategia para acelerar la disolución de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) en sistemas de lixiviación química (tipo Galvanox<sup>TM</sup>) o biológica, sobre todo en entornos donde la presencia natural de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) u otros activadores sea insuficiente.

Además, la magnetita es un mineral ampliamente disponible en relaves, minerales de hierro y concentrados industriales, lo que abarata su uso como aditivo activador. Su estabilidad, bajo

impacto ambiental y facilidad de separación posterior también representan ventajas frente a otros materiales conductores o catalíticos.

En resumen, el uso del diagrama de Evans permitió cuantificar y validar que:

- **La adición de magnetita genera un aumento de hasta 2 a 3 veces en la solubilización de cobre**, mediante activación galvánica efectiva.
- **El fenómeno es reproducible y estable**, con potencial mixto favorable y sin pasivación temprana.
- **La interacción calcopirita-galena no mejora la disolución de cobre**, y su efecto galvánico es nulo o inhibitorio.
- **El uso de magnetita como aditivo es factible, realista y potencialmente escalable**, representando una estrategia novedosa y sustentable para mejorar la eficiencia de lixiviación de minerales complejos.

Estos resultados abren el camino para futuros estudios de optimización de proporciones, condiciones hidrodinámicas y evaluación en sistemas biológicos activos, consolidando el uso de materiales conductores como herramientas de mejora metalúrgica en procesos de bajo impacto y alta eficiencia.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

- ✓ *La caracterización mineralógica mediante MEB-EDS y DRX fue fundamental para identificar la estructura cristalina y composición de las especies minerales, lo cual permitió interpretar su comportamiento electroquímico. Se confirmó que el grafito presenta una estructura hexagonal, la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) una estructura tetragonal rica en Cu, Fe y S, la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) una espinela cúbica con Fe y O, y la galena ( $\text{PbS}$ ) una estructura cúbica con Pb y S. Estas propiedades estructurales influyen en la capacidad de cada mineral para participar en interacciones galvánicas de para la solubilización de cobre de minerales sulfurados masivos altamente puros.*
- ✓ *Los electrodos de pasta de carbón modificados con minerales (EPC-minerales) fueron eficaces para simular el comportamiento electroquímico de los sistemas minerales bajo condiciones controladas. Esta metodología permitió reproducir con precisión las condiciones de contacto eléctrico, evaluar la evolución de potenciales abiertos y estudiar los mecanismos redox involucrados en cada sistema, validando su uso como herramienta en estudios de activación galvánica.*
- ✓ *Las mediciones de potencial de circuito abierto (PCA) permitieron establecer la direccionalidad de las interacciones galvánicas, evidenciando que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y la galena ( $\text{PbS}$ ) presentan potenciales de reposo más positivos que la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ). Sin embargo, solo la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) logró facilitar un flujo electrónico eficiente que resultó en mayor disolución de cobre, confirmando que el potencial de reposo no es suficiente para predecir la eficacia galvánica, sino que debe considerarse junto con las propiedades de superficie y capacidad redox.*

*El análisis mediante voltamperometría cíclica (VC) y diagramas de Evans permitió cuantificar el impacto electroquímico de las interacciones galvánicas en la lixiviación de cobre.* En el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$ , se observó un desplazamiento del potencial mixto y un aumento significativo de la corriente de corrosión, indicadores claros de activación galvánica. En cambio, en el sistema  $\text{CuFeS}_2\text{-PbS}$ , estos parámetros se mantuvieron sin variaciones sustanciales, confirmando la ineficiencia de esa combinación.

✓ *La interacción galvánica entre calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) incrementa significativamente la solubilización del cobre, lo cual responde directamente al objetivo general de esta investigación.* En presencia de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) experimenta una activación anódica promovida por la función catódica de la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), lo que se traduce en una mayor transferencia electrónica, reducción del sobrepotencial de oxidación y aumento de la densidad de corriente. Este efecto permitió obtener una velocidad de disolución de cobre (Cu) hasta 2.3 veces superior a la obtenida con  $\text{CuFeS}_2$  sola, validando que dicha interacción puede ser aprovechada para mejorar procesos hidrometalúrgicos en medios ácidos sin necesidad de oxidantes externos o microorganismos.

✓ *La combinación galvánica de  $\text{CuFeS}_2$  con  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  demostró ser efectiva para retrasar la formación de capas pasivantes en la superficie de la calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y, por ende, aumentar la solubilización de cobre de minerales sulfurados masivos altamente puros.*

*La interacción entre calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y galena ( $\text{PbS}$ ) no mostró un efecto galvánico favorable ni una mejora en la solubilización del cobre, a pesar de que la galena ( $\text{PbS}$ ) posee un potencial de reposo más noble. Las curvas de polarización y el diagrama de Evans evidenciaron que no se produjo un incremento en la densidad de corriente ni un desplazamiento del potencial mixto, lo que sugiere una transferencia electrónica deficiente o bloqueada. Este*

comportamiento se atribuye a la baja reactividad catódica de la galena (PbS), su posible pasivación superficial y su limitada capacidad conductora bajo condiciones ácidas.

✓ *Desde una perspectiva aplicada, la adición de magnetita ( $Fe_3O_4$ ) representa una estrategia viable, realista y ambientalmente segura para optimizar la lixiviación de calcopirita ( $CuFeS_2$ ) en sistemas ácidos, como los utilizados en biolixiviación o procesos tipo Galvanox™. La magnetita ( $Fe_3O_4$ ) es un mineral accesible, económico y estable, que puede incorporarse fácilmente como aditivo o soporte conductor, sin necesidad de reactivos agresivos ni cambios drásticos en el proceso. Este hallazgo permite proponer su uso como herramienta de intensificación de lixiviación para minerales refractarios o de minerales sulfurados masivos altamente puros.*

Estos hallazgos sientan las bases para futuras líneas de investigación que incluyan:

- Estudios dinámicos de flujo en reactores de biolixiviación con  $FeS_2$ - $Fe_3O_4$ .
- Evaluaciones a escala piloto en condiciones de temperatura y gasificación controladas.
- Análisis de costos-beneficios comparativos frente a tecnologías convencionales.

En última instancia, la aplicación de la magnetita como agente activador galvánico se perfila como una estrategia práctica y sostenible para enfrentar el desafío de los minerales sulfurados refractarios de baja ley, contribuyendo a una minería más eficiente y responsable con el medio ambiente.

## 5.2. Recomendaciones

- ✓ **Optimizar la proporción de magnetita:** Realizar estudios adicionales con proporciones intermedias (20:80%, 30:70%) para determinar la mezcla exacta  $CuFeS_2$ - $Fe_3O_4$  que maximice la recuperación de cobre y minimice la pasivación.

- ✓ **Probar en reactores industriales:** Escalar el proceso desde laboratorio hasta nivel piloto e industrial, evaluando parámetros operacionales reales como temperatura, tiempo de residencia, agitación y aireación en condiciones mineras comerciales.
- ✓ **Evaluar estabilidad en el tiempo:** Extender las pruebas electroquímicas más allá de 60 minutos para verificar que la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) mantenga su capacidad catódica y el efecto galvánico se sostenga durante periodos prolongados similares a operaciones industriales.
- ✓ **Analizar costos y beneficios ambientales:** Realizar un análisis económico completo comparando costos de adquisición y procesamiento de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) versus el aumento en recuperación de cobre, incluyendo estudios de ciclo de vida ambiental y posibilidades de reciclaje del mineral.
- ✓ **Aplicar a otros minerales de cobre:** Extender la metodología a otros sulfuros refractarios como bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ), arsenopirita ( $\text{FeAsS}$ ), enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ) para ampliar la aplicabilidad industrial de la técnica en diversos yacimientos mineros.
- ✓ **Usar técnicas de análisis más avanzadas:** Complementar la caracterización con espectroscopía XPS, microscopía MET, Raman y ToF-SIMS para comprender mejor los mecanismos moleculares de activación superficial y formación de capas pasivantes.
- ✓ **Combinar con bacterias:** Integrar la interacción galvánica  $\text{CuFeS}_2\text{-Fe}_3\text{O}_4$  con microorganismos *acidófilos* como *Acidithiobacillus ferrooxidans* para crear efectos sinérgicos donde la magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) facilite la transferencia electrónica y las bacterias regeneren continuamente los agentes oxidantes.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraham, J., Dowling, K., & Florentine, S. (2021). Can copper products and surfaces reduce the spread of infectious microorganisms and hospital-acquired infections? *Materials*, *14*(13), 3444. <https://doi.org/10.3390/ma14133444>
- Aftabtalab, A., & Sadabadi, H. (2015). Application of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) nanoparticles in hexavalent chromium adsorption from aquatic solutions. *J Pet Environ Biotechnol*, *6*(200), 1-6. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000200>
- Ahlberg, E., & Asbjörnsson, J. (1993). Carbon paste electrodes in mineral processing: an electrochemical study of galena. *Hydrometallurgy*, *34*(2), 171-185. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(93\)90033-A](https://doi.org/10.1016/0304-386X(93)90033-A)
- Al-Saqarat, B. S., Al-Mobydeen, A., Al-Masri, A. N., Esaifan, M., Hamadneh, I., Moosa, I. S., & AlShamaileh, E. (2023). Facile production method of PbS nanoparticles via mechanical milling of galena ore. *Micromachines*, *14*(3), 564. <https://doi.org/10.3390/mi14030564>
- Alam, M. M., Rashed, M. A., Rahman, M. M., Rahman, M. M., Nagao, Y., & Hasnat, M. A. (2018). Electrochemical oxidation of As (III) on Pd immobilized Pt surface: kinetics and sensing performance. *RSC advances*, *8*(15), 8071-8079. <https://doi.org/10.1039/C7RA12576C>
- Albetran, H. M. (2020). Structural characterization of graphite nanoplatelets synthesized from graphite flakes. <https://www.preprints.org/manuscript/202008.0325/v1>
- Apetrei, C., Apetrei, I. M., De Saja, J. A., & Rodriguez-Mendez, M. L. (2011). Carbon paste electrodes made from different carbonaceous materials: application in the study of antioxidants. *Sensors*, *11*(2), 1328-1344. <https://doi.org/10.3390/s110201328>

- Arce, E. M., & González, I. (2002). A comparative study of electrochemical behavior of chalcopyrite, chalcocite and bornite in sulfuric acid solution. *International journal of mineral processing*, 67(1-4), 17-28. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00003-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00003-0)
- Bai, S., Wen, S., Xian, Y., Liu, J., & Deng, J. (2013). New source of unavoidable ions in galena flotation pulp: Components released from fluid inclusions. *Minerals Engineering*, 45, 94-99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.02.001>
- Bakhti, A., Moghimi, H., Bozorg, A., Stankovic, S., Manafi, Z., & Schippers, A. (2024). Comparison of bioleaching of a sulfidic copper ore (chalcopyrite) in column percolators and in stirred-tank bioreactors including microbial community analysis. *Chemosphere*, 349, 140945. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140945>
- Ban, F., Majid, S. R., Huang, N. M., & Lim, H. (2012). Graphene oxide and its electrochemical performance. *International Journal of Electrochemical Science*, 7(5), 4345-4351. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)19543-5](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)19543-5)
- Bard, A. J., Faulkner, L. R., & White, H. S. (2022). *Electrochemical methods: fundamentals and applications* (3rd ed.). John Wiley & Sons, New York.
- Bedioui, F., Gutiérrez, S., & Alatorre, A. (2000). *Electroquímica: Voltametrías sobre electrodo sólido*. Editorial de la Universidad de Santiago de Chile.
- Berry, V., Murr, L., & Hiskey, J. (1978). Galvanic interaction between chalcopyrite and pyrite during bacterial leaching of low-grade waste. *Hydrometallurgy*, 3(4), 309-326. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(78\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0304-386X(78)90036-1)
- Boroujerdi, R., Abdelkader, A., & Paul, R. (2022). Highly selective detection of ethanol in biological fluids and alcoholic drinks using indium ethylenediamine functionalized graphene. *Sensors & Diagnostics*, 1(3), 566-578. <https://doi.org/10.1039/D2SD00011C>

- Cahyotomo, A., Madiabu, M. J., Putra, A. P., Tirta, A. P., Solihat, I., & Annas, D. (2024). Fabrication and Characterization of Syringe Carbon Paste Electrode for Electrochemical Measurement. *Helium: Journal of Science and Applied Chemistry*, 4(2), 39-45. <https://doi.org/10.33751/helium.v4i2.5>
- Cerquera A., A., Rodríguez M., C. A., & Ruano F., D. F. (2017). *Análisis mineralógico, químico y porosimétrico de los agregados pétreos de una cantera perteneciente a la formación geológica de la sabána en el municipio de Soacha-Cundinamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/15337>
- Chang, K.-x., Zhang, Y.-s., Zhang, J.-m., & WANG, J. (2019). Effect of temperature-induced phase transitions on bioleaching of chalcopyrite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(10), 2183-2191. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(19\)65124-1](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(19)65124-1)
- Chang, R., & Goldsby, K. A. (2013). *Química* (M. H. Mexico, Ed. 11a ed.). <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3607>
- Chen, Z., Wang, Y., Luo, L., Peng, T., Guo, F., & Zheng, M. (2021). Enhancing flotation separation of chalcopyrite and magnesium silicate minerals by surface synergism between PAAS and GA. *Scientific Reports*, 11(1), 6368. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85984-y>
- Chopard, A., Plante, B., Benzaazoua, M., Bouzahzah, H., & Marion, P. (2017). Geochemical investigation of the galvanic effects during oxidation of pyrite and base-metals sulfides. *Chemosphere*, 166, 281-291. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.129>
- Comexperu. (2024). Producción cuprífera aumentó un 12.7% en 2023 y el Perú se mantiene como el segundo mayor productor de cobre del mundo. <https://doi.org/https://www.comexperu.org.pe/articulo/produccion-cuprifera-aumento-un->

[127-en-2023-y-el-peru-se-mantiene-como-el-segundo-mayor-productor-de-cobre-del-mundo](#)

- Compton, R. G., & Banks, C. E. (2018). *Understanding voltammetry* (third ed.). World Scientific.
- Córdoba, E., Muñoz, J., Blázquez, M., González, F., & Ballester, A. (2008). Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part I: General aspects. *Hydrometallurgy*, 93(3-4), 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2008.04.015>
- Cori M., J. W. (2018). *Estudio de la microscopía electrónica de barrido para el mantenimiento predictivo de superficies metálicas en sistemas de esterilización* [Tesis de Maestría, Universidad Mayor de San Andrés]. <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/19199>
- Cortez, M. L., & Negri, M. (2011). *Materiales compuestos para la construcción de sensores* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires]. <https://acortar.link/AtmdZ7>
- Debernardi, G., & Carlesi, C. (2013). Chemical-electrochemical approaches to the study passivation of chalcopyrite. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 34(1), 10-41. <https://doi.org/10.1080/08827508.2011.623745>
- Delgado C., S. V. (2015). Efecto de la temperatura en el crecimiento microbiano y la biolixiviación sobre la calcopirita por un cultivo microbiano biolixivante. *Revista Ciencia & Desarrollo*, 20, 59-64. <https://doi.org/10.33326/26176033.2015.20.515>
- Deng, S., Yang, J., Wang, Y., Long, T., & Yang, W. (2023). Influence of magnetite on the leaching of chalcopyrite in sulfuric acid. *Arabian Journal of Chemistry*, 16(8), 104905. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.104905>

- Dong, Y., Lin, H., Xu, X., & Zhou, S. (2013). Bioleaching of different copper sulfides by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and its adsorption on minerals. *Hydrometallurgy*, 140, 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.05.009>
- EC08, A. A. N. (2011). Basic overview of the working principle of a potentiostat/galvanostat (PGSTAT)–Electrochemical cell setup. *Metrohm Autolab. BV*, 1-3. <https://www.metrohm.com/en/applications/application-notes/autolab-applikationen-anautolab/an-ec-008.html>
- Egerton, R. F. (2005). *Physical principles of electron microscopy* (second ed.). Springer. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(05\)71290-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(05)71290-6)
- Ejigu, A., Tefera, M., & Guadie, A. (2025). A review article on: Voltammetric detection of lead, mercury, chromium, and arsenic metal ions from environmental samples. *Electrochemistry Communications*, 107996. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2025.107996>
- Ekmekçi, Z., & Demirel, H. (1997). Effects of galvanic interaction on collectorless flotation behaviour of chalcopyrite and pyrite. *International journal of mineral processing*, 52(1), 31-48. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(97\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(97)00050-1)
- Ekmekyapar, A., Demirkıran, N., Künkül, A., & Aktaş, E. (2015). Leaching of malachite ore in ammonium sulfate solutions and production of copper oxide. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 32(1), 155-165. <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20150321s00003211>
- Enríquez, I. N. R. (2013). *Tratamiento y caracterización electroquímica de electrodos de óxido de indio dopado con óxido de estaño (ITO) y su aplicación en electrodescontaminación de fenol en agua* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <https://acortar.link/nHIuKz>

- Estrada-Aldrete, J., Hernández-López, J., García-León, A., Peralta-Hernández, J., & Cerino-Córdova, F. (2020). Electroanalytical determination of heavy metals in aqueous solutions by using a carbon paste electrode modified with spent coffee grounds. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *857*, 113663. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113663>
- Fahlepy, M., & Tiwow, V. (2018). Characterization of magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) minerals from natural iron sand of Bonto Kanang Village Takalar for ink powder (toner) application. *Journal of Physics: Conference Series*,
- Flores-Álvarez, J. M., Elizondo-Álvarez, M. A., Dávila-Pulido, G. I., Guerrero-Flores, A. D., & Uribe-Salas, A. (2017). Electrochemical behavior of galena in the presence of calcium and sulfate ions. *Minerals Engineering*, *111*, 158-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.014>
- Fuller, T. F., & Harb, J. N. (2018). *Electrochemical engineering*. John Wiley & Sons.
- Galicia, M. (2020). Voltametría cíclica y de pulso para detección a nivel milimolecular y trazas de metales pesados en sistemas acuosos y suelos: Cr (VI), Pb (II) y Cu (II). *Instituto de Ciencias Biomédicas*. <http://cathi.uacj.mx/20.500.11961/18111>
- Gamez, J. L., Elizarraras, C. C., Ferrer, J. S. J., & Gutiérrez, M. Á. (2021). Estudio electroquímico de la preparación de electrodos modificados para diferentes aplicaciones de energía y biológica. <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/3450>
- García A., L. d. C. (2023). *Mejora de la actividad electrocatalítica de electrodos de carbono para baterías de flujo redox* [Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo]. <https://hdl.handle.net/10651/70373>

- García G., E. (2018). *Desarrollo de sensores electroquímicos nanoestructurados para el análisis de leche* [Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/30927>
- Gautier H., V. L. (2009). *Estudio de las interacciones microorganismo-mineral en la biolixiviación de la calcopirita con sulfolobus metallicus* [Tesis de Doctorado, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102019>
- Gawande, M. B., Branco, P. S., & Varma, R. S. (2013). Nano-magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) as a support for recyclable catalysts in the development of sustainable methodologies. *Chemical Society Reviews*, 42(8), 3371-3393. <https://doi.org/10.1039/C3CS35480F>
- Gahremaninezhad, A., Dixon, D., & Asselin, E. (2013). Electrochemical and XPS analysis of chalcopyrite (CuFeS<sub>2</sub>) dissolution in sulfuric acid solution. *Electrochimica Acta*, 87, 97-112. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.07.119>
- Ghatee, M. H., Namvar, S., Zolghadr, A. R., & Moosavi, F. (2015). Why is the electroanalytical performance of carbon paste electrodes involving an ionic liquid binder higher than paraffinic binders? A simulation investigation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(38), 24722-24731. <https://doi.org/10.1039/C5CP02683K>
- Gholami, H., Rezai, B., Mehdilo, A., Hassanzadeh, A., & Yarahmadi, M. (2020). Effect of microwave system location on floatability of chalcopyrite and pyrite in a copper ore processing circuit. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56. <http://dx.doi.org/10.37190/ppmp/118799>
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Michael, J. R., Ritchie, N. W., Scott, J. H. J., & Joy, D. C. (2003). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis* (third ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0215-9>
- González R., Y. K. (2018). *Implementación de un prototipo para la realización de la*

*técnica de voltametría cíclica para aplicaciones biológicas o ambientales* [Tesis de Pregrado, Instituto Tecnológico de Costa Rica].

Goodhew, P. J., & Humphreys, J. (2000). *Electron microscopy and analysis* (third ed.). CRC press.

<https://doi.org/10.1201/9781482289343>

Gu, G., Hu, K., Zhang, X., Xiong, X., & Yang, H. (2013). The stepwise dissolution of chalcopyrite bioleached by *Leptospirillum ferriphilum*. *Electrochimica Acta*, 103, 50-57.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.04.051>

Haavik, C., Stølen, S., Fjellvag, H., Hanfland, M., & Hausermann, D. (2000). Equation of state of magnetite and its high-pressure modification: Thermodynamics of the Fe-O system at high pressure. *American Mineralogist*, 85(3-4), 514-523. <https://doi.org/10.2138/am-2000-0413>

Han, H., Sun, W., Sun, W., & Hu, Y. (2020). Magnetic separation of impurities from hydrometallurgy solutions and waste water using magnetic iron ore seeding. In *Iron Ores*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.93728>

Holmes, P. R., & Crundwell, F. K. (1995). Kinetic aspects of galvanic interactions between minerals during dissolution. *Hydrometallurgy*, 39(1-3), 353-375.

[https://doi.org/10.1016/0304-386X\(95\)00041-E](https://doi.org/10.1016/0304-386X(95)00041-E)

Hong, M., Liu, S., Huang, X., Yang, B., Zhao, C., Yu, S., Liu, Y., Qiu, G., & Wang, J. (2021). A review on bornite (bio) leaching. *Minerals Engineering*, 174, 107245.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107245>

Hu, J., Zi, F., & Tian, G. (2021). Extraction of copper from chalcopyrite with potassium dichromate in 1-ethyl-3-methylimidazolium hydrogen sulfate ionic liquid aqueous solution. *Minerals Engineering*, 172, 107179.

<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107179>

- Hwang, Y. K., Díez, Á. S., & Inglesi-Lotz, R. (2024). The effects of critical mineral endowments on green economic growth in Latin America. *Resources Policy*, 98, 105355. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105355>
- Ikumapayi, F., Makitalo, M., Johansson, B., & Rao, K. H. (2012). Recycling of process water in sulphide flotation: Effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena. *Minerals Engineering*, 39, 77-88. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.07.016>
- Joshi, K., Magdouli, S., & Brar, S. K. (2025). Bioleaching for the recovery of rare earth elements from industrial waste: A sustainable approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 215, 108129. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108129>
- Kalambate, P. K., Rawool, C. R., Karna, S. P., & Srivastava, A. K. (2016). Highly sensitive and selective determination of methylergometrine maleate using carbon nanofibers/silver nanoparticles composite modified carbon paste electrode. *Materials Science and Engineering: C*, 69, 453-461. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.077>
- Kang, C.-U., Ji, S.-E., Pabst, T., Choi, K.-W., Khan, M. A., Kumar, R., Krishnaiah, P., Han, Y., Jeon, B.-H., & Kim, D.-H. (2021). Copper extraction from oxide ore of almalyk mine by H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> in simulated heap leaching: effect of particle size and acid concentration. *Minerals*, 11(9), 1020. <https://doi.org/10.3390/min11091020>
- Ke, B., & Chen, J. (2022). Influence of galvanic interaction between chalcopyrite and galena on electrochemical and flotation behaviour of chalcopyrite. *Applied Surface Science*, 573, 151475. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.151475>
- Kim, T. W., Kim, C. J., Chang, Y. K., Ryu, H. W., & Cho, K. S. (2002). Development of an optimal medium for continuous ferrous iron oxidation by immobilized *Acidothiobacillus*

*ferrooxidans* cells. *Biotechnology progress*, 18(4), 752-759.

<https://doi.org/10.1021/bp020289j>

Kizilca, M., & Copur, M. (2016). Investigation of the thermal decomposition kinetics of chalcopyrite ore concentrate using thermogravimetric data. *Chemical Engineering Communications*, 203(5), 692-704. <http://dx.doi.org/10.1080/00986445.2015.1056298>

Klein, C., & Cornelius Jr, S. (2018). *Manual de mineralogía: Vol. 2*. Reverté.

Knight, K. S., Marshall, W. G., & Zochowski, S. W. (2011). The low-temperature and high-pressure thermoelastic and structural properties of chalcopyrite, CuFeS<sub>2</sub>. *The Canadian Mineralogist*, 49(4), 1015-1034. <https://doi.org/10.3749/canmin.49.4.1015>

Kouchakinejad, S., Babae, S., Roshani, F., Kouchakinejad, R., & Kaki, S. (2020). The performance of the new modified pencil graphite electrode in quantifying of insulin. *Chemical Physics Letters*, 759, 137987. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2020.137987>

Lara, R. H., Vazquez-Arenas, J., Ramos-Sanchez, G., Galvan, M., & Lartundo-Rojas, L. (2015). Experimental and theoretical analysis accounting for differences of pyrite and chalcopyrite oxidative behaviors for prospective environmental and bioleaching applications. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119(32), 18364-18379. <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b05149>

Lee, W.-H., & Kim, J.-O. (2019). Effect of coexisting components on phosphate adsorption using magnetite particles in water. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(2), 1054-1060. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8528-1>

Liang, C.-L., Xia, J.-L., Yang, Y., Nie, Z.-Y., Zhao, X.-J., Zheng, L., Ma, C.-Y., & Zhao, Y.-D. (2011). Characterization of the thermo-reduction process of chalcopyrite at 65° C by cyclic

- voltammetry and XANES spectroscopy. *Hydrometallurgy*, 107(1-2), 13-21.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.01.011>
- Lima, F., Fortunato, G. V., & Maia, G. (2013). A remarkably simple characterization of glassy carbon-supported films of graphite, graphene oxide, and chemically converted graphene using  $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$  and  $\text{O}_2$  as redox probes. *RSC advances*, 3(24), 9550-9560.  
<https://doi.org/10.1039/C3RA40412A>
- LINAN. (2016). Manual de Operación del difractor de rayos X D8 Advance, Bruker AXS. In I. P. d. I. C. y. Tecnológica (Ed.), *División de Materiales Avanzados*: IPICYT.
- Liu, Q., Li, H., & Zhou, L. (2008). Galvanic interactions between metal sulfide minerals in a flowing system: Implications for mines environmental restoration. *Applied geochemistry*, 23(8), 2316-2323. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.02.024>
- Lock, D. H. (2004). Introducción a la Biometalurgia. *Revista de QUÍMICA*, 18(1), 19-22.  
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/18690>
- Lukesh, J. S., & Pauling, L. (Eds.). (1950). *The problem of the graphite structure* (Vol. 35). 1015 EIGHTEENTH ST, NW SUITE 601, WASHINGTON, DC 20036: MINERALOGICAL SOC AMER.
- Ma, Y., Yang, Y., Gao, X., Fan, R., & Chen, M. (2021). The galvanic effect of pyrite enhanced (bio) leaching of enargite ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ). *Hydrometallurgy*, 202, 105613.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105613>
- Mardones, C. (2022). Pigouvian taxes to internalize environmental damages from Chilean mining- A computable general equilibrium analysis. *Journal of Cleaner Production*, 362, 132359.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132359>

- Martins, F. L., & Leão, V. A. (2023). Chalcopyrite bioleaching in chloride media: A mini-review. *Hydrometallurgy*, 216, 105995. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105995>
- Mehta, A., & Murr, L. (1982). Kinetic study of sulfide leaching by galvanic interaction between chalcopyrite, pyrite, and sphalerite in the presence of *T. ferrooxidans* (30 °C) and a thermophilic microorganism (55 °C). *Biotechnology and bioengineering*, 24(4), 919-940. <https://doi.org/10.1002/bit.260240413>
- Mejía C., M. d. C. (2016). *Estudio de la deposición de óxido diférrico (magnetita) sobre fieltro de carbono* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/6911>
- Mendiratta, N. K., Yoon, R.-H., & Richardson, P. (1999). *Subaqueous disposal of mill tailings*. [https://onesearch.library.wvu.edu/discovery/fulldisplay/alma9979993450001453/01ALL\\_IANCE\\_WWU:WWU](https://onesearch.library.wvu.edu/discovery/fulldisplay/alma9979993450001453/01ALL_IANCE_WWU:WWU)
- Meza P., Y. A. (2021). *Sensor electroquímico basado en polipirrol por medio de la técnica de impresión molecular para la detección del bisfenol A* [Tesis de Pregrado, Universidad de los Andes]. <https://hdl.handle.net/1992/53575>
- Morales G., P. (2001). *Síntesis y caracterización de óxidos de cobalto-níquel para la reacción de formación de oxígeno* [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México]. <https://inis.iaea.org/records/wa0eb-q5a18>
- Moscoso Y., L. (1977). Pautas para la utilización de microorganismos en lixiviación. 53-63. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/2879>
- Mu, Y., Peng, Y., & Lauten, R. A. (2018). The galvanic interaction between chalcopyrite and pyrite in the presence of lignosulfonate-based biopolymers and its effects on flotation

- performance. *Minerals Engineering*, 122, 91-98.  
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.048>
- Muhsan, A. A., & Lafdi, K. (2019). Numerical study of the electrochemical exfoliation of graphite. *SN Applied Sciences*, 1(3), 276. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0296-8>
- Nangali, D. J., Siame, J., Mzula, A., & al, e. (2023). Bioleaching of chalcopyrite using native *Acidithiobacillus ferrooxidans* isolated in a mining area in Kitwe Zambia. *Scientific African*, 22, e01882. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01882>
- Nava, D., & González, I. (2006). Electrochemical characterization of chemical species formed during the electrochemical treatment of chalcopyrite in sulfuric acid. *Electrochimica Acta*, 51(25), 5295-5303. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.02.005>
- Nava, D., González, I., Leinen, D., & Ramos-Barrado, J. R. (2008). Surface characterization by X-ray photoelectron spectroscopy and cyclic voltammetry of products formed during the potentiostatic reduction of chalcopyrite. *Electrochimica Acta*, 53(14), 4889-4899. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2008.01.088>
- Nava, J. L., & González, I. (2005). Los electrodos de pasta de carbono en el estudio electroquímico de minerales metálicos. *Química Nova*, 28, 901-909. <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500031>
- Nkabinde, S. S., Ledwaba, M., Shumbula, N. P., Muller, E., & Ndlovu, G. (2025). Pretreatment strategies for enhancing rare earth elements leaching efficiency from phosphogypsum-A review with a focus on hydrometallurgical processes. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2025.04.015>

- Noguchi, H., & Okibe, N. (2020). The role of bioleaching microorganisms in saline water leaching of chalcopyrite concentrate. *Hydrometallurgy*, *195*, 105397. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105397>
- Noval, V. E., Ochoa Puentes, C., & Carriazo, J. G. (2017). Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Una estructura inorgánica con multiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista colombiana de química*, *46*(1), 42-59. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v46n1.62831>
- Ortiz B., N. P. (2021). *Biolixiviación como pretratamiento a minerales auríferos refractarios* [Tesis de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://core.ac.uk/download/483813047.pdf>
- Ortiz, M. (2017). *Desarrollo y caracterización de materiales de electrodo para dispositivos electroquímicos basados en nuevos criterios de ingeniería de diseño, aplicaciones en sistemas de baterías del tipo Níquel Hidruro metálico* [Thesis Doctoral, Universidad Tecnológica Nacional]. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/2447>
- Panda, S., Sanjay, K., Sukla, L., Pradhan, N., Subbaiah, T., Mishra, B., Prasad, M., & Ray, S. (2012). Insights into heap bioleaching of low grade chalcopyrite ores-A pilot scale study. *Hydrometallurgy*, *125*, 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.06.006>
- Papanikolaou, I., Litina, C., Zomorodian, A., & Al-Tabbaa, A. (2020). Effect of natural graphite fineness on the performance and electrical conductivity of cement paste mixes for self-sensing structures. *Materials*, *13*(24), 5833. <https://doi.org/10.3390/ma13245833>
- Patiño M.z, Y. (2016). *Integración de tecnologías de adsorción y electroquímicas para la eliminación de contaminantes emergentes en aguas* [Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo]. <http://hdl.handle.net/10651/51439>

- Peng, T., Liao, W., Wang, J., Miao, J., Peng, Y., Gu, G., Wu, X., Qiu, G., & Zeng, W. (2021). Bioleaching and electrochemical behavior of chalcopyrite by a mixed culture at low temperature. *Frontiers in Microbiology*, 12, 663757. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.663757>
- Perú, C. d. l. R. d. (2022). MINEM: Perú conservará posicionamiento atractivo para la actividad minera en los próximos años. <https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/674559-minem-peru-conservara-posicionamiento-atractivo-para-la-actividad-minera-en-los-proximos-anos>
- Petrović, S. J., Bogdanović, G. D., & ANTONIJEVIĆ, M. M. (2018). Leaching of chalcopyrite with hydrogen peroxide in hydrochloric acid solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(7), 1444-1455. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(18\)64788-0](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(18)64788-0)
- Porro, S., Boiardi, J. L., & Tedesco, P. H. (1988). Biolixiviación de minerales argentinos de cobre. *Revista de Metalurgia*, 24. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/29464>
- Radhi, M. M., Mossa, A. A., & Jubiar, M. R. (2020). Electrochemical Characterization of Redox FeII/FeIII Mediated by ZrO<sub>2</sub>NPs/GCE Using Cyclic Voltammetry. *Nanoarchitectonics*, 53-58. <https://doi.org/10.37256/nat.12202061.53-58>
- Ramírez F., M. (2016). *Estudio de la cristalografía y cuantificación por difracción de rayos x en materiales tipo hidrotalcita procedentes de la química del cemento* [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10486/672349>
- Ramsdell, L. S. (1925). The crystal structure of some metallic sulfides. *American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials*, 10(9), 281-304. [http://www.minsocam.org/ammin/AM10/AM10\\_281.pdf](http://www.minsocam.org/ammin/AM10/AM10_281.pdf)

- Restrepo, E. M., Correa, J. D. O., & Márquez, M. A. (2007). Mineralogía del proceso de oxidación bacteriana de la galena (PbS) por *acidithiobacillus ferrooxidans*, mediante análisis de microscopía electrónica de barrido, ftir y drx. *Scientia et technica*, 13(36), 549-554. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4885>
- Rivas, M. G., González, P. J., Ferroni, F. M., Rizzi, A. C., & Brondino, C. D. (2020). Studying Electron Transfer Pathways in Oxidoreductases. <http://hdl.handle.net/11336/174603>
- Rivera G., L. M. (2012). *Síntesis de catalizadores catódicos de aleaciones de paladio, hierro e iridio, para su posible utilización en pilas de combustible de baja temperatura* [Tesis de Pregrado, Universidad de El Salvador]. <https://hdl.handle.net/20.500.14492/1006>
- Rosas, J. E. P., Peña, P. A., & Avella, J. A. P. (2007). Utilización de electrodos de pasta de carbono para la evaluación fotoelectroquímica de materiales semiconductores: TiO<sub>2</sub> en soluciones cianuradas. *Scientia et technica*, 4(36), 701-706. <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5143>
- Saavedra, A., & Cortón, E. (2014). Biotecnología microbiana aplicada a la minería. *Química Viva*, 13(3), 148-163. <http://www.quimicaviva.qb.fcen.uba.ar/v13n3/saavedra.html>
- Saavedra, A., García-Meza, J. V., Cortón, E., & González, I. (2018a). Interactions of mimicked weathered pyrite surfaces (FeS<sub>2</sub>) with acidic culture media (0 K): An approach for (bio)leaching applications. *Hydrometallurgy*, 182, 128-135. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.10.022>
- Saavedra, A., García-Meza, J. V., Cortón, E., & González, I. (2018b). Understanding galvanic interactions between chalcopyrite and magnetite in acid medium to improve copper (Bio) Leaching. *Electrochimica Acta*, 265, 569-576. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.169>

- Saavedra O., A. U. (2018). *Diseño y desarrollo de sensores y biosensores para monitoreo de procesos biohidrometalúrgicos* [Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires].  
[https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis\\_n6381\\_SaavedraOlaya.pdf](https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6381_SaavedraOlaya.pdf)
- Salcedo-Mejía, L., Ramírez-Osco, L., Cayo-Gonzales, H., & Arias-Arce, V. (2015). Bioleaching of Copper Sulphide Ore by a Microbial Consortium Isolated from Acid Mine Drainage: Influence of  $[\text{Fe}^{2+}]$ . *Advanced Materials Research*, 1130, 418-422.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1130.418>
- Salinas P., J. J. (2017). *Separación magnética de arenas ferrosas y su efecto significativo en las ventas en la mina Dune Ocho, Vila Vila región Tacna* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].  
<https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/1767>
- Santo, M., & Otero, L. (2017). *NanoArte ¿Como vemos lo que el ojo no ve?* (UniRo, Ed. Un espacio de difusión de nanociencia y nanotecnología E-book ed.).  
<http://www.unirioeditora.com.ar/producto/nanoarte-vemos-lo-ojo-no-ve/>
- Sany, S. M. K. (2016). *Chalcopyrite (Bio) leaching in sulphate solutions: An investigation into hindered dissolution with a focus on solution redox potential* Luleå University of Technology]. <https://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:991761/FULLTEXT01.pdf>
- Sarecka-Hujar, B., Balwierz, R., Ostrozka-Cieslik, A., Dyja, R., Lukowicz, D., & Jankowski, A. (2017). Scanning electron microscopy and X-ray energy dispersive spectroscopy—useful tools in the analysis of pharmaceutical products. *Journal of Physics: Conference Series*.
- Sauber, M., & Dixon, D. G. (2011). Electrochemical study of leached chalcopyrite using solid paraffin-based carbon paste electrodes. *Hydrometallurgy*, 110(1-4), 1-12.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.07.009>

- Scimeca, M., Bischetti, S., Lamsira, H. K., Bonfiglio, R., & Bonanno, E. (2018). Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *European journal of histochemistry: EJH*, 62(1), 2841. <https://doi.org/10.4081/ejh.2018.2841>
- Seo, S. Y., Choi, W. S., Kim, M. J., & Tran, T. (2013). Leaching of a Cu-Co ore from Congo using sulphuric acidhydrogen peroxide leachants. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 49(1), 1-7. <https://doi.org/10.2298/JMMB120103035S>
- Sheshmani, S., & Fashapoyeh, M. A. (2013). Suitable chemical methods for preparation of graphene oxide, graphene and surface functionalized graphene nanosheets. *Acta Chimica Slovenica*, 60(4). <https://acortar.link/N2K5mC>
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Nieman, T. A. (2008). *Principios de análisis instrumental* (6ta ed., Vol. 1). McGraw Hill Madrid. [https://www.academia.edu/43268766/Principios\\_de\\_an%C3%A1lisis\\_instrumental\\_Skoog\\_Douglas\\_A\\_Holler\\_F\\_James\\_Crouch\\_Stanley\\_R\\_Sexta\\_Edici%C3%B3n\\_Cengage\\_Learning\\_Editores\\_2008\\_M%C3%A9xico](https://www.academia.edu/43268766/Principios_de_an%C3%A1lisis_instrumental_Skoog_Douglas_A_Holler_F_James_Crouch_Stanley_R_Sexta_Edici%C3%B3n_Cengage_Learning_Editores_2008_M%C3%A9xico)
- Snizhko, D., Zholudov, Y., Kukoba, A., & Xu, G. (2023). Potentiostat design keys for analytical applications. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 936, 117380. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2023.117380>
- Soltani, N., Tavakkoli, N., Shahdost-Fard, F., Salavati, H., & Abdoli, F. (2019). A carbon paste electrode modified with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-supported palladium nanoparticles for simultaneous voltammetric determination of melatonin, dopamine, and acetaminophen. *Microchimica Acta*, 186(8), 540. <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3541-3>

- Song, H.-K., Sonkaria, S., Khare, V., Dong, K., Lee, H.-T., Ahn, S.-H., Kim, H.-K., Kang, H.-J., Lee, S.-H., & Jung, S. (2015). Pond sediment magnetite grains show a distinctive microbial community. *Microbial ecology*, 70(1), 168-174. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0562-7>
- Švancara, I., Hvizdalová, M., Vytrás, K., Kalcher, K., & Novotný, R. (1996). A microscopic study on carbon paste electrodes. *Electroanalysis*, 8(1), 61-65. <https://doi.org/10.1002/elan.1140080113>
- Švancara, I., Vytrás, K., Kalcher, K., Walcarius, A., & Wang, J. (2009). Carbon paste electrodes in facts, numbers, and notes: a review on the occasion of the 50-years jubilee of carbon paste in electrochemistry and electroanalysis. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 21(1), 7-28. <https://doi.org/10.1002/elan.200804340>
- Tapia, J., Dueñas, A., Cheje, N., Soclle, G., Patiño, N., Ancalla, W., Tenorio, S., Denos, J., Taco, H., & Cao, W. (2022). Bioleaching of heavy metals from printed circuit boards with an acidophilic iron-oxidizing microbial consortium in stirred tank reactors. *Bioengineering*, 9(2), 79. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9020079>
- Toledo, A. G. R., Costa, R. B., Delforno, T. P., Arena, F. A., & Bevilaqua, D. (2023). Exploring chalcopyrite (bio) leaching mechanisms under thermophilic conditions. *Minerals Engineering*, 204, 108417. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108417>
- Torrinha, Á., Amorim, C. G., Montenegro, M. C., & Araújo, A. N. (2018). Biosensing based on pencil graphite electrodes. *Talanta*, 190, 235-247. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2018.07.086>

- Tran, D. T., Tran, N. T. T., Pham, T. P. T., & Yun, Y.-S. (2025). Process development and techno-economic feasibility of thiosulfate-based hydrometallurgical recycling for waste printed circuit boards. *Journal of Cleaner Production*, 520, 146094. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146094>
- Turkmen, Y., & Kaya, E. (2010). Leaching of chalcopyrite concentrate in sulphuric acid with the aid of mechanical activation and microwave energy. *Asian Journal of Chemistry*, 22(10), 8107. <https://acortar.link/e2nz23>
- Umeda, S., Shibata, S., Koishikawa, A., Watanabe, T., Ohara, H., Itoh, N., & Matsushima, A. (2025). Antibacterial properties of novel transparent copper films: a potential new tool to reduce healthcare-associated infections in hospitals and healthcare facilities. *BMC microbiology*, 25(1), 502. <https://doi.org/10.1186/s12866-025-04265-0>
- Urbano, G., Meléndez, A., Reyes, V., Veloz, M., & González, I. (2007). Galvanic interactions between galena-sphalerite and their reactivity. *International journal of mineral processing*, 82(3), 148-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.004>
- Urbano, G., Reyes, V., Veloz, M., & González, I. (2016). Electrochemical analysis of galena reactivity in typical physicochemical conditions of calcareous soils. *Int. J. Electrochem. Sci*, 11, 3714-3726. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)17431-1](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)17431-1)
- Vidales, G. M. E. A. (2012). *Diseño, construcción y caracterización de electrodos de grafito modificados con materiales compositos para la detección de dopamina en líquido cefalorraquídeo* [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C.]. <http://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1021/204>
- Viera, M. E., Silva, M. L., Oliveira, L. F., Perrone, Í. T., & Stephani, R. (2021). X-ray energy dispersive spectroscopy (EDS) coupled with scanning electron microscope (SEM):

- fundamentals and applications in dairy products. *Res, Soc and Develop*, 10(10).  
<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.18622>
- Wa, K., Zhang, Q., Hu, H., & Liu, Y. (2021). Leaching of Cu from malachite using  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  solution as the leaching agent. *ScienceAsia*, 47(1).  
<https://doi.org/10.2306/SCIENCEASIA1513-1874.2021.012>
- Wang, J., Gan, X., Zhao, H., Hu, M., Li, K., Qin, W., & Qiu, G. (2016). Dissolution and passivation mechanisms of chalcopyrite during bioleaching: DFT calculation, XPS and electrochemistry analysis. *Minerals Engineering*, 98, 264-278.  
[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2016MiEng..98..264W/doi:10.1016/j.mineng.2016.09.008](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2016MiEng..98..264W/doi:10.1016/j.mineng.2016.09.008)
- Wang, X., Liao, R., Zhao, H., Hong, M., Huang, X., Peng, H., Wen, W., Qin, W., Qiu, G., & Huang, C. (2018). Synergetic effect of pyrite on strengthening bornite bioleaching by *Leptospirillum ferriphilum*. *Hydrometallurgy*, 176, 9-16.  
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.12.003>
- Wen, S., Liu, J., & Deng, J. (2019). *Fluid Inclusion Effect in Flotation of Sulfide Minerals*. Elsevier.
- White, A. F., Peterson, M. L., & Hochella Jr, M. F. (1994). Electrochemistry and dissolution kinetics of magnetite and ilmenite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(8), 1859-1875.  
[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90420-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90420-0)
- Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). The transmission electron microscope. In *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science* (second ed.). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3_1)

- Wong, A., Riojas, A. C., Baena-Moncada, A. M., & Sotomayor, M. D. (2021). A new electrochemical platform based on carbon black paste electrode modified with  $\alpha$ -cyclodextrin and hierarchical porous carbon used for the simultaneous determination of dipyrone and codeine. *Microchemical Journal*, *164*, 106032. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2021.106032>
- Xie, H., Liu, Y., Rao, B., Gao, L., Chen, L., & Tian, X. (2021). Selective passivation behavior of galena surface by sulfuric acid and a novel flotation separation method for copper-lead sulfide ore without collector and inhibitor. *Separation and Purification Technology*, *267*, 118621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118621>
- Xu, W., Fen, J., Liu-yang, D., Jian-gen, G., & Cong-ren, Y. (2022). Review of tungsten resource reserves, tungsten concentrate production and tungsten beneficiation technology in China. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, *32*(7), 2318-2338. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)65950-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)65950-8)
- Yang, L., Zhou, X., Yan, H., Zhang, H., Liu, X., & Qiu, T. (2021). Effects of galvanic interaction between chalcopyrite and monoclinic pyrrhotite on their flotation separation. *Minerals*, *12*(1), 39. <https://doi.org/10.3390/min12010039>
- Yévenes, L. V. (2009). *The kinetics of the dissolution of chalcopyrite in chloride media* [Doctor of Philosophy (PhD), Murdoch University]. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/475>
- Yuan, K., Renock, D., Ewing, R. C., & Becker, U. (2015). Uranium reduction on magnetite: Probing for pentavalent uranium using electrochemical methods. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *156*, 194-206.

[https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2015GeCoA.156..194Y/doi:10.1016/j.gca.2015.02.014](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2015GeCoA.156..194Y/doi:10.1016/j.gca.2015.02.014)

Zambrano Alva, S. D. P. (2013). *Caracterización de fragmentos metálicos de las tumbas 14, 15 y 16 del complejo arqueológico Huaca Rajada, correspondiente a la Cultura Mochica* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de Mayor de San Marcos].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12390/2106>

Zhang, H., Wei, D., Liu, W., Hou, D., & Zhang, R. (2021a). Effect of polyvinyl pyrrolidone on chalcopyrite bioleaching with *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy*, 205, 105753. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2021.105753>

Zhang, H., Wei, D., Liu, W., Hou, D., & Zhang, R. (2021b). Enhancement mechanism of polyoxyethylene nonyl phenyl ether on the bioleaching of chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 173, 107237. [https://ui.adsabs.harvard.edu/link\\_gateway/2021MiEng.17307237Z/doi:10.1016/j.mineng.2021.107237](https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2021MiEng.17307237Z/doi:10.1016/j.mineng.2021.107237)

Zhang, L., Hu, G., Zhou, J., Zhou, Z., Liu, K., & Zhang, S. (2021). Investigating the pulse short electric arc milling of Ti6Al4V alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 116(5), 1675-1689. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07572-8>

Zhang, Y., Zhang, L., Wang, G., & al, e. (2023). Bioleaching residue-introduced thermal activation-leaching of refractory chalcopyrite. *Minerals Engineering*, 203, 108368. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108368>

Zhang, Y., Zhao, H., Qian, L., Sun, M., Lv, X., Zhang, L., Petersen, J., & Qiu, G. (2020). A brief overview on the dissolution mechanisms of sulfide minerals in acidic sulfate environments

- at low temperatures: Emphasis on electrochemical cyclic voltammetry analysis. *Minerals Engineering*, 158, 106586. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106586>
- Zhao, B., Gao, P., Tang, Z., & Zhang, W. (2021). The efficient improvement of original magnetite in iron ore reduction reaction in magnetization roasting process and mechanism analysis by in situ and continuous image capture. *Minerals*, 11(6), 645. <https://doi.org/10.3390/min11060645>
- Zhao, X., Wang, R., Lu, X., Lu, J., Li, C., & Li, J. (2013). Bioleaching of chalcopyrite by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals Engineering*, 53, 184-192. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.08.008>
- Zheng, X.-f., Xia, J.-l., Liu, H.-c., Nie, Z.-y., Qin, C.-q., Wang, Y., & Chen, J.-h. (2022). The differential effect of amorphous  $\mu$ -S and orthorhombic  $\alpha$ -S<sub>8</sub> on chalcopyrite bioleaching by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals Engineering*, 184, 107660. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107660>
- Zolis, A. K. (2017). *Modelado electrotérmico de baterías de litio para determinar su envejecimiento mediante la entropía irreversible* [Tesis de Pregrado, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://hdl.handle.net/2117/112399>

## ANEXOS

## Anexo 1

## CÁLCULOS DE LAS DIFERENTES PROPORCIONES DE MINERALES

1. Los cálculos para las diferentes proporciones CM (25:75%, 50:50% y 75:25%).

Para 25:75% CM

A. Calculamos para 25% de C en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de C.

$$\begin{array}{ccc}
 25\% \text{ de } C & \longrightarrow & 100\% \\
 x & \longrightarrow & 0.2g \\
 X = 0.05g \text{ de } C & & 
 \end{array}$$

B. Calculamos para 75% de M en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de M.

$$\begin{array}{ccc}
 75\% \text{ de } M & \longrightarrow & 100\% \\
 x & \longrightarrow & 0.2g \\
 X = 0.15g \text{ de } M & & 
 \end{array}$$

Para 50:50% CM

A. Calculamos para 50% de C en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de C.

$$\begin{array}{ccc}
 50\% \text{ de } C & \longrightarrow & 100\% \\
 x & \longrightarrow & 0.2g \\
 X = 0.1g \text{ de } C & & 
 \end{array}$$

B. Calculamos para 50% de M en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de M.

$$\begin{array}{ccc}
 50\% \text{ de } M & \longrightarrow & 100\% \\
 x & \longrightarrow & 0.2g \\
 X = 0.1g \text{ de } M & & 
 \end{array}$$

**Para 75:25% CM**

**A. Calculamos para 75% de C en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de C.**

$$\begin{array}{ccc} 75\% \text{ de C} & \longrightarrow & 100\% \\ x & \longrightarrow & 0.2g \\ X = 0.15g \text{ de C} & & \end{array}$$

**B. Calculamos para 25% de M en 0.2g para obtener la proporción correspondiente de M.**

$$\begin{array}{ccc} 25\% \text{ de M} & \longrightarrow & 100\% \\ x & \longrightarrow & 0.2g \\ X = 0.05g \text{ de M} & & \end{array}$$

**2. Los cálculos para las diferentes proporciones CG (25:75%, 50:50% y 75:25%).**

Los cálculos son similares al cálculo 1 de las diferentes proporciones.

## Anexo 2

## CÁLCULOS DE PREPARACIÓN DEL MEDIO DE CULTIVO MICROBIANO 0K

- Se prepara 1g/L de KCl en 50 ml

$$\begin{array}{rcl}
 1g & \longrightarrow & 1000 \text{ mL} \\
 x & \longrightarrow & 50 \text{ mL} \\
 X = 0.05 \text{ g} & & 
 \end{array}$$

- Se prepara 0.2g/L de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 50 ml

$$\begin{array}{rcl}
 0.2g & \longrightarrow & 1000 \text{ mL} \\
 x & \longrightarrow & 50 \text{ mL} \\
 X = 0.01 \text{ g} & & 
 \end{array}$$

- Se prepara 2.6g/L de  $(\text{NH}_4)_2\text{H}_2\text{PO}_4$  en 50 ml

$$\begin{array}{rcl}
 2.6g & \longrightarrow & 1000 \text{ mL} \\
 x & \longrightarrow & 50 \text{ mL} \\
 X = 0.13 \text{ g} & & 
 \end{array}$$

- Preparar 250mL de solución 10N en  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con una  $d = 1.84\text{g/mL}$  y un 96%

$$V = 250\text{mL}$$

$$d = 1.84\text{g/mL}$$

$$\text{Masa molar} = 98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = \frac{98 \text{ g/mol}}{2 \text{ eq/mol}} = 49 \text{ g/eq}$$

$$N = \frac{\text{Eq. soluto}}{\text{Lts}}$$

$$N = \frac{m/\text{Peq}}{\text{Lts}}$$

$$10 \text{ eq/L} = \frac{m/49 \text{ g/eq}}{0.25 \text{ Lts}}$$

$$m = 10 \text{ eq/L} \times 49 \text{ g/eq} \times 0.25 \text{ Lts}$$

$$m = 122.5 \text{ g}$$

$$d \times \text{mL} \times \% = \text{Peso}$$

$$1.84 \text{ g/mL} \times \text{mL} \times \frac{96\%}{100\%} = 122.5 \text{ g}$$

$$\text{mL} = \frac{122.5 \text{ g}}{1.7664 \text{ g/mL}} = 69.35 \text{ mL}$$

## Anexo 3

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

Formulación del problema	Objetivos	Justificación	Hipótesis	Resultados	Conclusiones
<p><b>Problema general:</b></p> <p>¿Es posible identificar la interacción galvánica entre las combinaciones de minerales de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena en un medio cultivo microbiano 0K ácido, mediante técnicas electroquímicas, con el fin de incrementar la solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados de baja ley?</p> <p><b>Problemas específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo varían las propiedades de caracterización del grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena con microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX)?</li> <li>• ¿Cuál es la efectividad de la fabricación de los electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita galena (25:75%, 50:50% y 75:25%), empleando aceite mineral como aglutinante?</li> <li>• ¿Cómo responde la caracterización de los EPC y los EPC-minerales de</li> </ul>	<p><b>Objetivo general:</b></p> <p>Evaluar la interacción galvánica entre las combinaciones de minerales de calcopirita magnetita y calcopirita-galena en un medio de cultivo microbiano 0 K ácido pH 1.8, con el fin de incrementar la solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados de baja ley.</p> <p><b>Objetivos específicos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar el grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena con microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX).</li> <li>• Fabricar los electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%),</li> </ul>	<p>La biolixiviación es clave para recuperar cobre de minerales sulfurados de baja ley, pero la calcopirita presenta capas pasivas que dificultan esta disolución. Los métodos actuales lixivian cerca de un 40% del mineral, generando pérdidas e impactos ambientales. Técnicas electroquímicas permiten estudiar interacciones galvánicas en condiciones de biolixiviación y así optimizar la recuperación, reduciendo la pasivación, contribuyendo a procesos más eficientes y amigables con el medio ambiente.</p>	<p><b>Hipótesis general:</b></p> <p>La interacción galvánica entre los minerales combinados de calcopirita-magnetita y calcopirita-galena, en un medio de cultivo microbiano 0K ácido (pH 1.8), favorecerá un incremento de solubilización del cobre a partir de minerales sulfurados. Este efecto podrá ser identificado y cuantificado mediante técnicas electroquímicas.</p> <p><b>Hipótesis específicas:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La caracterización mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía (MEB-EDS) y difracción de rayos X (DRX) permitirá identificar las propiedades del grafito y los minerales de calcopirita, magnetita y galena.</li> <li>• La fabricación de electrodos de pasta de carbón (EPC) y los electrodos de pasta de carbón con minerales (EPC-minerales) de calcopirita, magnetita, galena, calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La caracterización por MEB-EDS y DRX confirma la pureza y estructuras cristalinas.</li> <li>• Los electrodos fabricados con proporciones específicas muestran estabilidad electroquímica. El análisis por PCA y VC diferenciar la reactividad electroquímica. El diagrama de Evans evidenció que la interacción calcopirita-magnetita genera una activación galvánica significativa, aumentando la corriente de corrosión y acelerando la disolución de cobre.</li> <li>• La combinación calcopirita-galena no mostró mejora en la solubilización, atribuyéndose a pasivación rápida y baja conductividad catódica de la galena.</li> <li>• La magnetita actúa como cátodo eficiente que previene la pasivación, mientras que la galena forma capas pasivas que bloquean la reacción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La caracterización mineralógica mediante MEB-EDS y DRX confirmó las estructuras cristalinas de los minerales estudiados, permitiendo así interpretar su comportamiento electroquímico. Asimismo, los electrodos de pasta de carbón modificados demostraron ser herramientas efectivas para simular las interacciones galvánicas bajo condiciones controladas.</li> <li>• Electrodos modificados simulando sistemas minerales mostraron la diferencia en la respuesta electroquímica.</li> <li>• Las mediciones electroquímicas (PCA, VC y diagramas de Evans) revelaron que la magnetita actúa como catalizador galvánico efectivo para la calcopirita, incrementando la disolución de cobre hasta 2.3 veces. En contraste, la galena no mostró efecto galvánico favorable debido a su baja reactividad catódica y posible</li> </ul>

<p>calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%), y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%) medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8 mediante técnicas de potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC)?</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Cómo identificar el efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados e impacto en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y VC?</li> </ul>	<p>utilizando aceite mineral como aglutinante.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar los EPC y los EPC-minerales de calcopirita, magnetita, galena, combinaciones de calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%) en medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8 mediante técnicas de potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC).</li> <li>• Identificar el efecto de la interacción galvánica entre los minerales estudiados e impacto en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y VC.</li> </ul>		<p>(25:75%, 50:50% y 75:25%), mostrará una respuesta efectiva al usar aceite mineral como aglutinante.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La caracterización electroquímica mediante potencial de circuito abierto (PCA) y voltamperometría cíclica (VC) permitirá diferenciar la respuesta de los EPC y EPC minerales de calcopirita, magnetita, galena, calcopirita-magnetita (25:75%, 50:50% y 75:25%) y calcopirita-galena (25:75%, 50:50% y 75:25%) en el medio de cultivo microbiano 0K ácido pH 1.8.</li> <li>• La interacción galvánica entre los minerales estudiados tendrá un efecto positivo en la recuperación de cobre mediante biolixiviación electroquímica a partir de los resultados de PCA y VC.</li> </ul>	<p>pasivación superficial, a pesar de presentar un potencial de reposo más noble.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La adición de magnetita representa una estrategia viable y ambientalmente segura para optimizar la lixiviación de calcopirita en sistemas ácidos. Este mineral accesible y económico puede incorporarse fácilmente como aditivo conductor, retrasando la formación de capas pasivantes sin requerir oxidantes externos ni microorganismos. Estos resultados sientan las bases para futuras investigaciones que incluyan estudios dinámicos en reactores de biolixiviación, evaluaciones a escala piloto y análisis de costos-beneficios, posicionando a la magnetita como una solución práctica y sostenible para el tratamiento de minerales sulfurados refractarios de baja ley.</li> </ul>
---	--	--	--	--