

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**



**“DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL MIXTO Y LA DENSIDAD DE  
CORRIENTE DEL PAR GALVÁNICO CALCOPIRITA-PIRITA A  
PARTIR DE SUS REACCIONES ELEMENTALES ANÓDICA Y  
CATÓDICA”**

**TESIS**

**PRESENTADO POR:**

**JOSE NESTOR MAMANI QUISPE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PUNO – PERÚ**

**2018**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL MIXTO Y LA DENSIDAD DE  
CORRIENTE DEL PAR GALVÁNICO CALCOPIRITA-PIRITA A  
PARTIR DE SUS REACCIONES ELEMENTALES ANÓDICA Y  
CATÓDICA**

**TESIS PRESENTADO POR:**

**JOSE NESTOR MAMANI QUISPE**

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:**

**INGENIERO QUÍMICO**



**APROBADA POR:**

**PRESIDENTE**

:

  
Mg. HIGINIO ALBERTO ZUÑIGA SÁNCHEZ

**PRIMER MIEMBRO**

:

  
M.Sc. CIRO HERNÁN VERA ALATRISTA

**SEGUNDO MIEMBRO**

:

  
D.Sc. LIDIA ENSUEÑO ROMERO IRURI

**DIRECTOR**

:

  
D.Sc. MOISÉS PÉREZ CAPA

**ÁREA:** Ingeniería de Procesos

**TEMA:** Determinación del potencial mixto y la densidad de corriente

**LINEA:** Ingeniería de Procesos

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 13 de diciembre del 2018

## DEDICATORIA

A Dios por todas las bendiciones y la fortaleza que me dio en todo este tiempo. A mi hijo Gabriel, por todas las sonrisas que me diste en el transcurso de esta etapa, gracias.

A mi madre Roberta (QPD), a mi padre Jose que siempre está apoyándome en todas mis metas. A mis hermanas María (QPD), Olga, Nieves (QPD) y Livia por estar siempre pendiente de mí.

## AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional del Altiplano, y a la Facultad de Ingeniería Química por haberme permitido desarrollarme personal y profesionalmente, y ahora tener las herramientas para poder afrontar todos los retos que tiene esta hermosa carrera.

A los profesores M.sc. Higinio Zúñiga, M.sc. Ciro Vera, Dra. Lidia Romero y Dr. Moisés Pérez, por sus sugerencias y correcciones de este trabajo de tesis.

A mi asesor de tesis, Ph.D. Tomás Vargas, la distancia no fue un impedimento para seguir recibiendo sus consejos (Puno-Santiago de Chile).

A mis amigos que estuvieron apoyándome durante la redacción de este trabajo: Yanira, Néstor, Claudia, Judith, Mario, Zaida, Sandra, Elisban, Miluzka, Marcos, Marlui, Eli y Carlos.

A mis amigos del grupo de investigación en hidro/electrometalurgia de la Universidad de Chile; Jaqueline, Francisca, Joaquin, Katy, Evelin, Francisco y el loco Matías, ya nos estaremos reuniendo nuevamente.

A las secretarias más amables que he conocido; Juanita Vergara (QPD) has sido como una madre en mis estudios de maestría, Nicol Tapia, una súper amiga y excelente profesional. Y sin olvidar a, Miriam Choque, gracias por todos los consejos.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	9
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS .....	10
RESUMEN .....	11
ABSTRACT .....	12
I. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
1.1.1. Planteamiento de los problemas específicos .....	14
1.1. JUSTIFICACIÓN .....	14
1.1.1. Impactos en Ciencia y Tecnología .....	14
1.1.2. Impactos Económicos .....	15
1.1.3. Impactos Ambientales .....	15
1.2. OBJETIVO GENERAL .....	15
1.2.1. Objetivos específicos .....	15
1.3. HIPOTESIS GENERAL .....	15
1.3.1. Hipótesis específica .....	16
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	17
2.1. ANTECEDENTES .....	17
2.1.1. Antecedentes Nacionales .....	17
2.1.2. Antecedentes Internacionales .....	17
2.2. MARCO TEÓRICO .....	22
2.2.1. Características de los minerales .....	22
2.2.2. Mecanismos de reacción .....	23
2.2.3. Diagramas de Eh – pH .....	24
2.2.4. Fundamentos de cinética electroquímica .....	26
2.2.5. La ecuación de corriente –potencial .....	26
2.2.6. Control por transferencia de carga (CTC) .....	27
2.2.7. Control por transferencia de masa (CTM) .....	28
2.2.8. Control mixto (CM) .....	28
2.2.9. Teoría del potencial mixto .....	29
2.2.10. Teoría del par galvánico .....	30
2.2.11. Efecto de la razón área catódica/anódica en el par galvánico .....	31
2.2.12. Pasivación superficial .....	32
III. MATERIALES Y MÉTODOS .....	34
3.1. LUGAR DE EXPERIMENTACIÓN .....	34
3.2. PREPARACIÓN DE MATERIALES .....	34
3.2.1. Preparación y análisis de los electrodos .....	34
3.2.2. Preparación y análisis de la solución .....	34
3.3. PRUEBAS ELECTROQUÍMICAS .....	34
3.3.1. Obtención y caracterización de la curva de polarización anódica de la calcopirita y pirita .....	35

3.3.2.	Obtención y caracterización de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre calcopirita y pirita.....	36
3.3.3.	Determinación del potencial mixto y densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita.....	37
3.3.4.	Análisis de la influencia de la razón área pirita/área calcopirita en el comportamiento del par galvánico. ....	37
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	38
4.1.	OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POLARIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICO ELECTROQUÍMICOS ANÓDICO DE LA CALCOPIRITA Y PIRITA. ....	38
4.1.1.	Caracterización de los electodos .....	38
4.1.2.	Obtención de la curva de polarización anódica y determinación de los parámetros cinéticos anódicos de la calcopirita. ....	39
4.1.3.	Obtención de la curva de polarización anódica y determinación de los parámetros cinéticos anódicos de la pirita. ....	41
4.2.	OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POLARIZACIÓN Y CARACTERIZACION DE LOS PARAMETROS CINETICO ELECTROQUIMICOS DE REDUCCION DEL ION FERRICO SOBRE LA SUPERFICIE DE LACALCOPIRITA Y PIRITA. ....	42
4.2.1.	Obtención de la curva de polarización catódica y determinación de los parámetros cinéticos catódico neto de reducción del ion férrico sobre calcopirita. ....	42
4.2.2.	Obtención de la curva de polarización catódica y determinación de los parámetros cinéticos catódico neto de reducción del ion férrico sobre pirita. ....	44
4.3.	DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL MIXTO Y LA DENSIDAD DE CORRIENTE DEL PAR GALVANICO CALCOPIITA-PIRITA .....	48
4.3.1.	Determinación del potencial y la densidad de corriente de la calcopirita y pirita. ....	48
4.3.2.	Determinación del potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita. ....	50
4.4.	ANALISIS DEL EFECTO DE LA RAZON DE ÁREA PIRITA/CALCOPIRITA EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAR GALVANICO .....	53
4.4.1.	Efecto de la relación de área pirita/calcopirita sobre el potencial del par galvánico y la densidad de corriente.....	53
V.	CONCLUSIONES.....	57
VI.	RECOMENDACIONES .....	58
VII.	REFERENCIAS .....	59
	ANEXOS.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo de la interacción del par galvánico entre calcopirita y pirita propuesto por Tshilombo (2004). .....	19
Figura 2: Estructura de la calcopirita: a) de acuerdo a Pauling and Brockway (1932) y b) de acuerdo a Burdick and Ellis (1917).....	22
Figura 3: Estructura cristalina de la pirita con coordinación octaédrica y tetraédrica (Wu et al., 2004). .....	23
Figura 4: Diagrama Eh-pH de la $CuFeS_2 - H_2O$ en la región ácida a $25^\circ C$ (citado en Córdoba et al. (2008) de Garrels y Christ (1965)).....	25
Figura 5: Diagrama Eh-pH de la $Fe - S - H_2O$ en un sistema a $25^\circ C$ y $a_{Fe^{++}} = 10^{-6} M/L$ (Majima, 1969) .....	26
Figura 6: Teoría del potencial mixto para un mineral sulfurado (MS) (elaboración propia). .....	30
Figura 7: Curvas de polarización para dos metales en un par galvánico (Fontana, 1987). .	31
Figura 8: Efecto de la razón de área catódico en la corrosión del para galvánico zinc-platino (Fontana 1987). .....	32
Figura 9: Celda electroquímica con las conexiones electrodos de referencia, contra electrodo y de trabajo.....	35
Figura 10: Superficie del electrodo de calcopirita con vista de las inclusiones de blenda y ganga no metálica en una escala de $25 \mu m$ (elaboración propia). .....	38
Figura 11: Superficie del electrodo de pirita a una escala $50 \mu m$ (elaboración propia).....	38
Figura 12: Curva de corriente-potencial para la calcopirita en ácido sulfúrico (datos en ANEXO A.1.- Pág. 62) .....	39
Figura 13: Linealización de la curva anódica de la calcopirita, donde, $\eta = E - E_{eq}$ y $E_{eq}$ tiene un valor de $0,280 V$ vs $Ag/AgCl$ (elaboración propia). .....	40
Figura 14: Curva de corriente-potencial para la pirita en ácido sulfúrico (datos en ANEXO A.2.- Pág. 66). .....	41
Figura 15: Linealización de la curva anódica de la pirita, donde, $\eta = E - E_{eq}$ y $E_{eq}$ tiene un valor de $0,420 V$ vs $Ag/AgCl$ (elaboración propia). .....	42
Figura 16: Curva anódica, catódica y total con $0,018 M Fe(III)$ para calcopirita (elaboración propia). .....	43
Figura 17: Linealización de la curva catódica de reducción del ion férrico a ferroso sobre calcopirita (datos en ANEXO A.3.- Pág. 70).....	44
Figura 18: Curva anódica, catódica y total con $0,018 M Fe(III)$ (elaboración propia). .....	45
Figura 19: Linealización de la curva catódica de reducción del ion férrico a ferroso sobre pirita (datos en ANEXO A.4.- Pág. 73) .....	46
Figura 20: Efecto de las variables en la densidad de corriente limite (Fontana, 1987).....	47
Figura 21: Determinación de la velocidad de disolución de la calcopirita en una solución de ácido sulfúrico con $0,018 M$ de $Fe(III)$ (elaboración propia). .....	48

Figura 22: Determinación de la velocidad de disolución de la pirita en una solución de ácido sulfúrico con 0,018 M de Fe(III) (elaboración propia).....	49
Figura 23: Potencial mixto en función de la concentración de ion férrico en las siguientes condiciones: 1 M Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 0,037 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 298 K y 250 rpm (Holmes y Crundwell, 2000). .....	50
Figura 24: Diagrama de Evans del par galvánico calcopirita-pirita (elaboración propia)...	51
Figura 25: Curvas anódicas y catódicas del par galvánico pirita-calcopirita para diferentes razones de área pirita/calcopirita (elaboración propia).....	54
Figura 26: Potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita en función de la razón del área pirita/calcopirita (elaboración propia).....	55
Figura 27: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> ) de la calcopirita y pirita en función de la razón del área pirita/calcopirita (elaboración propia).....	55
Figura 28: Densidad de corriente y potencial mixto para la razón de área Py/Cpy citados en Majuste et al. (2012) frente a los obtenidos en la Figura 21 (elaboración propia). .....	56

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Potencial mixto (V vs SHE) del par galvánico calcopirita-pirita en una solución 0,1 M de $H_2SO_4$ y 0,01 M de ion Fe(III).....	20
Tabla 2: Semi-reacciones de disolución propuestas para la calcopirita. ....	25
Tabla 3: Semi-reacciones de disolución propuestas para la pirita. ....	25
Tabla 4: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización anódica de la calcopirita.....	40
Tabla 5: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización anódica de la pirita. ....	42
Tabla 6: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre calcopirita.....	44
Tabla 7: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre pirita. ....	46
Tabla 8: Potencial mixto y densidad de corriente del par galvánico pirita-calcopirita en función de la razón de área pirita/calcopirita. ....	54

## ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

$E_{MS}$	Potencial de reposo.
$E_{eq}$	Potencial de equilibrio.
$E_{mixto}$	Potencial mixto.
$G^0$	Energía Libre de Gibbs.
$e^-$	Electrones.
$\alpha_a$	Coeficiente de transferencia de carga anódico.
$\alpha_c$	Coeficiente de transferencia de carga catódico.
$C_b$	Concentración en el núcleo.
$C_s$	Concentración en la superficie.
CTC	Control por Transferencia de Carga.
CTM	Control por Transferencia de Masa.
CTMixto	Control por Transferencia Mixto.
D	Coeficiente de difusión.
$i_L$	Densidad de corriente límite.
$K^o$	Constante cinética.
MS	Mineral sulfurado.
SCE	Electrodo estándar de calomel del inglés Standard Calomel Electrode.
SHE	Electrodo estándar de hidrogeno del inglés Standard Hydrogen Electrode.
Ag/AgCl	Electrodo estándar de plata – Cloruro de plata.
V	Voltios.
$F$	Constante de Faraday.
$i$	Densidad de corriente.
$n$	Numero de electrones.
$\eta$	Sobre potencial.

## RESUMEN

El objetivo general de la presente investigación fue determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita a partir de sus reacciones elementales anódica y catódica, así mismo, los objetivos específicos fueron: obtener y realizar una caracterización cinética electroquímica de las curvas anódicas de la calcopirita-pirita y las curvas catódica de reducción del ion férrico sobre ambos sulfuros, determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita, y analizar el efecto de la razón de área pirita/calcopirita en el comportamiento del par galvánico. La metodología utilizada para obtener las curvas de polarización anódica de la calcopirita y pirita fue mediante un barrido de 0-700 mV vs Ag/AgCl, la caracterización y el análisis de los parámetros se realizó con la Ecuación de Tafel. Las curvas de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre la calcopirita y pirita, se obtuvo por diferencia de la curva anódica con la curva total obtenida por el potencióstato (barrido desde 700 mV hasta el potencial de reposo de cada sulfuro), la caracterización y análisis de los parámetros se realizó con la Ecuación de Tafel para la calcopirita y la Tafel modificada que incluye transferencia de masa para la pirita. Los resultados indican que la caracterización cinética electroquímica de la disolución anódica de calcopirita y pirita está controlada por transferencia de carga y se puede describir por la ecuación de Tafel. La corrientes de intercambio de esta reacción es del mismo orden de magnitud en ambos sulfuros,  $5,08 \times 10^{-8}$  y  $1,38 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> para calcopirita y pirita, respectivamente. La caracterización cinética electroquímica de la reducción de ion férrico sobre calcopirita está controlada por transferencia de carga y sobre pirita por transferencia de carga y masa, este último fenómeno estando asociado a la difusión de ion férrico. Sin embargo, la corriente de intercambio de la reducción de férrico sobre pirita es dos órdenes de magnitud mayor que para el caso sobre calcopirita,  $10^{-4}$  vs  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. El potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita para una razón de área de 1 fue de 0,57 V vs Ag/AgCl y  $8,634 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, respectivamente. El efecto de la variación de la razón de área pirita/área calcopirita en un rango de 0,1 hasta 4 en el potencial del par galvánico tuvo incremento desde 0,529 hasta 0,585 V vs Ag/AgCl y la densidad de corriente del par galvánico se incrementa de 3,7 hasta  $15,2 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. En conclusión, se establece que es posible determinar el potencial mixto del para galvánico calcopirita-pirita a partir de sus reacciones elementales anódica y catódica.

**Palabras claves:** Electroquímica; par galvánico; calcopirita; pirita; férrico.

## ABSTRACT

The general objective of the present investigation was to determine the mixed potential and the current density of the galvanic couple chalcopyrite-pyrite from the elementary and anodic and cathodic reactions. Likewise, the specific objectives were: obtain and perform an electrochemical kinetic characterization of the anodic curves of the chalcopyrite-pyrite and the curves of the ferric ion reduction on both sulphides, determine the mixed potential and the current density of the galvanic couple chalcopyrite-pyrite, and analyze the effect of the pyrite/chalcopyrite area ratio on the behavior of the galvanic couple. The methodology used to obtain the anodic polarization curves of chalcopyrite and pyrite was a sweep from 0 to 700 mV vs Ag/AgCl, The characterization and analysis of the parameters was done with the Tafel equation. The curves of cathodic polarization of reduction of ferric ion on chalcopyrite and pyrite, was obtained by difference of the anodic curve with the total curve obtained by the equipment (sweep in the negative direction from 700 mV to the resting potential of each sulfide), the characterization and analysis of the parameters was performed with the Tafel equation for chalcopyrite and the modified Tafel that includes mass transfer for pyrite. The results indicate that kinetic of anodic dissolution of chalcopyrite and pyrite is controlled by charge transfer and it can be described by the Tafel equation. The exchange currents of this reaction have the same order of magnitude for both sulfides:  $5.08 \times 10^{-8}$  and  $1.38 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> to chalcopyrite and pyrite, respectively. The kinetic of the reduction of ferric ion on chalcopyrite is controlled by charge transfer and on pyrite by charge and mass transfer, the last phenomenon being associated to the ferric ion diffusion. However, the exchange current of the ferric reduction on pyrite is two orders of magnitude higher than for the case on chalcopyrite,  $10^{-4}$  vs  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. The mixed potential and current density of the galvanic chalcopyrite-pyrite pair for an area ratio of 1 was 0.57 V vs. Ag / AgCl and  $8.634 \times 10^{-6}$  A / cm<sup>2</sup>, respectively. The effect of the variation of the ratio of pyrite area / chalcopyrite area in a range of 0.1 to 4 in the potential of the galvanic pair had increase from 0.529 to 0.585 V vs Ag / AgCl and the current density of the galvanic pair is increased from 3.7 to  $15.2 \times 10^{-6}$  A / cm<sup>2</sup>. In conclusion, it is established that it is possible to determine the mixed potential of galvanic chalcopyrite-pyrite from its elementary anodic and cathodic reactions.

**Key words:** Electrochemistry; galvanic couple; chalcopyrite; pyrite; ferric.

## I. INTRODUCCIÓN

La minería del cobre tiene como principal fuente la calcopirita, representando el 70 % de las reservas conocidas. Es un mineral sulfurado primario y altamente refractario que al disolverse en una solución ácida con presencia de iones férrico forma una capa superficial de azufre elemental, jarosita, polisulfuros y/o sulfuros ricos en metal, denominada "capa pasivadora" (Parker et al., 1981; Dutrizac, 1989; Hackl et al., 1995). Debido a ello, la disolución de la calcopirita se ve afectada por el limitado transporte de electrones y/o cationes a través de esta.

Se han desarrollado investigaciones referentes a la adición de catalizadores electroquímicamente más activos como: plata, pirita, carbón, entre otros (Miller et al., 1981; Dixon et al., 2008; Liang et al., 2010). En el caso de la pirita, al estar en contacto con la calcopirita actúa como zona catódica, facilitando la reducción del ion férrico a ferroso, mientras que la calcopirita actúa como zona anódica. De este modo, disminuye el efecto de la capa pasivante y mejora la velocidad de lixiviación de la calcopirita (Mehta and Murr, 1983; You et al., 2007; Majuste et al., 2012).

Dixon et al. (2008) realizaron estudios de lixiviación de cobre en concentrados de calcopirita a los que fueron agregados pirita, alcanzando una recuperación igual a 98% a 80°C bajo condiciones atmosféricas. Majuste et al. (2012) investigaron el efecto de la concentración del ion férrico (0,01-0,05 mol/L) y oxígeno disuelto (0,001 mol/L) sobre el potencial mixto en electrodos de calcopirita con inclusiones de pirita. Observaron que en presencia de ion férrico y oxígeno se tiene un incremento del potencial mixto de aproximadamente 55% en referencia al electrodo de calcopirita. La presencia de inclusiones de pirita incrementa el potencial mixto en función del porcentaje en la superficie de la calcopirita: para, 14, 31 y 42% de pirita, obtuvieron un incremento del 17, 21 y 26% respectivamente.

Sin embargo, no hay estudios que relacionen el efecto galvánico de la pirita con la cinética de las reacciones anódicas y catódicas fundamentales involucradas en el proceso. En consecuencia, en el presente trabajo se hizo un análisis cinético electroquímico independiente de las reacciones anódicas y catódicas de la calcopirita y pirita, en una solución de ácido sulfúrico con una concentración de 0,018M de ion férrico. A partir de ello, se determinó el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita y la velocidad de lixiviación de la calcopirita aplicando la teoría potencial mixto y los diagramas de Evans.

## 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el cálculo del potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico se usa la curva de densidad de corriente total dado por el Equipo Potenciostato. Donde, la corriente catódica es influenciada por la corriente anódica cuando se tiene potenciales cercanos al potencial mixto, esto ocasiona un error en el cálculo final.

Así mismo, para la determinación del potencial mixto y la densidad de corriente del para galvánico en función de la razón de área superficial calcopirita/pirita existe la dificultades de encontrar minerales de calcopirita con inclusiones de pirita de diferentes porcentajes de superficie, y determinar sus parámetros fundamentales de cada uno de ellos.

En función a ello, se pregunta: ¿Se podrá obtener y realizar su caracterización cinético electroquímico de las curvas netas anódica y catódica de la calcopirita y pirita, y a partir de estos calcular el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita?

### 1.1.1. Planteamiento de los problemas específicos

- ¿Mediante el uso de la voltametría lineal en una solución de ácido sulfúrico con electrodos de calcopirita y pirita se podrá obtener y caracterizar la curva anódica?
- ¿Mediante el uso de la voltametría lineal en una solución de ácido sulfúrico con iones férrico sobre electrodos de calcopirita y pirita se podrá obtener y caracterizar la curva catódica de reducción del ion férrico?
- ¿Aplicando la teoría del potencial mixto se posible determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita a partir de las reacciones elementales anódica y catódica de reducción del ion férrico?
- ¿Se podrá determinar la variación del potencial mixto y la densidad de corriente de la calcopirita en función de la razón de área superficial pirita/calcopirita?

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

### 1.1.1. Impactos en Ciencia y Tecnología

No hay estudios que relacionen el efecto galvánico de la pirita con la cinética de las reacciones anódicas y catódicas fundamentales involucradas en el proceso. En consecuencia, en el presente trabajo se hará un análisis cinético electroquímico independiente de las reacciones anódico-catódicas de la calcopirita y pirita, en una solución de ácido sulfúrico con una concentración de 0,018 M de ion férrico. A partir de ello, se determinará el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita y la velocidad de lixiviación de la calcopirita aplicando la teoría potencial mixto y los diagramas de Evans.

### 1.1.2. Impactos Económicos

Con este proyecto se pretende plantear una metodología para determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita realizando una mínima cantidad de pruebas, así mismo, determinar el efecto de razón de las áreas superficiales de la calcopirita/pirita sin la necesidad de tener electrodos de calcopirita con diferentes porcentajes de inclusión de pirita, lo cual disminuirá el número de experimentos y por ende, disminuirá los costos y el tiempo de investigación.

### 1.1.3. Impactos Ambientales

Los desechos químicos producidos por laboratorios químicos aun siendo en pequeña escala, son altamente tóxicos y fuentes potenciales dañinas para el medio ambiente. Por lo que, es importante reducir a lo más mínimo posible su uso.

Al optimizar el número de pruebas experimentales se genera menos residuos líquidos que podrían ser emitidos a los efluentes de la universidad. Así mismo, se tendrá menos gasto de materiales como: guantes de látex, respiradores, toallas desechables, lijar, residuos de mineral al ser pulidos y alúmina.

## 1.2. OBJETIVO GENERAL

Determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita a partir de sus reacciones elementales anódica y catódica.

### 1.2.1. Objetivos específicos

- Obtener las curvas de polarización y caracterizar los parámetros cinéticos electroquímicos de la disolución anódica de la calcopirita y pirita.
- Obtener las curvas de polarización y caracterizar los parámetros cinéticos electroquímicos de la reducción del ion férrico a ferroso en la superficie de la calcopirita y pirita.
- Determinar el potencial mixto del par galvánico calcopirita - pirita a partir de los parámetros cinéticos de las semireacciones fundamentales.
- Analizar la influencia de la razón área pirita/área calcopirita en el comportamiento del par galvánico.

## 1.3. HIPOTESIS GENERAL

Aplicando la teoría del potencial mixto a las curvas elementales anódicas y catódicas netas obtenidas se determinará el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita y la velocidad de lixiviación de la calcopirita.

### 1.3.1. Hipótesis específica

- Se obtendrá las curvas de polarización y se caracterizará los parámetros cinéticos electroquímicos anódicos netos de la calcopirita y pirita.
- Se obtendrá las curvas de polarización y se caracterizará los parámetros cinéticos electroquímicos catódicos netos de la reducción del ion férrico sobre la superficie de la calcopirita y pirita.
- A partir de los diagramas de Evans se podrá plantear una metodología para determinar el potencial mixto y densidad de corriente del par galvánico a partir de sus reacciones elementales de la calcopirita y pirita.
- Se determinará la variación de la densidad de corriente y el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita en función de la razón de área superficial de pirita/calcopirita.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. ANTECEDENTES

#### 2.1.1. Antecedentes Nacionales

Ibáñez y Velásquez (2013) determinaron el efecto de los parámetros y aditivos ( $\text{MnO}_2$  - iones de plata - pirita) en la cinética de disolución de la calcopirita mediante pruebas de disolución de concentrados de calcopirita, calcopirita natural en matraces y reactores agitados en solución de ácido clorhídrico a un pH 2,5 y un potencial en un rango de 540-630 mV (SHE). Donde, la velocidad de lixiviación se incrementó con la presencia de plata y pirita, el  $\text{MnO}_2$  tiene un efecto negativo en la disolución.

#### 2.1.2. Antecedentes Internacionales

Dutrizac y MacDonald (1973) investigaron el efecto de las impurezas en la velocidad de lixiviación de la calcopirita en una solución sulfato férrico, encontrando que, las mezclas de calcopirita-cubanita tiene el mismo comportamiento, la mezcla calcopirita-cubanita incremental ligeramente su velocidad de disolución, la presencia de pirita, molibdenita, y estibina aceleran la velocidad de disolución de la calcopirita, por otro lado, la galena retarda la disolución, la esfalerita la retarda ligeramente. Donde, concluyeron que estos resultados coinciden con la teoría del par galvánico.

Linge (1977) observó que la velocidad de lixiviación de concentrados calcopiríticos de diferentes regiones de Australia depende de su contenido de composición, la lixiviación de realizo en una solución de ácido nítrico con presencia de iones férrico en un rango de temperatura de 25 - 40°C. Donde, la presencia de pirita acelera la lixiviación de la calcopirita, pero la esfalerita y bismutita disminuye ligeramente.

Parker et al. (1981) investigaron la electroquímica de la lixiviación de la calcopirita, usaron cristales de calcopirita de alta pureza y con inclusiones de  $\text{FeS}_2$  y  $\text{Ag}_2\text{S}$ . Analizaron el efecto de la temperatura en un rango de 70 a 90°C y una región de potencial de 0,2-0,6 V Ag/AgCl. Utilizaron los siguientes agentes oxidantes 0,5 M  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{NaCuCl}_2$ ,  $\text{Br}_2$ ,  $\text{KI}$  y  $\text{KI}_3$  en varias combinaciones. Concluyeron que la velocidad de lixiviación se incrementa con la temperatura descomponiéndose la capa pasivadora, los agentes oxidantes  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{I}_2$  y  $\text{Br}_2$  incrementan en mayor proporción la velocidad de lixiviación en presencia de ion Férrico en una solución con ácido clorhídrico, las inclusiones de  $\text{FeS}_2$  y  $\text{Ag}_2\text{S}$  en contacto con la calcopirita actúan como zona catódica, facilitando el transporte de electrones.

Mentha y Murr (1983) estudiaron la contribución de la interacción galvánica en la lixiviación bacteriana de dos sulfuros, calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), pirita ( $\text{FeS}_2$ ) y esfalerita ( $\text{ZnS}$ ). Las curvas de polarización se realizaron en ácido sulfúrico 1 M y un medio Bryner y Anderson en electrodos cúbicos unidos por pintura de plata. El potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita en ácido sulfúrico fue 0,56 V vs SHE y en el medio Bryner y Anderson obtuvieron un valor de 0,28 V vs SHE. La densidad de corriente tuvo un valor de  $5 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ . Por otro lado, estudiaron la lixiviación de los pares galvánicos calcopirita-pirita, esfalerita-pirita y calcopirita-esfalerita-pirita en muestras en polvo de los sulfuros, a una malla -200 en presencia de las bacterias *T. ferrooxidans* encontrando que la mejor disolución de la calcopirita fue en presencia de pirita (calcopirita-pirita).

Hackl et al. (1995) investigaron la pasivación de la calcopirita en la lixiviación oxidativa en un medio de ácido sulfúrico en un rango de temperatura de 110-220 °C. Encontraron que existe la formación de una capa rica en cobre ( $< 1 \mu\text{m}$ ). Esta capa es definida como polisulfuro de cobre,  $\text{CuSn}$ , donde  $n > 2$ .

Tshilombo et al. (2002) investigaron la influencia del potencial aplicado y la temperatura en la electroquímica de la lixiviación bacteriana de la calcopirita. Caracterizaron la curva anódica de la calcopirita en un rango de 0,45-0,65 V vs electrodo saturado de calome (SCE) a 25°C, por otro lado, encontraron que la caracterización catódica de reducción del ion férrico sobre la calcopirita inhibe el proceso de lixiviación. Así mismo, verificaron que en un rango de temperatura de 45 a 65 °C la etapa de pasivación de la calcopirita es nula.

Tshilombo (2004) determino el mecanismo y la cinética de la pasivación de la calcopirita durante una lixiviación férrica y en solución microbiana. Las condiciones experimentales fueron; temperaturas bajas (25°C) y bajos potenciales (0,45 a 0,60 V vs SCE), altas temperaturas (65°C) y altos potenciales (alrededor de 0,6 V vs SCE). Sus resultados mostraron que existe la formación de una capa pasivadora a bajas temperaturas y un rango de potencial de 0,45 – 0,6 V, esta capa pasivadora inhibe la reducción del ion férrico sobre la superficie de la calcopirita. La estabilidad de la capa pasivadora depende de la temperatura y el potencial aplicado. Por otro lado, propuso que en la lixiviación de la calcopirita en presencia de pirita las semireacciones anódica y catódica se llevan a cabo en ambas superficies de los minerales, de acuerdo a la Figura 1. Se tiene la oxidación de ambos minerales y la reducción del ion  $\text{Fe(III)}$ .

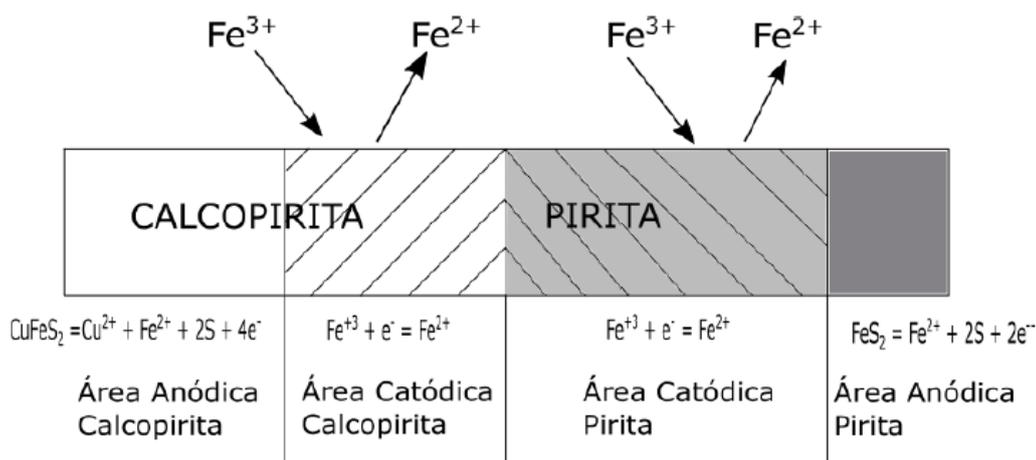


Figura 1: Esquema representativo de la interacción del par galvánico entre calcopirita y pirita propuesto por Tshilombo (2004).

You et al. (2007) determinaron el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico en un electrodo de calcopirita-pirita unido por un cable de cobre en una solución de ácido sulfúrico (pH 5–7) con diferentes concentraciones de ion Fe(III), en un sistema de flujo continuo. Encontraron que, el proceso del par galvánico se divide en dos etapas, una anódica que está representado por la oxidación de la calcopirita y una catódica donde ocurre la reducción del uno férrico sobre la pirita. Además, observaron que el incremento de la concentración de ion férrico, incremento de la acidez y el incremento del flujo de la solución la densidad de corriente se incrementa y el potencial del par galvánico se hace más positivo. Así mismo, modelaron estas curvas con la ecuación de Butler-Volmer.

Dixon et al. (2008) propusieron el patente GALVANOX™, el cual consiste en adicionar pirita a los concentrados de calcopirita antes de su lixiviación. Obtuvieron una extracción de cobre del 98% a una temperatura de 80°C a condiciones atmosféricas en un tiempo de residencia de 4 horas. El proceso fue selectivo para la calcopirita sobre la pirita generando altos contenidos de azufre, esta solución fue procesada por extracción de solvente y posteriormente por electrodeposición.

Nasari et al. (2011) estudiaron el efecto catalizador de la pirita en el proceso GALVANOX™ en una solución de sulfato férrico a temperatura ambiental, encontrando que el efecto catalizador de la pirita dependía de la región de origen. Propusieron un pre tratamiento de la pirita con plata, como resultado la velocidad de lixiviación de la calcopirita se incrementó drásticamente, la cantidad de plata fue de 50 ppm por tonelada de pirita.

Koleini et al. (2011) lixiviaron concentrados de calcopirita en presencia de pirita en una solución de ácido sulfúrico. Añadieron minerales de sulfurados de cobre y pirita con el

fin de formar los pares galvánicos. Analizaron los parámetros de: potencial redox, temperatura, concentración inicial de ácido, contenidos de sólidos, concentración inicial de hierro y piritita y el ratio de piritita/calcopiritita. La recuperación fue mayor al 80% en 24 horas donde el potencial redox fue 420 mV vs Ag/AgCl, la temperatura de 85°C, 15 g/L de concentración de ácido inicial, un contenido de sólidos de 7,8%. El residuo de la lixiviación presenta una capa pasivadora de jarocita y de sulfuro elemental.

Majuste et al. (2012) determinaron el potencial mixto y la densidad de corriente en electrodos de calcopiritita con inclusiones de piritita de diferente porcentaje de área superficial (Tabla 1), en una solución de ácido sulfúrico (pH 1,2) con diferentes concentraciones de ion férrico y oxígeno. El potencial mixto y la densidad de corriente se incrementan en función del porcentaje de área superficial de la piritita.

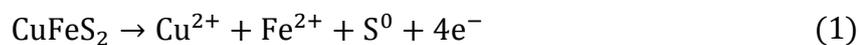
Tabla 1: Potencial mixto (V vs SHE) del par galvánico calcopiritita-piritita en una solución 0,1 M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y 0,01 M de ion Fe(III).

Electrodo (% de área)	Temperatura °C	Potencial mixto (V vs SHE)	Densidad de corriente (μA/cm <sup>2</sup> )
Calcopiritita (100 %)	26	0,63±0,01	8,00±0,88
Calcopiritita (76 %) piritita (14 %)	26	0,71±0,01	11,19±1,25
Calcopiritita (58 %) piritita (42 %)	26	0,72±0,01	12,74±1,24
Calcopiritita (69 %) piritita (31 %)	26	0,74±0,01	16,73±1,46
Piritita (100 %)	26	0,78±0,01	

Fuente: Majuste et al., 2012

Del mismo modo, las investigaciones realizadas por: You et al. (2007), Dixon et al. (2008) y Majuste et al. (2012), asumieron que la reacción anódica de oxidación se realiza en la superficie de la calcopiritita y la reacción catódica de reducción del ion Fe(III) en la superficie de la piritita (catódica), de acuerdo a las siguientes reacciones:

Reacciones anódicas:



Reacciones catódicas:



Nicol et al. (2013) determinaron la cinética electroquímica de disolución de la piritita en base al modelo de potencial mixto en función de la composición de sulfatos y la

temperatura de la solución, así mismo, determinaron la velocidad de disolución de la pirita a partir de la lixiviación de este sulfuro en solución de ácido sulfúrico con diferentes concentración de sulfato y variando la temperatura. Encontraron que el potencial mixto para la lixiviación de polvo de pirita fue mayor que la obtenida por métodos electroquímicos, los valores fueron de 0,85 V y 0,8 V, respectivamente. Donde, la concentración de sulfato disminuye la velocidad de lixiviación de la pirita, por otro lado, la temperatura lo incrementa.

Sun et al. (2015) investigaron el efecto de la temperatura en la cinética de oxidación de la pirita bajo un potencial controlado usando 15%  $H_2O_2$ . Los experimentos los realizaron en una celda enchaquetada con baño maría para control de temperatura de 30, 45, 60 y 75 °C en un volumen de 400 ml, usaron 4 gramos de muestra de pirita, el pH fue ajustado con ácido sulfúrico 98%, el potencial redox inicial fue de 700, 800 y 900 mV vs Ag/AgCl y una velocidad de agitación de 340 rpm. Obtuvieron una extracción del 92% con un potencial de 900 mV vs Ag/AgCl a una temperatura de 75°C y 4 horas.

## 2.2. MARCO TEÓRICO

### 2.2.1. Características de los minerales

#### Calcopirita

La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ), es un mineral sulfurado primario que representa el 70% de las reservas de cobre en el mundo. Tiene una densidad de  $4,09 \text{ g/cm}^3$  y una dureza de 3,5-4,0 en la escala de Mohs (Dana and Hurlbut, 1987).

Posee una estructura tetragonal (Figura 2), donde los átomos metálicos y de azufre están unidos a la red cristalina por fuertes enlaces covalentes (Donnay et al., 1958).

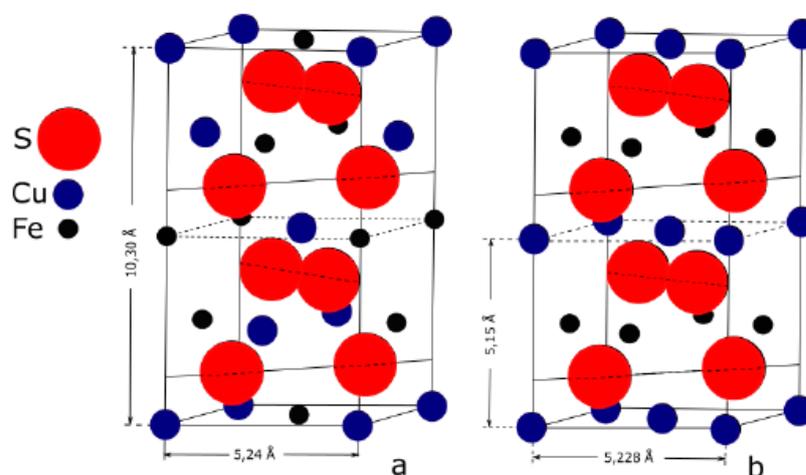


Figura 2: Estructura de la calcopirita: a) de acuerdo a Pauling and Brockway (1932) y b) de acuerdo a Burdick and Ellis (1917).

#### Pirita

La pirita ( $\text{FeS}_2$ ), es un mineral sulfurado de hierro, presente mayormente como ganga en la reserva de minerales de cobre (Holmes and Crundwell, 2000). Tiene una densidad de  $4,9-5,2 \text{ g/cm}^3$  y una dureza de 6-6,5 en la escala de Mohs (Dana and Hurlbut, 1987).

Posee una estructura cúbica, piritoedro y octaedro (Figura 3), donde su estructura electrónica está determinada por enlaces hierro-azufre y azufre-azufre y la interacción metal-metal carece de importancia (Dana and Hurlbut, 1987).

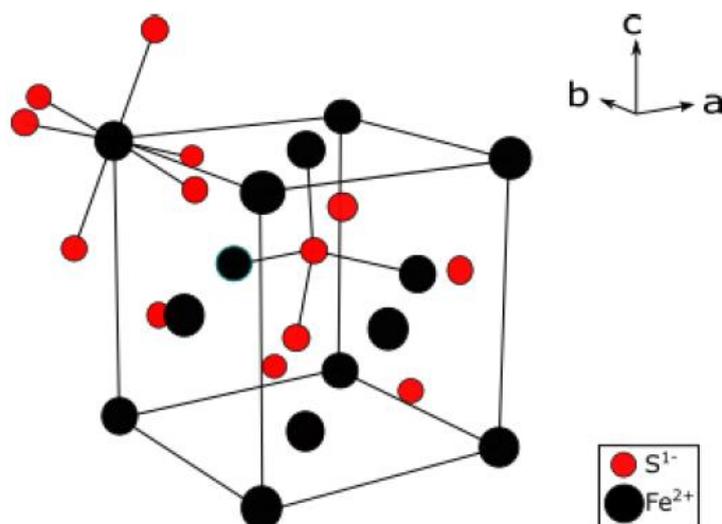


Figura 3: Estructura cristalina de la pirita con coordinación octaédrica y tetraédrica (Wu et al., 2004).

### 2.2.2. Mecanismos de reacción

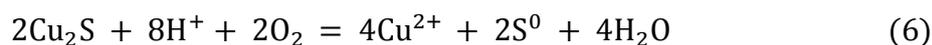
Se han propuesto diferentes modelos de reacción química de la calcopirita y pirita en medio de una solución de ácido sulfúrico, usando diferentes agentes oxidantes, como: peróxido de oxígeno, oxígeno, ion férrico, ion cúprico entre otros. Los estudios se han efectuado bajo diferentes condiciones de temperatura, presión, agitación y tamaño de partícula.

#### Reacción de la calcopirita

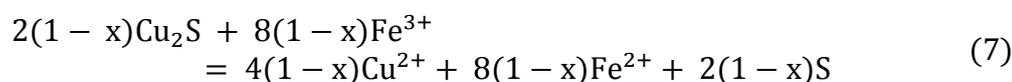
La siguiente estequiometría de reacción de la calcopirita, Reacción (5), fue propuesta por Dutrizac en el año 1969, donde determinó un radio molar  $S^0/Cu^{2+}$  de  $\sim 2$  al lixiviar calcopirita sintética a una temperatura de  $80^\circ C$ . Esta reacción también fue confirmada por Linge (1977) y Muñoz et al. (1979).



En la segunda etapa, la calcosina formada es oxidada por el oxígeno disuelto y/o ion férrico para producir iones cúpricos, según la Reacción (6) y (7):



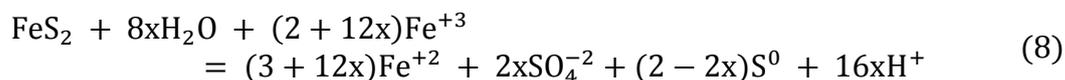
y/o:



donde  $x$  es el relación molar de  $Cu_2O$  oxidado por oxígeno disuelto del total  $Cu_2O$ .

### Reacción de la pirita

El mecanismo de reacción de la pirita con iones férrico como agente oxidante está dado por la Reacción (8). Se tiene la oxidación del azufre y la reducción del ion férrico, también existe la formación de sulfato y protones, los cuales dependen del potencial aplicado.



donde x es la cantidad de sulfato formado.

En este sentido, la oxidación de la pirita es fuertemente dependiente del potencial y la temperatura. Sun et al. (2015) determinaron un porcentaje de extracción de 1,84% en 151 horas a una temperatura de 30°C y un potencial de 0,700 V vs Ag/AgCl. Por otro lado, alcanzaron una extracción de 92% en 40 horas a 70°C y un potencial de 0,900 V vs Ag/AgCl. Resultados similares fue obtenido por Tshilombo (2004) con una extracción de 3% en 24 horas a 65°C y un potencial de 0,597 V vs Ag/AgCl.

Sin embargo, la oxidación de la pirita se ve afectado por la presencia de iones ferroso,  $\text{H}^+$  (Holmes and Crundwell, 2000) y la concentración de iones sulfato (Nicol et al., 2013) los cuales decrecen el potencial mixto.

#### 2.2.3. Diagramas de Eh – pH.

La termodinámica de sistemas acuosos se puede representar mediante los diagramas Eh – pH, también llamados Diagramas de Pourbaix. Estos diagramas permiten visualizar zonas de solubilidad/estabilidad de las especies presentes en los sistemas de lixiviación analizados, permitiendo así predecir su comportamiento bajo diferentes escenarios (Burkin, 2001). A partir de las Figura 4 y Figura 5, es posible determinar las condiciones termodinámicas de disolución de la calcopirita y pirita, y la formación de posibles compuestos.

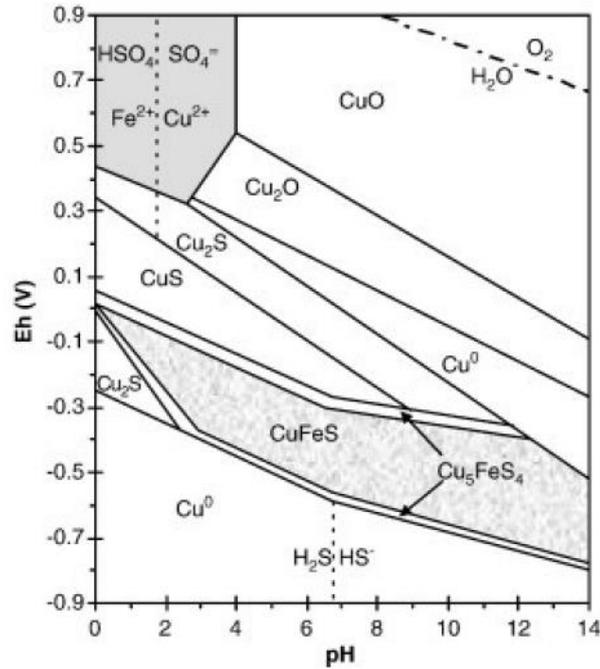


Figura 4: Diagrama Eh-pH de la  $CuFeS_2-H_2O$  en la región ácida a  $25^\circ C$  (citado en Córdoba et al. (2008) de Garrels y Christ (1965))

En la Tabla 2 se muestran diferentes semireacciones de oxidación de la calcopirita con sus valores de  $E^\circ$  para las reacciones que involucran intercambio de electrones y en la Tabla 3 se muestra las semireacciones de oxidación de la pirita. Cabe destacar que solo se consideraron algunas reacciones por la disponibilidad de valores termodinámicos de los compuestos (se excluyen los polisulfuros debido a la carencia de los valores de  $G^0$ ).

Tabla 2: Semi-reacciones de disolución propuestas para la calcopirita.

N°	Reacción	$E^\circ$ vs EHE (V)
1	$CuS + Fe^{2+} + S^0 + 2e^- \leftrightarrow CuFeS_2$	0,237
2	$Cu^{2+} + Fe^{2+} + 2S^0 + 4e^- \leftrightarrow CuFeS_2$	0,427
3	$Cu^{2+} + Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ + 16e^- \leftrightarrow CuFeS_2 + 8H_2O$	0,368

Fuente: Fontana, 1987.

Tabla 3: Semi-reacciones de disolución propuestas para la pirita.

N°	Reacción	$E^\circ$ vs EHE (V)
1	$FeS_2 \leftrightarrow Fe(II) + 2S + 2e^-$	-0,255
2	$2Fe(II) + 2e^- \leftrightarrow 2Fe(II)$	-0.055

Fuente: Fontana, 1987.

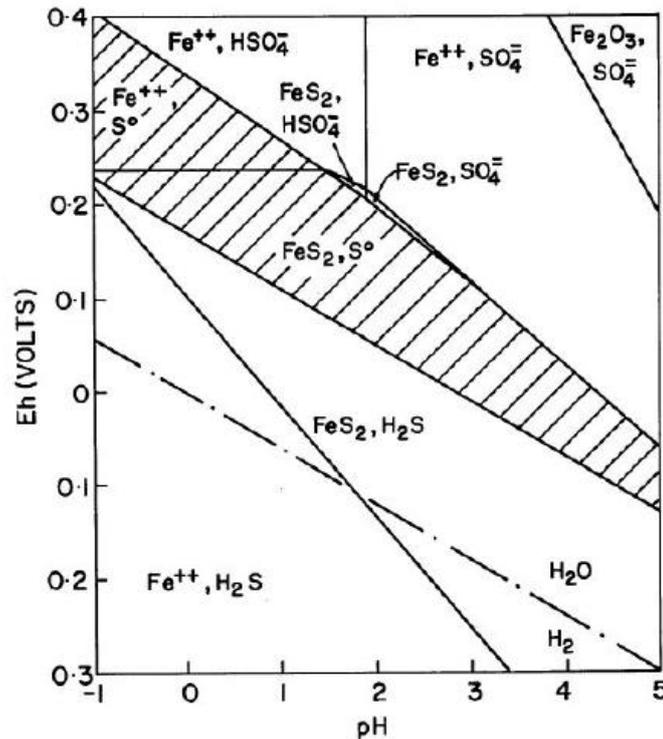


Figura 5: Diagrama Eh-pH de la Fe - S - H<sub>2</sub>O en un sistema a 25°C y  $a_{Fe^{++}} = 10^{-6}M/L$  (Majima, 1969)

**2.2.4. Fundamentos de cinética electroquímica**

La cinética electroquímica estudia la velocidad de reacción de electroquímica, cuando se alcanza el equilibrio, en este punto se alcanza el potencial mixto, potencial donde inicia la reacción química, y la densidad de corriente necesario para iniciar la lixiviación. En la electroquímica la velocidad de lixiviación se expresa en términos de densidad de corriente (i) en amperios por área del electrodo (Bard y Faulkner, 2001).

La velocidad de lixiviación es proporcional a la densidad de corriente, de acuerdo a la siguiente Ecuación:

$$v = \frac{i}{nFA} \tag{9}$$

donde *v* es la velocidad de lixiviación, *i*, en la densidad de corriente, *n*, numero de electrones, *F*, constante de Faraday, *A*, es el área superficial del electrodo.

**2.2.5. La ecuación de corriente –potencial**

La Ecuación de Butler-Volmer, es decir:

$$i = nFAK^0 [C_0(0, t)e^{-\alpha n f (E-E^0)} - C_R(0, t)e^{(1-\alpha) n f (E-E^0)}] \tag{10}$$

donde  $i$ , es la corriente,  $n$ , numero de electrones,  $F$ , constante de Faraday,  $A$ , área superficial,  $K^\circ$ , constante cinética,  $C_0(0, t)$ , concentración inicial,  $\alpha$ , coeficiente de transferencia de carga,  $f$ , constante,  $E$ , potencial aplicado,  $E^0$ , potencial de reposo,  $C_R(0, t)$ , concentración final.

Es la relación matemática que nos permite modelar los datos experimentales obtenido por el equipo potenciostato, donde, se diferencia dos segmentos, el primero termino por la rama catódica que es la zona donde ocurre la reacción de reducción de agente oxidante y la segundo término por la rama anódica donde ocurre la oxidación de electrodo.

En las curvas de polarización se puede identificar el tipo de control que presenta la reacción electroquímica como; control por transferencia de carga (CTC), control por transferencia de masa (CTM) o un control mixto ( $CT_{\text{Mixto}}$ ). A continuación desarrollaremos cada uno y sus ecuaciones.

### 2.2.6. Control por transferencia de carga (CTC).

Cuando la transferencia de carga es mucho mayor que la transferencia de masa, se asume la unidad en las concentraciones quedando la Ecuación 11. Los parámetros principales que definen la reacción electroquímica que se encuentra bajo este régimen de control son la densidad de corriente de intercambio ( $i_0$ ) y el coeficiente de transferencia ( $\alpha$ ) (Fontana, 1987).

$$i = i_0 \left[ e^{\frac{-\alpha n F (E - E^0)}{RT}} - e^{\frac{(1-\alpha) n F (E - E^0)}{RT}} \right] \quad (11)$$

donde  $i$ , es la corriente,  $i_0$ , es la corriente de intercambio,  $n$ , numero de electrones,  $F$ , constante de Faraday,  $A$ , área superficial,  $R$ , constante,  $T$ , es la temperatura,  $\alpha$ , coeficiente de transferencia de carga,  $F$ , constante de Faraday,  $E$ , potencial aplicado,  $E^0$  potencial de reposo.

### Aproximación de campo alto.

Con el fin de simplificar la Ecuación 12 por control de transferencia de carga y hacer un análisis individual de la zona catódica o anódica, cuando se analiza sobre potenciales elevados las Ecuaciones son:

$$i = i_0 \left[ e^{\frac{-\alpha n F (E - E^0)}{RT}} \right] \quad (12)$$

$$i = i_0 \left[ e^{\frac{(1-\alpha)nF(E-E^0)}{RT}} \right] \quad (13)$$

### Aproximación de campo bajo.

Para potenciales bajos, es decir, cercanos al potencial mixto, las Ecuaciones 12 y 13 cambian a:

$$i = i_0 \left[ e^{\frac{nF(E-E^0)}{RT}} \right] \quad (14)$$

$$R_{tc} = \frac{RT}{nFi_0} \quad (15)$$

### 2.2.7. Control por transferencia de masa (CTM).

Cuando la reacción electroquímica en la superficie del electrodo es muy rápida, el control pasa a ser del transporte del reactivo del centro de la solución a la superficie del electrodo, es decir, el control está en función de la densidad de corriente depende de la difusión de materia hacia o desde la superficie del electrodo (Fontana, 1987). Esto se describe por la Ecuación (16).

$$i = nFD \left( \frac{C_b - C_s}{\delta} \right) \quad (16)$$

donde  $n$ , es el número de electrones,  $F$ , constante de Faraday,  $D$ , coeficiente de difusión,  $C_b$ , concentración en el núcleo,  $C_s$ , concentración en la superficie,  $\delta$ , espesor de la capa en la superficie.

Cuando la concentración en la superficie llega a cero, la densidad de corriente alcanza su valor límite ( $i_L$ ), donde, al incrementar el voltaje la densidad no cambiara.

### 2.2.8. Control mixto (CM).

La reacción electroquímica está controlado por control mixto cuando está controlado por la transferencia de carga y la transferencia de masa, los parámetros más importantes son: densidad de corriente limite ( $i_L$ ), densidad de corriente de intercambio ( $i_0$ ), y el coeficiente de transferencia de carga ( $\alpha$ ). Está representada por la Ecuación (17).

$$i = i_0 \left[ \left( 1 - \frac{i}{i_{L,C}} \right) e^{\frac{-\alpha nF(E-E^0)}{RT}} - \left( 1 - \frac{i}{i_{L,A}} \right) e^{\frac{-\alpha(1-n)F(E-E^0)}{RT}} \right] \quad (17)$$

donde  $i_{L,C}$  es la densidad de corriente limite catódico,  $i_{L,A}$ , es la densidad de corriente limite anódica.

### Aproximación de campo alto.

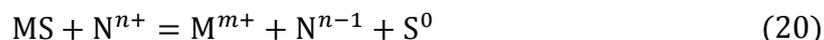
De igual manera que la transferencia de carga, para potenciales elevados, es posible estudiar de manera independiente las ramas anódica y catódica. De acuerdo a las Ecuaciones:

$$i = i_0 \left( 1 - \frac{i}{i_{L,C}} \right) e^{\frac{-\alpha n F (E - E^0)}{RT}} \quad (18)$$

$$i = -i_0 \left( 1 - \frac{i}{i_{L,A}} \right) e^{\frac{-\alpha (1-n) F (E - E^0)}{RT}} \quad (19)$$

### 2.2.9. Teoría del potencial mixto

La teoría del potencial mixto en procesos electroquímicos se lleva a cabo en dos diferentes superficies del mineral, denominados anódica y catódica, donde, existe un equilibrio de cargas, es decir la corriente anódica es igual a catódica (Fontana, 1987). La disolución de un mineral sulfurado (MS) está determinado principalmente por la siguiente Reacción (20):



donde MS es el mineral sulfurado,  $N^{n+}$  agente oxidante,  $M^{m+}$  ion metálico,  $N^{n-1}$  agente oxidante reducido y  $S^0$  es el azufre elemental.

Para el estudio electroquímico la reacción (20) se puede representar en función de sus semi reacciones anódica (21) y catódica (22):



En la Figura 6 se representa las curvas de polarización catódica y anódica de la reacción (9), donde  $E_{MS}$  corresponde al potencial de reposo del mineral sulfurado y el  $E_N$  corresponde al potencial de Nernst del agente oxidante. El potencial mixto o de corrosión,  $E_{MIXTO}$ , representa el potencial en el cual la corriente catódica y anódica son iguales.

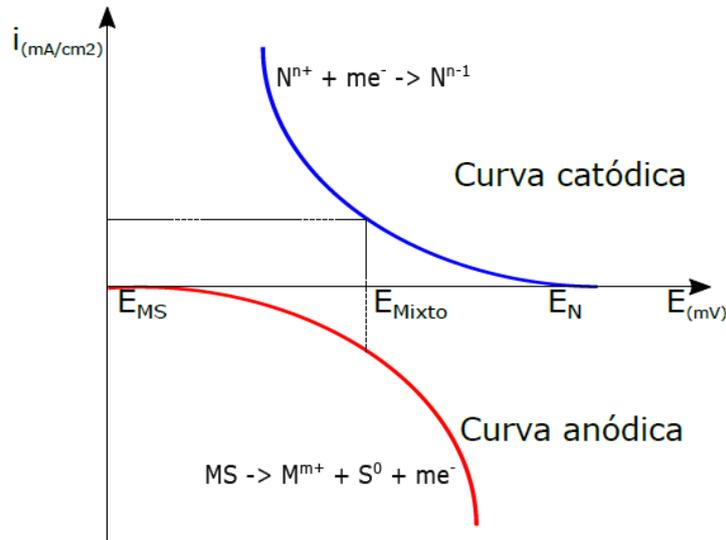


Figura 6: Teoría del potencial mixto para un mineral sulfurado (MS) (elaboración propia).

Para el caso que exista dos minerales y un agente oxidante debe existir una igualdad entre la corriente total de oxidación ( $i_{\text{anódica}}$ ) con la corriente total de reducción ( $i_{\text{catódica}}$ ), por lo tanto:

$$\sum \frac{i_{\text{anódico}}}{i_{\text{anódico}}} = \sum \frac{i_{\text{catódico}}}{i_{\text{catódico}}} \quad (23)$$

En la Ecuación (24) y (25), se asumió un área anódica ( $A_{\text{anódica}}$ ) y catódica ( $A_{\text{catódica}}$ ) iguales, se puede interpretar en función de la corriente de ambos minerales, quedando de la siguiente forma:

$$i_{\text{anódico}} = i_{\text{anódico-calcopirita}} + i_{\text{anódico-pirita}} \quad (24)$$

$$i_{\text{catódico}} = i_{\text{catódico-calcopirita}} + i_{\text{catódico-pirita}} \quad (25)$$

donde  $i_{\text{anódico-calcopirita}}$  y  $i_{\text{anódico-pirita}}$  son la corriente anódica de la calcopirita y pirita. Así mismo,  $i_{\text{catódico-calcopirita}}$  y  $i_{\text{catódico-pirita}}$  son la corriente catódica de la calcopirita y pirita.

### 2.2.10. Teoría del par galvánico

En la Figura 7 se muestra la velocidad de corrosión de dos metales corrosibles separados y posteriormente cuando forman un par galvánico, el par galvánico se forma por la intersección de la sumatoria de las corrientes anódicas del M y N, con la sumatoria de la corriente catódica de reducción agente oxidante sobre el M y N. A partir de este punto si trazamos una recta horizontal tendremos el potencial mixto del par galvánico y al trazar una recta vertical obtendremos el valor de la densidad de corriente.

El metal M es relativamente más noble el cual presenta una menor velocidad de corrosión ( $i_{corr(M)}$ ) que el metal N el cual presenta una mayor velocidad de corrosión ( $i_{corr(N)}$ ). En la Figura 7, la velocidad de corrosión del metal M ( $i_{corr(M-N)}$ ) disminuye y la velocidad de corrosión del metal N ( $i_{corr(M-N)}$ ) se incrementa al acoplarse (Fontana, 1987).

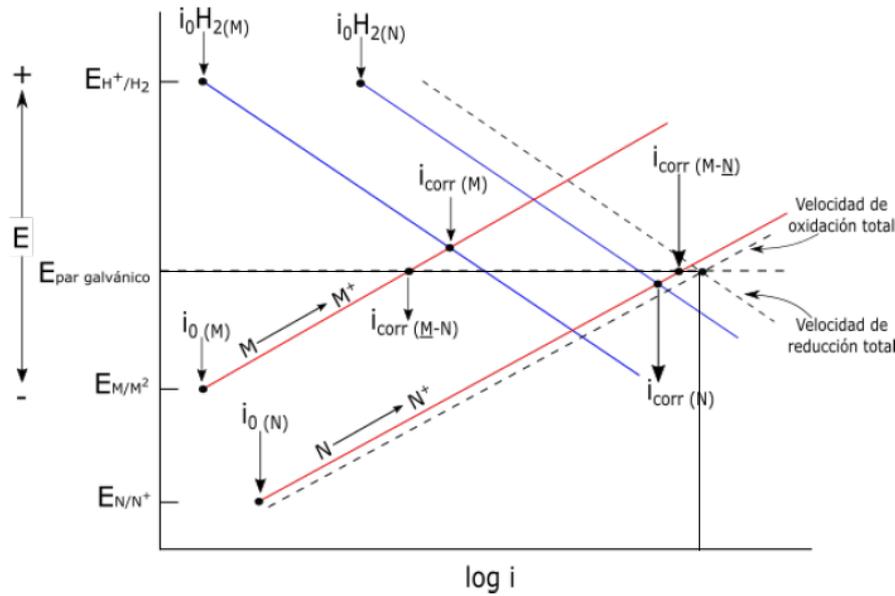


Figura 7: Curvas de polarización para dos metales en un par galvánico (Fontana, 1987).

El esquema de la Figura 7 se puede aplicar directamente al caso del par galvánico calcopirita-pirita, como se explica más adelante.

**2.2.11. Efecto de la razón área catódica/anódica en el par galvánico**

La razón de área catódico/anódico, es un factor importante en la corrosión galvánica. Fontana (1987) considero que la corriente catódica sobre platino fue directamente proporcional al área superficial de 1 a 10 cm<sup>2</sup>. Por otro lado, Tshilombo (2004) estudio el efecto de la razón de área pirita/calcopirita en la extracción de cobre en concentrados de calcopirita y pirita, observando un incremento en la extracción de cobre cuando la razón pirita/calcopirita aumenta de 0-8, lo que implica un aumento del área superficial de la pirita.

En la Figura 8 se muestra el diagrama de Evans del para galvánico zinc-platino, donde, para un tamaño de electrodo anódico de zinc y catódico de zinc de 1 cm<sup>2</sup> son expuestos a una solución acida alcanza una densidad de corriente  $i_A$ , ahora, cuando se tiene un cátodo de platino de 1 cm<sup>2</sup> la densidad de corriente alcanzado es de  $i_B$ , si incrementamos este área superficial de cátodo de platino a 10 cm<sup>2</sup> se observa un incremento proporcional de la densidad de corriente catódica de 10 veces  $i_B$  ( $i_C$ ), de este modo, se establece que en

reacciones anódicas y catódicas elementales, la variación de la densidad de corriente es proporcional al área superficial anódica o catódica del electrodo (Fontana, 1987)

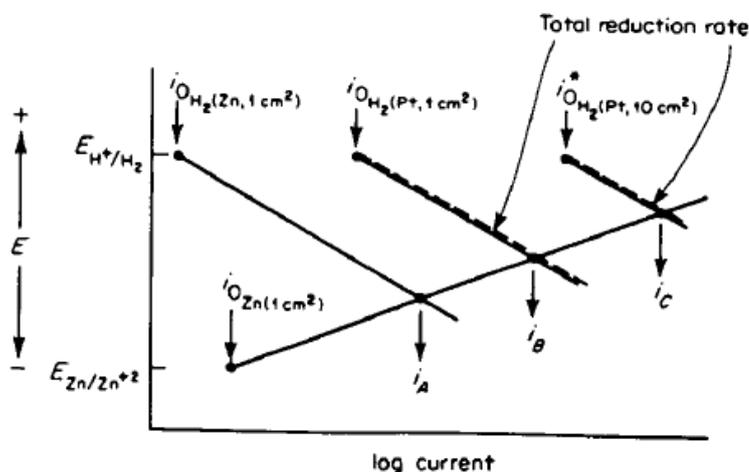


Figura 8: Efecto de la razón de área catódico en la corrosión del para galvánico zinc-platino (Fontana 1987).

## 2.2.12. Pasivación superficial

### Calcopirita

La disolución de la calcopirita está limitada por la formación de diversas capas que cubren la superficie del mineral, limitando el contacto del agente oxidante y alcanzando un punto de pasivación. Warren et al. (1982) estudiaron la pasivación y transpasivación de la calcopirita a partir de muestras obtenidas de diferentes localidades en solución de ácido sulfúrico 1 M, donde, encontraron diferencias significativas de comportamiento debido a las impurezas. Sin embargo, todos mostraron una región de pasivación típica.

Muñoz et al. (1979) y Dutrizac (1989) determinaron que la capa pasivante estaba compuesta por una capa de azufre elemental que cubre la superficie del mineral limitando el transporte de electrones. Dutrizac (1989) determinó partículas de azufre de  $\sim 2 \mu\text{m}$  de tamaño y glóbulos mayores a  $20 \mu\text{m}$  de  $\text{S}^0$  al lixiviar calcopirita en solución ácido sulfúrico (0,3 M) y con sulfato férrico (0,3 M) como agente oxidante en partículas de - 14 a + 29  $\mu\text{m}$  durante 17 horas a  $90^\circ\text{C}$ . También determinó que el porcentaje de formación de azufre elemental es próximo a  $\sim 94\%$  y sulfato  $\sim 6\%$ . Esta relación es independiente del tiempo de lixiviación (0-70 horas y una extracción de cobre  $>90\%$ ), donde, las proporciones de azufre elemental y sulfato son independientes del tamaño de partícula a  $<37 \text{ nm}$  y concentraciones de sulfato férrico en un rango de 0-2 M.

Warren et al. (1982) encontraron que la pasivación de la calcopirita se debe a la formación de dos subproductos: primero,  $S_1$ , el cual se descompone formando un segundo,  $S_2$ . Propusieron que estos serían bornita y covelina, respectivamente.

Hackl et al. (1995) estudiaron la cinética de lixiviación de la calcopirita bajo presión de oxígeno en un rango de temperaturas de 110-220°C. Donde, sugirieron la formación de una capa pasivadora que cubre la superficie con un espesor menor a 1  $\mu\text{m}$  la cual es rica en cobre y está compuesto por polisulfuros de cobre,  $\text{CuS}_n$  donde  $n > 2$ . También definen que la capa pasivadora se descompone pero a una velocidad mucho más lenta que la calcopirita, alcanzando un espesor con un estado estacionario y el cual controla la velocidad de reacción. Tshilombo et al. (2002) determinaron que en la lixiviación de la calcopirita, el Cu es disuelto preferentemente a potenciales bajos y elevadas temperaturas, obteniendo una razón de 3:2 de cobre:hierro en la solución.

### **Pirita**

Holmes and Crundwell (2000) estudiaron la lixiviación de pirita en una solución de sulfato férrico con 9 g/L de hierro total con un pH de 1,6 a una temperatura de 35°C y un potencial de 650 mV (vs SCE) durante 14 días. Al término de la etapa de lixiviación de la pirita encontraron que la superficie estaba cubierta por polisulfuros, donde, el espesor es directamente proporcional al tiempo de lixiviación y el potencial.

Por otro lado, Blight et al. (2000) propusieron un modelo cualitativo de la bio-oxidación de la pirita en función de un análisis de la superficie. Expusieron la pirita a una solución de cultivo mixto de bacterias litotrofas *Thiobacillus ferrooxidans* y se compararon con otras soluciones no inoculadas de ácido sulfúrico o sulfato ferroso y férrico disuelto en ácido sulfúrico con las mismas condiciones, obtuvieron una fase oxidada con precipitación de jarosita de un espesor de 4  $\mu\text{m}$  para la solución inoculada y 0,2  $\mu\text{m}$  para la solución de ácido sulfúrico con iones férrico. Ambos experimentos fueron analizados después de 8 días de bio-oxidación a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Lugar de experimentación

El desarrollo experimental del presente trabajo de investigación fue realizado en los laboratorios Electrometalurgia/Hidrometalurgia de la carrera de Ingeniería Civil Química de la Facultad de Ciencias Físico matemáticas de Universidad de Chile en la ciudad de Santiago de Chile – Chile, las coordenadas geográficas de Santiago de Chile son latitud: -33,457°, longitud: -70,648°, y elevación: 552 msnm.

#### 3.2. Preparación de materiales

##### 3.2.1. Preparación y análisis de los electrodos

Se usaron electrodos de calcopirita y pirita proporcionados por el laboratorio Hidrometalurgia/Electrometalurgia de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad de Chile, los cuales fueron cortados usando el equipo de corte con disco de diamante. Estos fueron montados a un cilindro de bronce y unidos con pintura de plata, luego se colocaron en un molde y se agregó resina epoxica "Epoxicure" para formar el electrodo. Posteriormente, la superficie fue pulida de forma manual con papel lija número 500, 1000, 1500, 2000, 2500 y en la pulidora AROTEC (modelo APL-4) con alúmina de 1 y 0,05 micrón. La alúmina residual en la superficie del electrodo fue eliminada en un baño ultrasónico con el equipo Cole-Parner 8851 durante 5 minutos.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de caracterización microscópica con el fin de determinar las impurezas e inclusiones que puedan presentar en la superficie. La pureza de los sulfuros se determinó por difracción de rayos X, donde, para la calcopirita fue de 99% y de la pirita de 99,9 %. El área superficial de los electrodos de calcopirita y pirita fue de 0,225 cm<sup>2</sup> y 0,274 cm<sup>2</sup>, respectivamente.

##### 3.2.2. Preparación y análisis de la solución

La solución férrica fue preparada a partir de sulfato de hierro (III) (Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> x H<sub>2</sub>O, 97% Sigma-Alodrich). La solución ácida (pH 1,2) fue preparada usando agua destilada y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 95-97 %). El análisis de la concentración de hierro (II) e hierro total fueron realizados por el método colorimétrico en el equipo espectrometro ultravioleta-visible (UV).

#### 3.3. Pruebas Electroquímicas

Los experimentos de polarización potenciodinámica se realizaron con el equipo potenciostato BAS 100 B/W en una celda electroquímica, el cual posee una chaqueta que está conectada a un baño termostático con el fin de mantener constante la temperatura. La

celda presenta un sistema de tres electrodos donde el electrodo de trabajo fue de piritita o calcopiritita, el contra electrodo de platino y el electrodo de referencia fue de plata-cloruro de plata (Ag/AgCl) sumergido en una solución de cloruro de potasio 3 M (KCl) dentro de un capilar Luggin. La temperatura de la celda se mantuvo en 25°C por medio de un baño termostático en todos los experimentos y el volumen de solución usado fue de 60 ml (Figura 9).

Todas las pruebas se realizaron a una velocidad de barrido de 1 mV/s y un pH 1,2. Asimismo, se burbujeo la solución electrolítica con gas nitrógeno ultra puro grado 5 (99,998 %, INDURA) por 15 minutos previo a cada experimento electroquímico con el fin de eliminar el oxígeno disuelto en la solución. La certeza en los experimentos tiene un valor promedio de 3%.

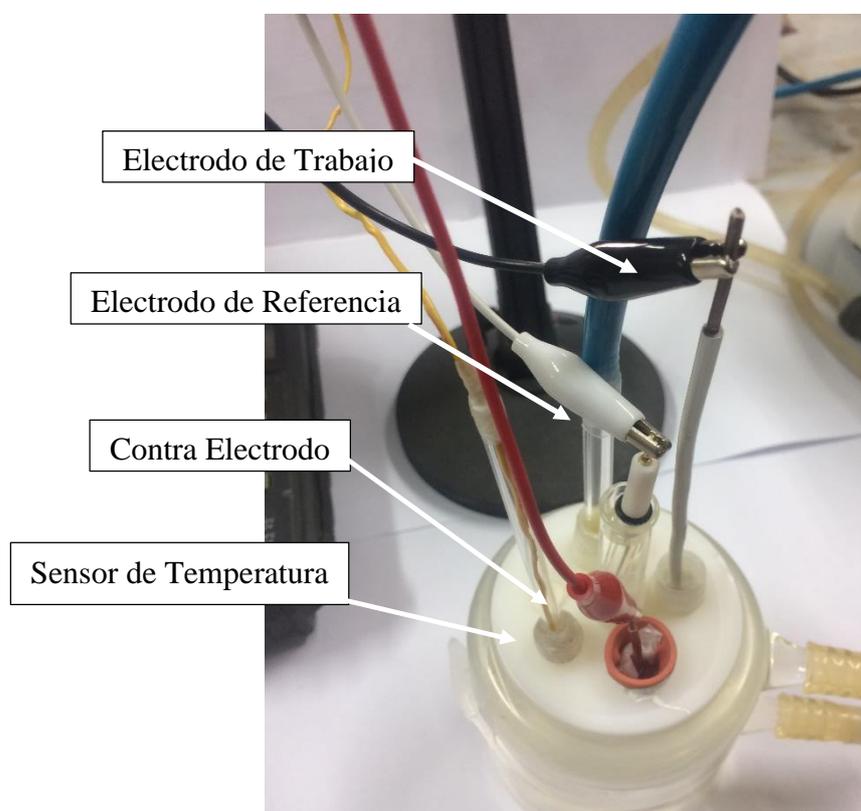


Figura 9: Celda electroquímica con las conexiones electrodos de referencia, contra electrodo y de trabajo.

### 3.3.1. Obtención y caracterización de la curva de polarización anódica de la calcopiritita y piritita

El electrodo se instaló en la celda electroquímica con una solución de ácido sulfúrico, el barrido anódico se inició después de un minuto sumergido en el ácido a partir del potencial de reposo obtenido para cada tiempo de permanencia en la solución y con sentido de barrido positivo hasta los 0,7 V vs Ag/AgCl.

La caracterización y determinación de los parámetros cinético electroquímicos se realizó aplicando la Ecuación 26 (Ecuación de Tafel), para la curva anódica de la calcopirita y pirita.

$$\eta = a + b \cdot \log|i| \quad (26)$$

Las constantes a y b para la rama catódica de la calcopirita están representados por:

$$a = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \log|i_0| \quad (27)$$

$$b = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \quad (28)$$

donde  $i$  es la densidad de corriente,  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $\alpha_a$  es el coeficiente de transferencia de carga anódico,  $n$  es el número de electrones transferidos,  $F$  es la constante de Faraday (96480 C/mol),  $R$  es la constante universal de gases (8,314 J/mol·K),  $T$  es la temperatura en K,  $\eta$  es el sobrepotencial que está dado por  $E - E_{\text{equilibrio}}$ ,  $E$  es el potencial aplicado y  $E_{\text{equilibrio}}$  es el potencial en equilibrio (Fontana, 1978).

### 3.3.2. Obtención y caracterización de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre calcopirita y pirita.

Inicialmente se mantuvo el electrodo de calcopirita o pirita por un periodo de 1 minuto en la celda electroquímica con una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  con concentraciones de ion Fe(III) para cada prueba. Seguidamente, se midió el potencial mixto. Luego, en la misma solución, se inició el barrido con sentido catódico partiendo desde el potencial mixto medido hasta el potencial de reposo del electrodo de calcopirita o pirita obtenida en la solución sin ion férrico (Polarización anódica). Posteriormente, se determinó la curva neta de polarización catódica del ion férrico sobre el sulfuro, como la diferencia entre la corriente obtenida en la solución con una concentración de 0,018 M de Fe(III) y la corriente anódica.

La caracterización y determinación de los parámetros cinético electroquímicos de reducción del ion férrico sobre calcopirita se realizó aplicando la Ecuación 26 y para la curva catódica de reducción del ion férrico sobre pirita, se aplicó la Ecuación 29.

$$\eta = a + b \cdot \log\left(\frac{i_{L,c} - i}{i}\right) \quad (29)$$

Las constantes a y b para la rama catódica de la pirita están representados por:

$$a = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \log \left| \frac{i_0}{i_{L,c}} \right| \quad (30)$$

$$b = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \quad (31)$$

donde  $i$  es la densidad de corriente,  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $\alpha_c$  es el coeficiente de transferencia de carga catódico,  $n$  es el número de electrones transferidos,  $F$  es la constante de Faraday (96480 C/mol),  $R$  es la constante universal de gases (8,314 J/mol·K),  $T$  es la temperatura en K,  $\eta$  es el sobrepotencial que está dado por  $E - E_{\text{equilibrio}}$ ,  $E$  es el potencial aplicado,  $E_{\text{equilibrio}}$  es el potencial en equilibrio y  $i_{L,c}$  es la densidad de corriente límite (Fontana, 1978).

### 3.3.3. Determinación del potencial mixto y densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita.

El potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico se calculó en base al diagrama de Evans propuesto por Fontana (1987) para dos metales, en este caso, se usó para los minerales de calcopirita y pirita, a partir de sus reacciones elementales anódica y catódica que se determinaron en las secciones 3.3.1 y 3.3.2. (Figura 24).

### 3.3.4. Análisis de la influencia de la razón área pirita/área calcopirita en el comportamiento del par galvánico.

El efecto de la razón del área pirita/calcopirita se determinó mediante un ajuste proporcional en base al diagrama de Evans del para galvánico calcopirita-pirita en una concentración de 0,018 M de ion férrico, el cual está en una razón de área pirita/área calcopirita de 1. Las proporciones se calcularon manteniendo un área superficial de 1 cm<sup>2</sup> para la calcopirita y variando el área de la pirita en: 10; 5; 1; 0,5; 0,3 y 0,25 cm<sup>2</sup>, los cuales nos dan una razón de área de pirita/área calcopirita de 0,1; 0,5; 1; 2; 3; 4.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

##### 4.1. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POLARIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICO ELECTROQUÍMICOS ANÓDICO DE LA CALCOPIRITA Y PIRITA.

###### 4.1.1. Caracterización de los electrodos

Los electrodos de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) y pirita ( $\text{FeS}_2$ ) fueron analizados por microscópica óptica. En la Figura 10 se muestra el electrodo de calcopirita presenta alta pureza (99%) con pequeñas inclusiones de blenda ( $\text{ZnS}$ ) con un tamaño entre 3-20  $\mu\text{m}$  y ganga no metálica con un tamaño entre 3-35  $\mu\text{m}$ .

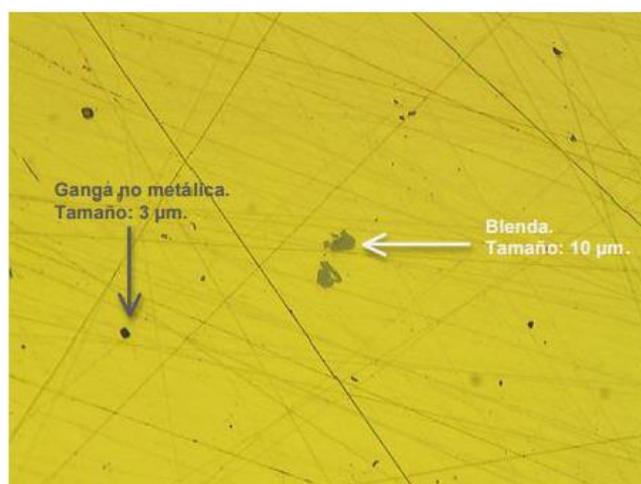


Figura 10: Superficie del electrodo de calcopirita con vista de las inclusiones de blenda y ganga no metálica en una escala de 25  $\mu\text{m}$  (elaboración propia).

En la Figura 11 se muestra el electrodo de pirita presenta alta pureza (99,9 %) con mínimas inclusiones de ganga no metálica finamente diseminada en la superficie, con tamaños que fluctúan entre 5 y 40  $\mu\text{m}$ .

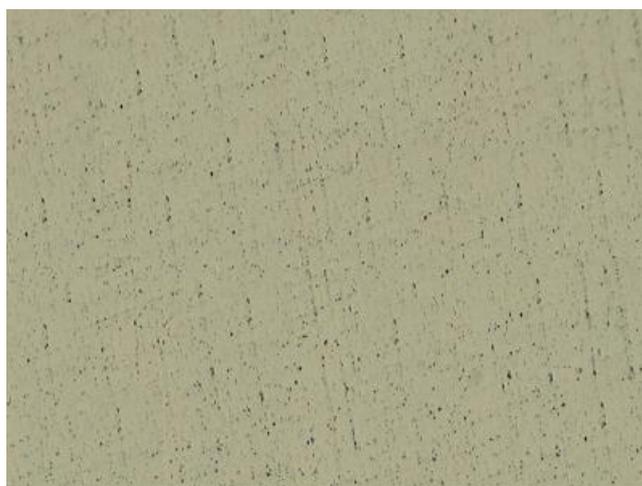


Figura 11: Superficie del electrodo de pirita a una escala 50  $\mu\text{m}$  (elaboración propia).

#### 4.1.2. Obtención de la curva de polarización anódica y determinación de los parámetros cinéticos anódicos de la calcopirita.

En la Figura 12 se muestra el comportamiento de la curva de polarización anódica neta de la calcopirita en ácido sulfúrico (pH 1,2) con un minuto de pretratamiento del mineral en ácido sulfúrico con 0,018 M de ion férrico. Se observa una etapa de pasivación y posteriormente un incremento de la densidad sobre los 0,55 V vs Ag/AgCl, el cual está de acuerdo con lo predicho por Majima (1969) y Dixon et al. (2008). Donde, indican que se tiene un incremento de la densidad de corriente sobre un potencial de 0,45 V vs Ag/AgCl, Estudios de la superficie de la calcopirita indican que la pasivación es debido a la formación de azufre elemental, poli sulfuros, sulfuros ricos en cobre y jarosita (Parker et al., 1981; Dutrizac, 1989; Hackl et al., 1995; Cordoba, 2008). En esta caracterización de la curva de polarización anódica de la calcopirita, no investigo la composición de la superficie pasivada, sin embargo, existe la formación de esta capa, que demuestra la disminución de la densidad de corriente.

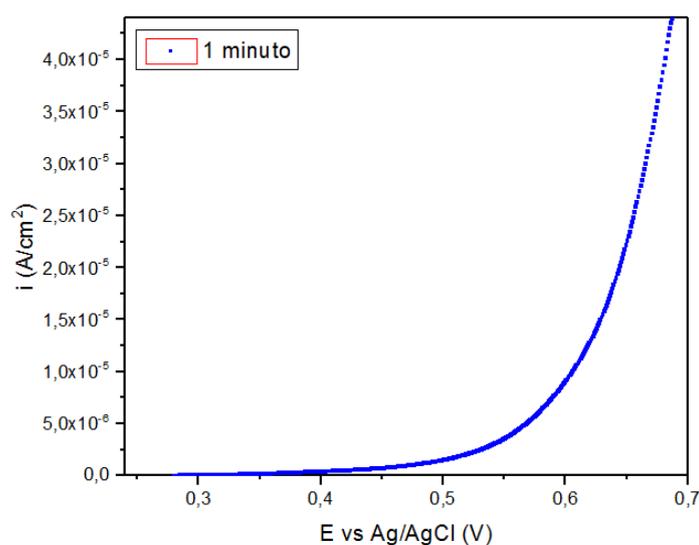


Figura 12: Curva de corriente-potencial para la calcopirita en ácido sulfúrico (datos en ANEXO A.1.- Pág. 62)

En la Figura 13 se linealizó la curva de corriente anódica neta de la calcopirita (Figura 12) con el fin de determinar los parámetros cinéticos. Usando la Ecuación 32 se calculó la pendiente  $b$  y la intersección  $a$ . La pendiente anódica obtenida fue 0,1433 V/década a partir del cual se obtuvo un coeficiente de transferencia de carga anódica igual a 0,41, así mismo, el valor de  $i_0$  fue de  $5,08 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> (Tabla 4).

La ecuación de Tafel (Ecuación 32) se empleó en el modelamiento de las curvas anódica de calcopirita y pirita, así como, la catódica de la calcopirita.

$$\eta = a + b \cdot \log|i| \tag{32}$$

Las constantes a y b para la rama catódica de la calcopirita están representados por:

$$a = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \log|i_0| \tag{33}$$

$$b = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \tag{34}$$

donde i es la densidad de corriente,  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $\alpha_a$  es el coeficiente de transferencia de carga anódico, n es el número de electrones transferidos, F es la constante de Faraday (96480 C/mol), R es la constante universal de gases (8,314 J/mol·K), T es la temperatura en K,  $\eta$  es el sobrepotencial que está dado por  $E - E_{\text{equilibrio}}$ , E es el potencial aplicado y  $E_{\text{equilibrio}}$  es el potencial en equilibrio.

Tabla 4: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización anódica de la calcopirita.

Parámetro cinético	Valor
$\alpha_a$	0,41
$i_0$	$5,08 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$
$E_q$	0,280 V

Fuente: Elaboración propia.

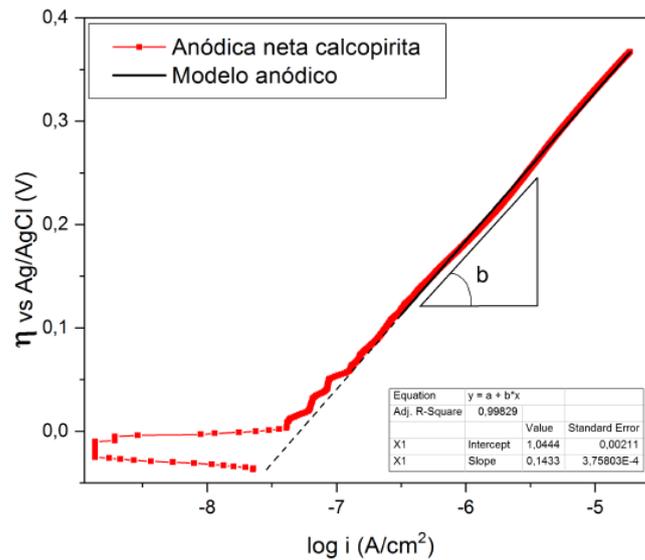


Figura 13: Linealización de la curva anódica de la calcopirita, donde,  $\eta = E - E_{\text{eq}}$  y  $E_{\text{eq}}$  tiene un valor de 0,280 V vs Ag/AgCl (elaboración propia).

#### 4.1.3. Obtención de la curva de polarización anódica y determinación de los parámetros cinéticos anódicos de la pirita.

En la Figura 14 se muestra el comportamiento de la curva de polarización anódica neta de la pirita en ácido sulfúrico (pH 1,2) con un minuto de pretratamiento del mineral en ácido sulfúrico con 0,018 M de ion férrico. Se observa que la densidad de corriente se incrementa drásticamente sobre los 0,6 V vs Ag/AgCl, esto se debe que la pirita no presenta una capa pasivadora en la superficie (Holmes et al., 2000), por tal motivo, la densidad de corriente es directamente proporcional al potencial aplicado.

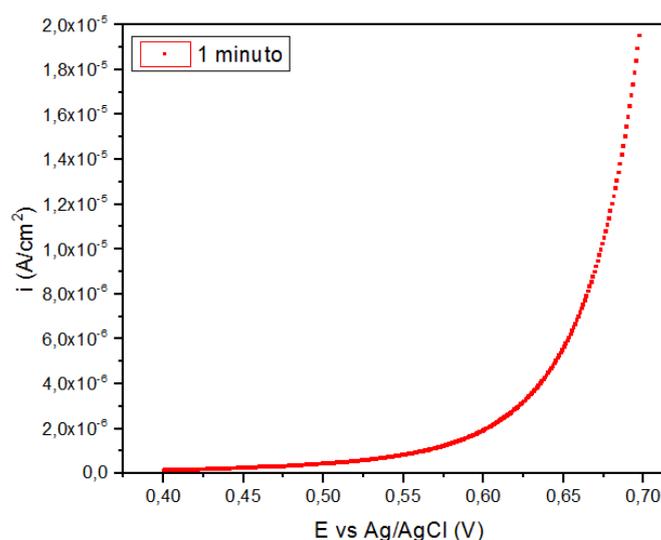


Figura 14: Curva de corriente-potencial para la pirita en ácido sulfúrico (datos en ANEXO A.2.- Pág. 66).

En la Figura 15 se linealizó la curva de polarización anódica neta de la pirita (Figura 14). Obteniéndose una pendiente anódica igual a 0,118 V/decada, a partir de la cual se calculó un coeficiente de transferencia de carga ( $\alpha_a$ ) igual a 0,497, así mismo, el valor de  $i_0$  fue de  $1;38 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> utilizando la Ecuación 26 (ver Tabla 5). Holmes y Crundwell (2000) determinaron la pendiente de la curva de polarización anódica de la pirita para diferentes valores de pH, obteniendo un valor de 0,133 V/década para una temperatura de 25°C, una agitación de 250 rpm. Así mismo, Holmes y Crundwell (2013) indicaron que existe la formación de azufre y poli sulfuros en la superficie de la pirita, el cual no representa una etapa pasivante, se verifica en las curvas de polarización donde no hay una disminución de la densidad con el incremento del potencial, los cuales son proporcionales.

Tabla 5: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización anódica de la pirita.

Parámetro cinético	Valor
$\alpha_a$	0,497
$i_0$	$1,38 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$
$E_q$	0,420 V

Fuente: Elaboración propia.

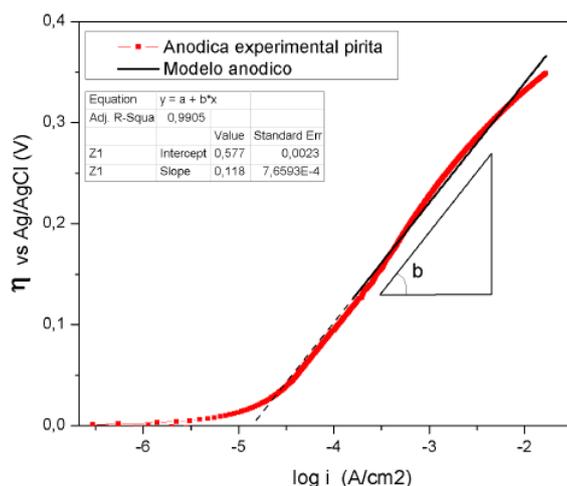


Figura 15: Linealización de la curva anódica de la pirita, donde,  $\eta = E - E_{eq}$  y  $E_{eq}$  tiene un valor de 0,420 V vs Ag/AgCl (elaboración propia).

## 4.2. OBTENCIÓN DE LA CURVA DE POLARIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS PARAMETROS CINÉTICO ELECTROQUÍMICOS DE REDUCCIÓN DEL IÓN FÉRRICO SOBRE LA SUPERFICIE DE LACALCOPIRITA Y PIRITA.

### 4.2.1. Obtención de la curva de polarización catódica y determinación de los parámetros cinéticos catódico neto de reducción del ion férrico sobre calcopirita.

Las curvas de polarización catódica neta de reducción del ion férrico en la superficie del mineral sulfurado, se determinaron a partir de la diferencia de la curva de polarización total menos la curva de polarización anódica neta, según las siguientes Ecuaciones (35) y (36).

$$I_{\text{catódico,cpy}} = I_{\text{Total,cpy}} - I_{\text{anódico,cpy}} \tag{35}$$

$$I_{\text{catódico,py}} = I_{\text{Total,py}} - I_{\text{anódico,py}} \tag{36}$$

donde  $I_{\text{catódico,cpy}}$  y  $I_{\text{catódico,py}}$  es la densidad de corriente catódica de reducción del ion férrico en la superficie de la calcopirita y pirita,  $I_{\text{anódico,cpy}}$  y  $I_{\text{anódico,py}}$  es la densidad de

corriente anódica de la calcopirita y pirita,  $I_{\text{Total,cpy}}$  y  $I_{\text{Total,cpy}}$  es la densidad de corriente total obtenido para cada sulfuro con iones férrico (0,018 M).

Bard y Faulkner (2001) indican que el equipo potenciostato grafica la curva de polarización de corriente total real, la cual es la suma de la componentes de corriente catódica y anódica ( $I_{\text{anódico}}$  y  $I_{\text{catódico}}$ ), donde, para sobre potenciales anódicos muy bajos, la corriente anódica es despreciable y para sobre potenciales catódicos muy bajos, la corriente catódica es despreciables. Por otro lado, es posible obtener la curva catódica restando la curva anódica neta, esta última curva se obtiene en solución acida (Figura 16).

En la Figura 16 se muestra la corriente total obtenida experimentalmente al ciclar la calcopirita en una solución 0,018 M de Fe(III), después de 1 minuto de pre-tratamiento en la misma solución. En la misma figura se muestra además la curva catódica neta calculada de la calcopirita que fue obtenida a partir de la diferencia entre la curva total con 0,018 M de Fe(III) y la curva de corriente anódica neta para un mismo potencial.

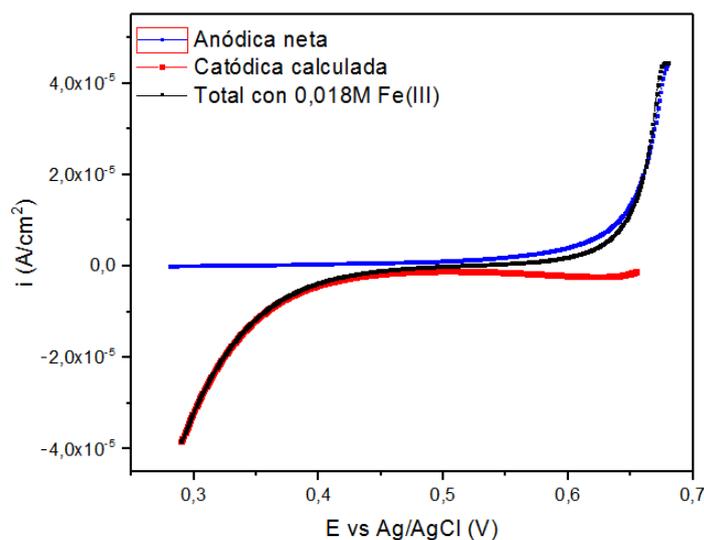


Figura 16: Curva anódica, catódica y total con 0,018 M Fe(III) para calcopirita (elaboración propia).

De acuerdo a la linealización mostrada en la Figura 17, se obtuvo una pendiente Tafel igual a 0,114 V/decada y un coeficiente de transferencia de carga igual a 0,52, así mismo, el valor de  $i_0$  fue  $1,327 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> utilizando la Ecuación 26 (ver Tabla 6). Tshilombo et al. (2002) Determinaron la pendiente de Tafel de la calcopirita a partir de la curva catódica en solución acida con iones férrico 0,001 M y un pretratamiento de 20 Horas, obteniendo una pendiente de 0,150 a 0,220 V/década el cual se incrementa en función del incremento del potencial aplicado, sin embargo, Estos valores elevados de pendiente de Tafel indican la formación de poli sulfuros que inhiben la trasferencia de electrones e iones (20 Horas).

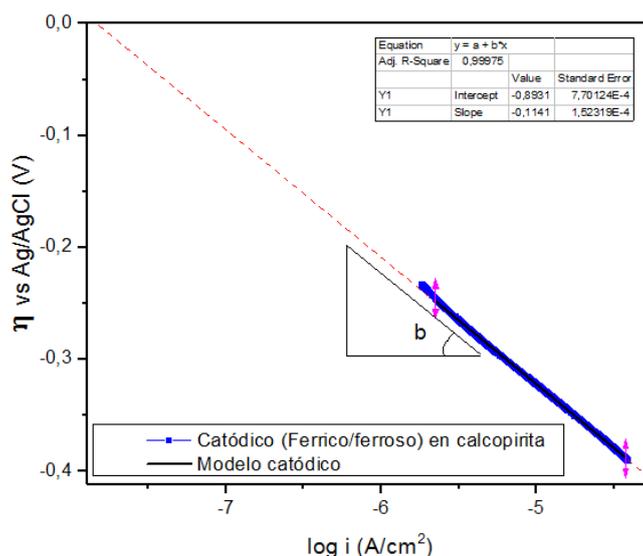


Figura 17: Linealización de la curva catódica de reducción del ion férrico a ferroso sobre calcopirita (datos en ANEXO A.3.- Pág. 70)

Tabla 6: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre calcopirita.

Parámetro cinético	Valor
$\alpha_c$	0,52
$i_0$	$1,327 \cdot 10^{-8} \text{ A/cm}^2$

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Obtención de la curva de polarización catódica y determinación de los parámetros cinéticos catódico neto de reducción del ion férrico sobre pirita.

En la Figura 18 se muestra la corriente total obtenida experimentalmente al ciclar la pirita en un solución 0,018 M Fe(III). El electrodo fue pre-tratado durante 1 minuto en la misma solución. En la misma figura se muestra la curva catódica neta calculada que se obtiene por la diferencia de la curva total con 0,018 M de Fe(III) con la curva de corriente anódica neta de la pirita. La curva catódica presenta una densidad de corriente límite ( $i_L$ ) equivalente a  $5,06 \cdot 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ .

Para el ajuste de la curva catódica de reducción del ion férrico sobre pirita se empleó la ecuación de Tafel que toma en consideración la transferencia de masa (Ecuación 37)

$$\eta = a + b \cdot \log\left(\frac{i_{L,c} - i}{i}\right) \tag{37}$$

Las constantes a y b para la rama catódica de la pirita están representados por:

$$a = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \log \left| \frac{i_0}{i_{L,c}} \right| \tag{38}$$

$$b = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \tag{39}$$

donde  $i$  es la densidad de corriente,  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $\alpha_c$  es el coeficiente de transferencia de carga catódico,  $n$  es el número de electrones transferidos,  $F$  es la constante de Faraday (96480 C/mol),  $R$  es la constante universal de gases (8,314 J/mol·K),  $T$  es la temperatura en K,  $\eta$  es el sobrepotencial que está dado por  $E - E_{\text{equilibrio}}$ .  $E$  es el potencial aplicado,  $E_{\text{equilibrio}}$  es el potencial en equilibrio y  $i_{L,c}$  es la densidad de corriente limite (Fontana, 1978).

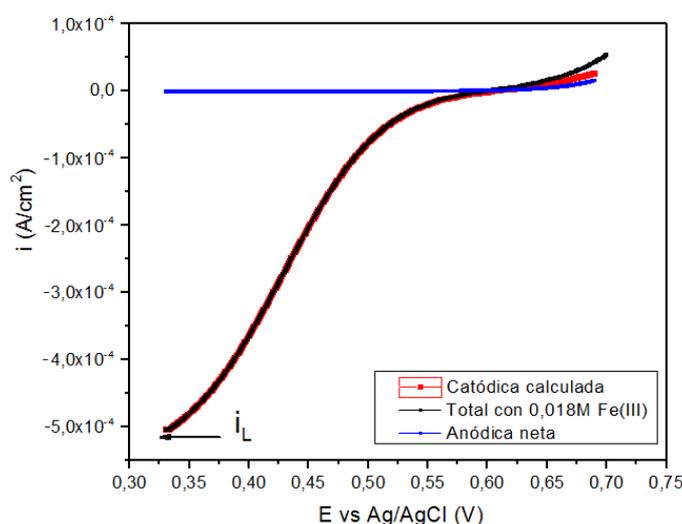


Figura 18: Curva anódica, catódica y total con 0,018 M Fe(III) (elaboración propia).

A partir de la linealización (Ecuación 37) se calculó la pendiente b y la intersección a de la curva de corriente catódica de reducción del ion férrico a ferroso sobre la pirita (Figura 19), Se obtuvo un valor de pendiente igual a 0,084 V/década dando un coeficiente de transferencia de carga de 0,70, así mismo, el valor de  $i_0$  fue  $6,2968 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>. Este dato concuerda con los determinados por Nicol et al. (2013) que determino la pendiente Tafel catódica para diferentes concentraciones de sulfato, encontrando un valor promedio de 0,085 V/década, donde, el encontraron un rango lineal entre 0,83 y 0,90 V vs Ag/AgCl. Holmes y Crundwell (2000) calculo una pendiente de 0,056 V/década en una solución de 0,001 M de ion Fe<sup>3+</sup>, 0,037 M de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 1 M de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 250 rpm y una temperatura de 25°C. Esta diferencia se da debido a la presencia de sulfato de sodio y la agitación lo que genera disminuye la etapa limitante, de este modo, disminuye la pendiente Tafel.

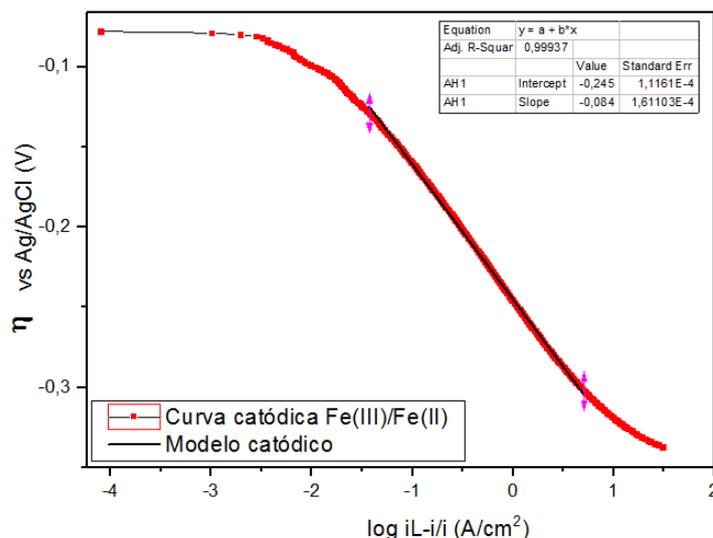


Figura 19: Linealización de la curva catódica de reducción del ion férrico a ferroso sobre pirita (datos en ANEXO A.4.- Pág. 73)

Tabla 7: Parámetros cinéticos electroquímicos de la curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre pirita.

Parámetro cinético	Valor
$\alpha_c$	0,70
$i_0$	$6,297 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$
$i_L$	$5,06 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$

Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, encontraron una densidad de corriente limitante ( $i_L$ ) de  $0,0316 \text{ A/m}^2$ , sin embargo, el modelo que uso Nicol et al. (2013) no incluye este valor, por lo que, es menos preciso. Por otro lado, Holmes y Crundwell (2000) en sus curvas de polarización catódica no encontró una densidad de corriente límite debido que uso una agitación de 250 rpm en su reactor, lo cual está de acuerdo con lo planteado por Fontana (1987) el cual se detalla en la Figura 20.

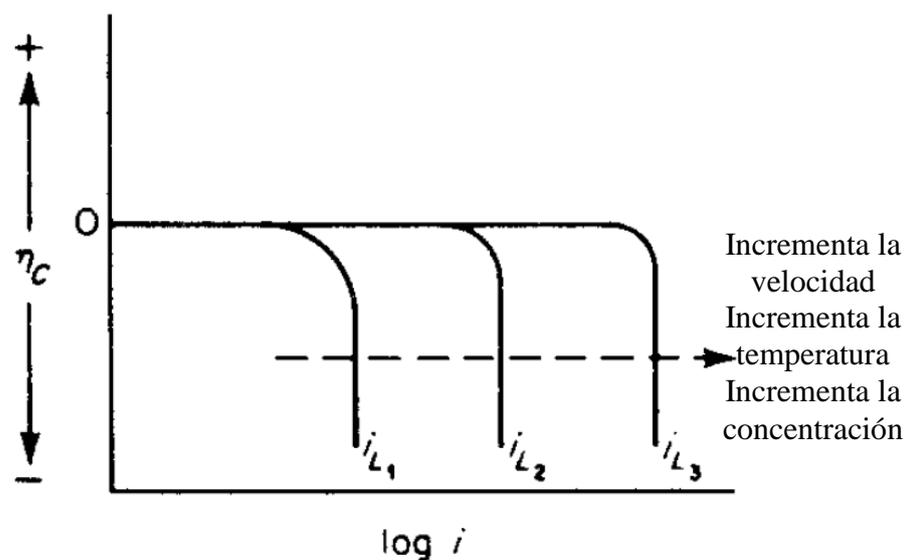


Figura 20: Efecto de las variables en la densidad de corriente límite (Fontana, 1987).

En la Figura 20 se representa el efecto del cambio de la densidad de corriente límite ( $i_L$ ) en la curva de polarización catódica, donde, el límite de la densidad de corriente se incrementa con la velocidad de agitación del reactor, con el incremento de la temperatura y con el incremento de la concentración del agente oxidante (Fontana, 1987).

### 4.3. DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL MIXTO Y LA DENSIDAD DE CORRIENTE DEL PAR GALVANICO CALCOPIRITA-PIRITA

#### 4.3.1. Determinación del potencial y la densidad de corriente de la calcopirita y pirita.

En la Figura 21 se muestra la intersección del modelo catódico calculado de reducción del ion férrico sobre calcopirita (Figura 13) y el modelo anódico de la calcopirita (Figura 17). Se determinó el valor del potencial mixto igual a 0,460 V vs Ag/AgCl y la velocidad de disolución de la calcopirita es  $1,207 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ .

Majuste et al. (2012) determinaron el potencial mixto en cristales con alta pureza por mediciones electroquímicas en una solución de ácido sulfúrico 0,1 mol/L con concentraciones de ion férrico de 0,01 M y 0,05 M, obteniendo un potencial mixto de 0,63 y 0,68 V vs SHE, si cambiamos el valor de referencia a Ag/AgCl se tiene 0,42 y 0,48 V vs Ag/AgCl, estos valores son próximos a los obtenidos mediante el análisis de las curvas anódica y catódica elementales en el diagrama de Evans (Figura 21), la diferencia es por la concentración de ion férrico y el origen de mineral, debido que cambian levemente sus propiedades en función de la fuente.

Así mismo, determino la densidad de corriente para estos potenciales, para una concentración de 0,01 M y 0,05 M de ion férrico de  $8$  y  $9,33 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , este valor mantiene el mismo orden de magnitud, la diferencia se debería a las propiedades de la calcopirita.

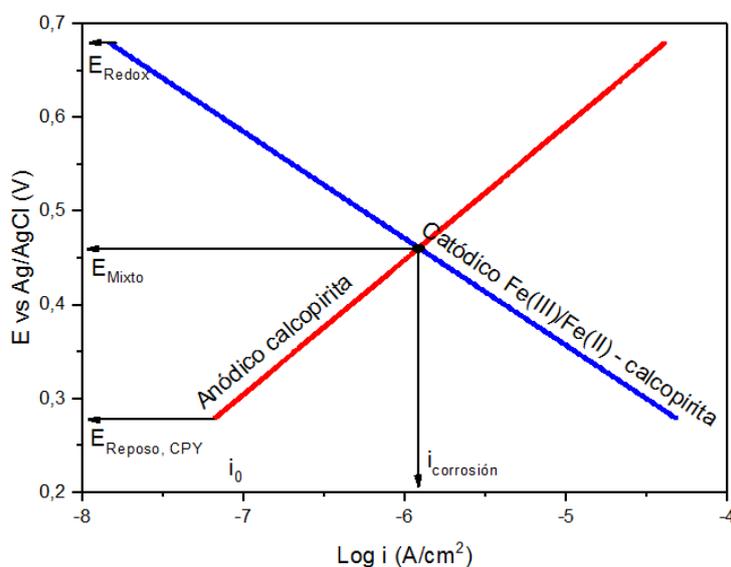


Figura 21: Determinación de la velocidad de disolución de la calcopirita en una solución de ácido sulfúrico con 0,018 M de Fe(III) (elaboración propia).

En la Figura 22 se representa la curva de corriente de reducción del ion férrico sobre pirita calculada según la Ecuación 31 (curva C). La intersección de esta curva con la corriente

de disolución anódica de la pirita (curva A) en el mismo gráfico nos entrega el valor del potencial mixto de 0,620 V vs Ag/AgCl y la velocidad de oxidación de la pirita igual a  $3,1937 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>.

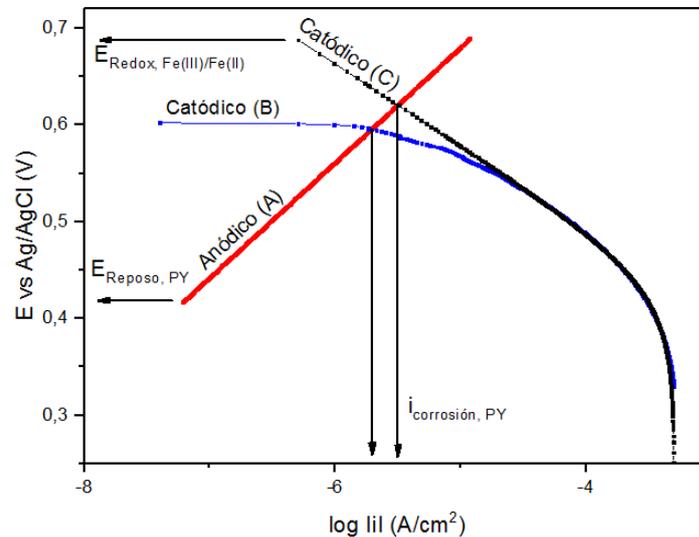


Figura 22: Determinación de la velocidad de disolución de la pirita en una solución de ácido sulfúrico con 0,018 M de Fe(III) (elaboración propia).

Sin embargo, la intersección anterior ocurre a un potencial 0,620 V que está a una distancia menor a 0,118 V del potencial de equilibrio de la reducción de Fe(III) a Fe(II) (0,597 V vs Ag/AgCl). Por lo tanto, la corriente de oxidación obtenida aplicando la Ecuación 31 no es válida en este rango de potencial. Luego en el mismo gráfico, se procedió a representar directamente la curva neta de reducción de Fe(III) sobre pirita (curva B). Usando esta curva catódica se tiene entonces que el potencial mixto es 0,595 V vs Ag/AgCl y la velocidad de oxidación de la pirita es igual a  $1,986 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>.

Tomando en consideración la curva experimental catódica de la pirita (Catódico B de la Figura 22), se tiene un potencia de 0,595 V vs Ag/AgCl. Holmes y Crundwell (2000) determinaron el potencial mixto para diferentes concentraciones de ion férrico (Figura 23) para una concentración de 0,02 de ion férrico y 0,0001 de ion ferroso se tiene un potencial mixto de 0,50 V vs SCE, si cambiamos a la referencia de Ag/AgCl, se tiene 0,48 V vs Ag/AgCl, este valor es menor al obtenido a partir de las reacciones anódica y catódica elementales de la pirita de 0,595 V vs Ag/AgCl, esto se debe a la presencia de ion ferroso, que de acuerdo a la Ecuación de Nernst debe disminuir.

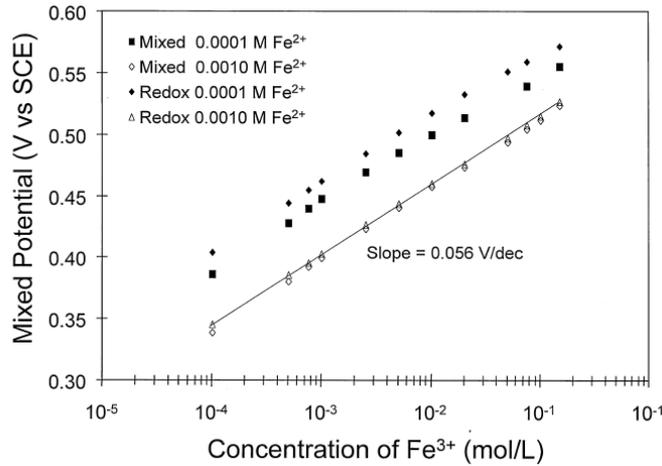
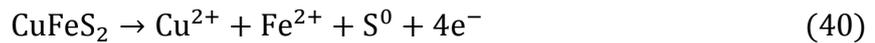


Figura 23: Potencial mixto en función de la concentración de ion férrico en las siguientes condiciones: 1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 0,037 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 298 K y 250 rpm (Holmes y Crundwell, 2000).

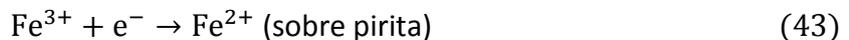
**4.3.2. Determinación del potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita.**

El par galvánico entre dos minerales puede analizarse aplicando la teoría del potencial mixto, donde, la superficie del mineral más noble actúa como zona catódica y el menos noble como zona anódica (Fontana, 1987). En este caso, el mineral más noble es la pirita con un potencial de reposo de +0,420 V vs Ag/AgCl y el menos noble la calcopirita con un potencial de reposo de +0,280 V vs Ag/AgCl. Este sistema está representado por las siguientes reacciones:

Reacción anódica:



Reacciones catódicas



En la sección 4.1.2-3 y 4.2.1-2 se determinaron las curvas de polarización anódica neta y catódica neta para ambos minerales, respectivamente. Con el fin de determinar el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita se procedió a sumar la densidad de corriente anódica de la calcopirita y pirita para cada potencial (Ecuaciones 40 y 41), así mismo, se sumó la densidad de corriente catódica neta de reducción del ion férrico sobre calcopirita y pirita (Ecuaciones 42 y 43).

$$\sum I_{\text{catódico}} = I_{\text{catódico,CPY}} + I_{\text{catódico,PY}} \tag{44}$$

$$\sum I_{\text{anódico}} = I_{\text{anódico,CPY}} + I_{\text{anódico,PY}} \quad (45)$$

En la Figura 24 se muestra la sumatoria de las curvas de disolución anódica de calcopirita y pirita, la sumatoria de las curvas de reducción del Fe(III) sobre estos sulfuros. La sumatoria de la corriente de reducción del Fe(III) presenta valores similares a la reducción del Fe(III) sobre pirita, debido que la densidad de corriente de reducción de Fe(III) sobre la pirita es mayor que sobre la calcopirita. Del mismo modo, la sumatoria de la corriente anódica, es próximo a la corriente de disolución de la calcopirita.

En la Figura 24 se determinó el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita a partir de la intersección de la sumatoria de las corriente anódica y catódica, siendo igual a 0,57 V vs Ag/AgCl. La corriente de disolución de la calcopirita es  $1,215 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Cpy(1) en la Figura 21) y de la pirita a este potencial es  $1,96 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Py(1) en Figura 22). Se observa que la presencia de la pirita aumenta la corriente de disolución de la calcopirita desde  $1,215 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Cpy 1) hasta  $7,01 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Cpy 2). Por el contrario, la disolución de la pirita disminuye desde  $1,960 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Py 1) hasta  $1,223 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$  (Py 2).

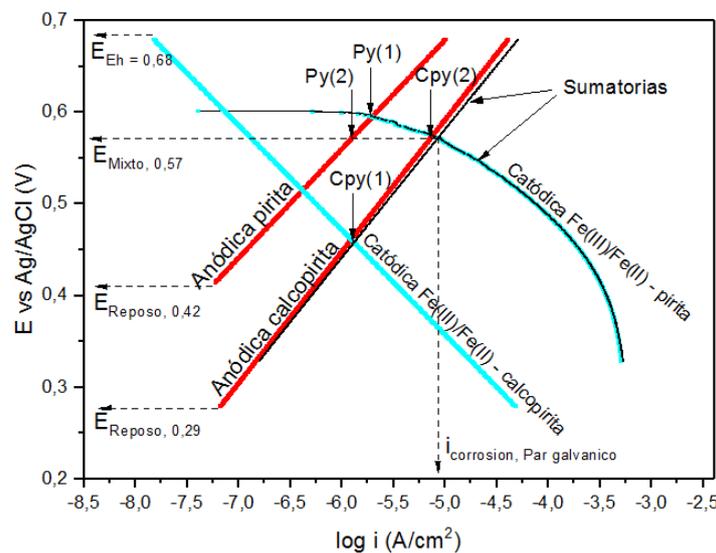


Figura 24: Diagrama de Evans del par galvánico calcopirita-pirita (elaboración propia).

Majuste et al. (2012) determinaron el potencial mixto del par galvánico calcopirita-pirita en cristales naturales, obtuvieron el valor de 0,72 V vs SHE para una concentración de 0,01 M de Fe(III), este al cambiar de electrodo de referencia a Ag/AgCl es 0,51 V vs Ag/AgCl, a comparación con el obtenido a partir de sus reacciones elementales anódica y

catódica que fue de 0,57 para una concentración de 0,018 M de ion Fe(III), los valores son próximo y se diferencian por la concentración de ion Fe(III). Por otro lado, la densidad de corriente para estas condiciones en el trabajo de Majuste et al. (2012) fue de  $12,74 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> y para este trabajo fue de  $1,215 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>.

You et al. (2007) obtuvieron el valor del potencial mixto en un sistema de flujo continuo de solución de ácido sulfúrico con electrodos de calcopirita y pirita sumergidos, el valor del potencial mixto para una concentración de 0,01 M de ion Fe(III), pH de 3,78 y un flujo de 0,36 m/s de 0,40 V vs SCE, al pasar a Ag/AgCl se tiene un valor de 0,39 V vs Ag/AgCl, y la densidad de corriente para esas condiciones fue de  $2 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>. El valor de potencial es menor al calculado en este trabajo, esto se debería al pH, según Córdoba et al. (2008) en los iones férrico a pH mayor a 2,5 precipitan como jarocita, la elevada conductividad se debería al flujo continuo, como se explicó anteriormente, esto permite un mayor contacto de iones Fe(III) de seno de la solución a la superficie del electrodo.

#### 4.4. ANALISIS DEL EFECTO DE LA RAZON DE ÁREA PIRITA/CALCOPIRITA EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAR GALVANICO

##### 4.4.1. Efecto de la relación de área pirita/calcopirita sobre el potencial del par galvánico y la densidad de corriente.

Con la información cinética anterior, ahora es posible determinar el potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita para diferentes razones de área entre ambos minerales. De este modo, si se asume un valor unitario del área superficial de la calcopirita ( $1 \text{ cm}^2$ ) y al variar el área superficial de la pirita (0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 3 y  $4 \text{ cm}^2$ ) es posible evaluar el efecto de la razón de áreas pirita/calcopirita sobre la lixiviabilidad de la calcopirita. En la Figura 25 se representan las curvas anódicas y catódicas del par galvánico calcopirita-pirita para diferentes razones de área pirita/calcopirita.

Para el cálculo de las curvas de polarización se empleó la ecuación de Tafel que toma en consideración la transferencia de masa (Ecuación 40)

$$\eta = a + b \cdot \log\left(\frac{i_{L,c} - i}{i}\right) \quad (46)$$

Las constantes a y b para la rama catódica de la pirita están representados por:

$$a = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \cdot \log\left|\frac{i_0}{i_{L,c}}\right| \quad (47)$$

$$b = 2,303 \cdot \frac{R \cdot T}{\alpha_c \cdot n \cdot F} \quad (48)$$

donde  $i$  es la densidad de corriente,  $i_0$  es la densidad de corriente de intercambio,  $\alpha_c$  es el coeficiente de transferencia de carga catódico,  $n$  es el número de electrones transferidos,  $F$  es la constante de Faraday ( $96480 \text{ C/mol}$ ),  $R$  es la constante universal de gases ( $8,314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ),  $T$  es la temperatura en K,  $\eta$  es el sobrepotencial que está dado por  $E - E_{\text{equilibrio}}$ .  $E$  es el potencial aplicado,  $E_{\text{equilibrio}}$  es el potencial en equilibrio y  $i_{L,c}$  es la densidad de corriente límite (Fontana, 1978).

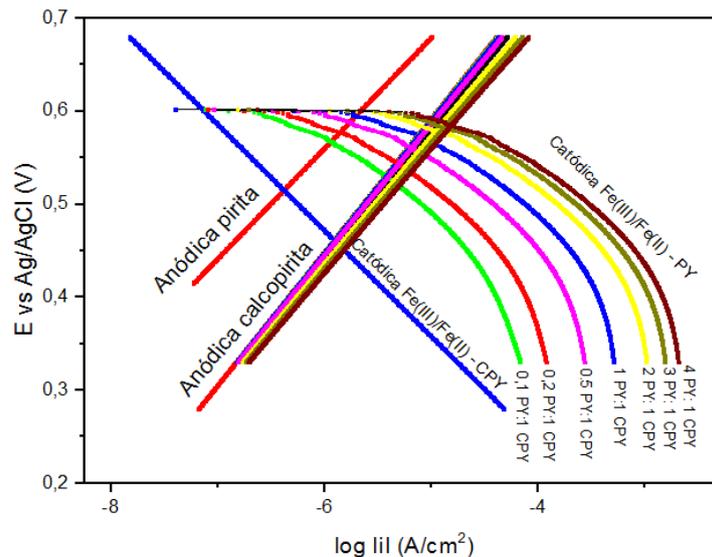


Figura 25: Curvas anódicas y catódicas del par galvánico pirita-calcopirita para diferentes razones de área pirita/calcopirita (elaboración propia).

En la Tabla 8, se muestra un resumen de los potenciales mixtos y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita obtenidos a partir del diagrama de Evans en la Figura 25 (para cada razón de área de pirita/calcopirita se calculó la densidad de corriente de la disolución de la calcopirita y pirita según el procedimiento mostrado para la Figura 24). Estos valores se grafican en la Figura 26. Se puede observar que el potencial del par galvánico se incrementa de 0,529 a 0,585 V vs Ag/AgCl cuando la razón del área pirita/calcopirita aumenta de 0,1 a 4.

Tabla 8: Potencial mixto y densidad de corriente del par galvánico pirita-calcopirita en función de la razón de área pirita/calcopirita.

Razón py/cpy	E (par galvánico) V (Ag/AgCl)	I (par galvánico) mA/cm <sup>2</sup>
0,1	0,529	0,0037
0,5	0,560	0,0066
1	0,573	0,0086
2	0,57	0,0109
3	0,583	0,013
4	0,585	0,0152

Fuente: Elaboración propia.

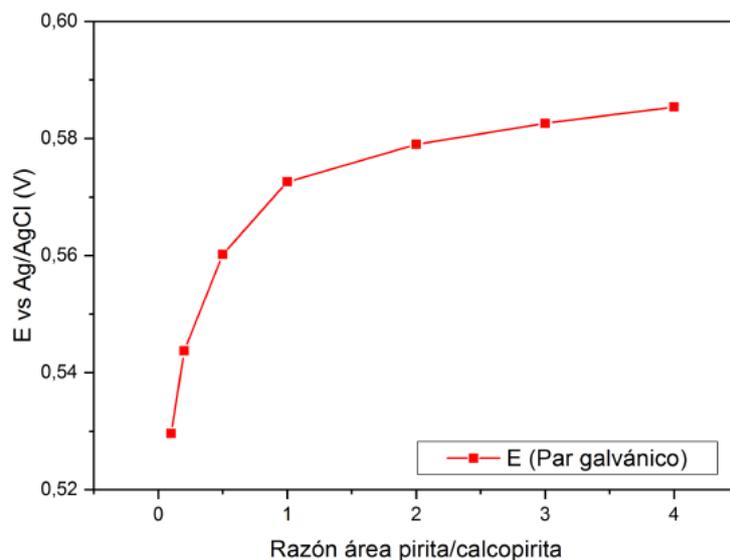


Figura 26: Potencial mixto del par galvánico calcopiritita-piritita en función de la razón del área piritita/calcopiritita (elaboración propia).

Para cada razón de área piritita/calcopiritita se calculó la densidad de corriente de disolución de la calcopiritita y piritita según el procedimiento mostrado en la Figura 25. Estos resultados se muestran en la Figura 27. Se observa que la densidad de corriente de calcopiritita se incrementa con el aumento de la razón de área piritita/calcopiritita. Por otra parte, la densidad de corriente de la piritita inicialmente baja, luego sube y se mantiene relativamente constante con el incremento de la razón de área piritita/calcopiritita.

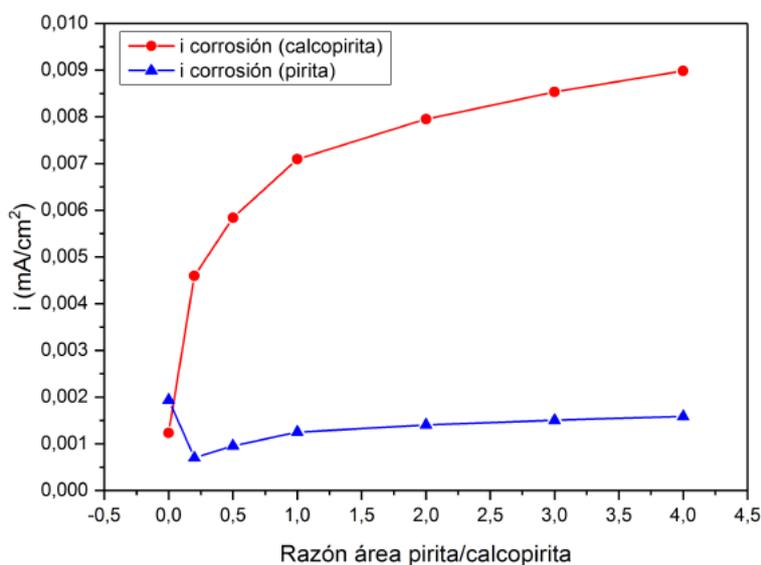


Figura 27: Densidad de corriente ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ ) de la calcopiritita y piritita en función de la razón del área piritita/calcopiritita (elaboración propia).

Es interesante comparar algunos valores reportados en la literatura sobre efecto galvánico de la piritita sobre calcopiritita, con los resultados de este estudio. Majuste et al., 2012, efectuaron mediciones en este sistema a  $25^\circ\text{C}$  en soluciones ácidas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a pH 1, con una concentración 0,01M de ion férrico. El efecto galvánico se midió determinando la

corriente de corrosión en electrodos de calcopirita natural conteniendo inclusiones de pirita en diferente porcentaje. Para electrodos con valores de la razón de área superficial pirita/calcopirita igual a 0,1627, 0,4497 y 0,724, se determinaron valores de potencial mixto de 0,49; 0,50 y 0,52 V vs Ag/AgCl y corrientes de corrosión de 0,01129; 0,01274 y 0,01673 mA/cm<sup>2</sup>, respectivamente.

En la Figura 28 se puede observar que la variación en los valores de la densidad de corriente y potencial de corrosión con la razón área Py/área Cpy en los datos de Majuste et al. 2012, sigue una tendencia similar a los predichos por este estudio. Los valores absolutos de las corrientes y potenciales de corrosión en ambos estudios están algo desplazados entre sí, lo cual es esperable dado que corresponden a diferentes muestras de calcopirita y pirita. El desplazamiento observado indica que los minerales usados por Majuste et al. Eran más reactivos que los usados en el presente estudio.

Un aspecto adicional es que en el trabajo de Majuste et al., la concentración de de ion férrico fue mucho menor que la usada en este estudio, 0,01M versus 0,018M. Por esta razón los datos de Majuste para una cierta razón Py/Cpy están por debajo de la correspondiente curva catódica obtenida para la misma razón en este estudio.

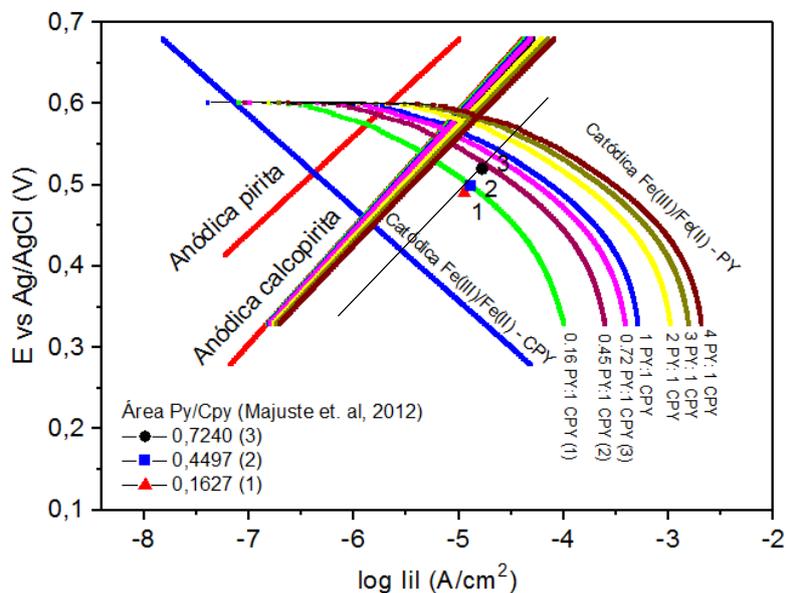


Figura 28: Densidad de corriente y potencial mixto para la razón de área Py/Cpy citados en Majuste et al. (2012) frente a los obtenidos en la Figura 21 (elaboración propia).

## V. CONCLUSIONES

- La cinética de la disolución anódica de calcopirita y pirita está controlada por transferencia de carga y se puede describir por la ecuación de Tafel. La corrientes de intercambio de esta reacción es del mismo orden de magnitud en ambos sulfuros,  $5,08 \times 10^{-8}$  y  $1,38 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> para calcopirita y pirita, respectivamente.
- La cinética de la reducción de ion férrico sobre calcopirita está controlada por transferencia de carga y sobre pirita por transferencia de carga y masa, este último fenómeno estando asociado a la difusión de ion férrico. Sin embargo, en la corriente de intercambio de la reducción de férrico sobre pirita es dos órdenes de magnitud mayor que para el caso sobre calcopirita,  $10^{-4}$  vs  $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>.
- Mediante esta metodología es posible predecir el valor del potencial mixto y la densidad de corriente del par galvánico calcopirita-pirita.
- El efecto galvánico de la pirita aumenta notoriamente con el aumento de la razón de área pirita/calcopirita.

## VI. RECOMENDACIONES

- Determinar el potencial mixto y la densidad de corriente para el par galvánico blenda-pirita.
- Analizar el efecto del tiempo de pre tratamiento de la calcopirita antes de cada barrido.
- Realizar pruebas con diferentes sentidos de barrido (positivo o negativo), debido que en el caso de la calcopirita este un factor importante para la determinación del potencial mixto y la densidad de corriente.
- Analizar el efecto del ion ferroso en el par galvánico calcopirita-pirita.
- Reproducir los experimentos con las misma concentraciones de ion férrico realizado en el artículo de Majuste et al. (2012), con el fin de tener una comparación más exacta.
- Se recomendaría fabricar un potencióstato de bajo costo, para lo cual existen diferentes artículos con los diseños; de este modo, se podría determinar el potencial mixto para diferentes metales, así mismo, mejorar el aprendizaje en este campo.

## VII. REFERENCIAS

- Bard, A., y Faulkner, L. (2001). *Electroquimical Methods (Fundamentals and Applications)* (Segunda ed.). New York: John Wiley y Sons, Inc.
- Blight, K., Ralph, D., and Thurgate, S. (2000). Pyrite surfaces after bio-leaching: a mechanism for bio-oxidation. *Hydrometallurgy*, 58(3):227–237.
- Burdick, C. L. and Ellis, J. H. (1917). The crystal structure of chalcopyrite determined by x-rays. *Journal of the American Chemical Society*, 39(12):2518–2525.
- Burkin, A. (2001). *Chemical Hydrometallurgy: Theory and Principles*. Londres: Imperial College Press.
- Córdoba, E., Muñoz, J., Blázquez, M., González, F., and Ballester, A. (2008). Leaching of chalcopyrite with ferric ion. part i: General aspects. *Hydrometallurgy*, 93(3):81–87.
- Dana, J. D. and Hurlbut, C. (1987). *Manual de mineralogía*. Reverté.
- Dixon, D., Mayne, D., and Baxter, K. (2008). Galvanox a novel galvanically assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates. *Canadian Metallurgical Quarterly*.
- Donnay, G., Corliss, L., Donnay, J., Elliott, N., and Hastings, J. (1958). Symmetry of magnetic structures: magnetic structure of chalcopyrite. *Physical Review*, 112(6):1917.
- Dutrizac, J. (1989). Elemental sulphur formation during the ferric sulphate leaching of chalcopyrite. *Canadian Metallurgical Quarterly*.
- Dutrizac, J. and MacDonald, R. (1973). The effect of some impurities on the rate of chalcopyrite dissolution. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 12(4):409–420.
- Fontana, M. G. (1987). *Corrosion engineering*. Mc Graw-Hill Book Company, America.
- Hackl, R., Dreisinger, D., Peters, E., and King, J. (1995). Passivation of chalcopyrite during oxidative leaching in sulfate media. *Hydrometallurgy*, 39(1):25–48.
- Holmes, P. R. and Crundwell, F. K. (2000). The kinetics of the oxidation of pyrite by ferric ions and dissolved oxygen: an electrochemical study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(2):263–274.
- Holmes, P. and Crundwell, F. (2013). Polysulfides do not cause passivation: results from the dissolution of pyrite and implications for other sulfide minerals. *Hydrometallurgy*, 139:101–110.
- Ibañez, T., & Velásquez, L. (2013). Lixiviación de la calcopirita en medios clorurados. *Revista de Metalurgia*, 49(2), 131-144.
- Koleini, S. J., Aghazadeh, V., & Sandström, Å. (2011). Acidic sulphate leaching of chalcopyrite concentrates in presence of pyrite. *Minerals Engineering*, 24(5), 381-386.

- Linge, H. (1977). Reactivity comparison of australian chalcopyrite concentrates in acidified ferric solution. *Hydrometallurgy*, 2(3):219–233.
- Liang, C.-L., Xia, J.-L., Zhao, X.-J., Yang, Y., Gong, S.-Q., Nie, Z.-Y., Ma, C.-Y., Zheng, L., Zhao, Y.-D., and Qiu, G.-z. (2010). Effect of activated carbon on chalcopyrite bioleaching with extreme thermophile acidianus manzaensis. *Hydrometallurgy*, 105(1):179–185.
- Majima, H. (1969). How oxidation affects selective flotation of complex sulphide ores. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 8(3):269–273.
- Majuste, D., Ciminelli, V., Osseo-Asare, K., and Dantas, M. (2012). Quantitative assessment of the effect of pyrite inclusions on chalcopyrite electrochemistry under oxidizing conditions. *Hydrometallurgy*, 113:167–176.
- Mehta, A. and Murr, L. (1983). Fundamental studies of the contribution of galvanic interaction to acid-bacterial leaching of mixed metal sulfides. *Hydrometallurgy*, 9(3):235–256.
- Miller, J., McDonough, P., and Portillo, H. (1981). Electrochemistry in silver catalyzed ferric sulfate leaching of chalcopyrite. In *Process and Fundamental Considerations of Selected Hydrometallurgical Systems*, volume 27, page 327. AIME New York.
- Muñoz, P., Miller, J. D., and Wadsworth, M. E. (1979). Reaction mechanism for the acid ferric sulfate leaching of chalcopyrite. *Metallurgical Transactions B*, 10(2):149–158.
- Nazari, G., Dixon, D., and Dreisinger, D. (2011). Enhancing the kinetics of chalcopyrite leaching in the galvanox<sup>®</sup> process. *Hydrometallurgy*, 105(3):251–258.
- Nicol, M., Miki, H., and Basson, P. (2013). The effects of sulphate ions and temperature on the leaching of pyrite. 2. dissolution rates. *Hydrometallurgy*, 133:182–187.
- Parker, A., Paul, R., and Power, G. (1981). Electrochemistry of the oxidative leaching of copper from chalcopyrite. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 118:305–316.
- Pauling, L. and Brockway, L. (1932). The crystal structure of chalcopyrite  $\text{CuFeS}_2$ . *Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials*, 82(1-6):188–194.
- Sun, H., Chen, M., Zou, L., Shu, R., and Ruan, R. (2015). Study of the kinetics of pyrite oxidation under controlled redox potential. *Hydrometallurgy*, 155:13–19.
- Tshilombo, A., Petersen, J., and Dixon, D. (2002). The influence of applied potentials and temperature on the electrochemical response of chalcopyrite during bacterial leaching. *Minerals Engineering*, 15(11):809–813.
- Tshilombo, A. (2004). Mechanism and kinetics of chalcopyrite passivation and depassivation during ferric and microbial leaching solutions. PhD thesis, PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.

- Parker, A., Paul, R., and Power, G. (1981). Electrochemistry of the oxidative leaching of copper from chalcopyrite. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electro-chemistry*, 118:305–316.
- You, L. Q., Heping, L., and Li, Z. (2007). Study of galvanic interactions between pyrite and chalcopyrite in a flowing system: implications for the environment. *Environmental geology*, 52(1):11–18.
- Warren, G., Wadsworth, M., and El-Raghy, S. (1982). Passive and transpassive anodic behavior of chalcopyrite in acid solutions. *Metallurgical Transactions B*, 13(4):571–579.
- Wu, R., Zheng, Y., Zhang, X., Sun, Y., Xu, J., and Jian, J. (2004). Hydrothermal synthesis and crystal structure of pyrite. *Journal of Crystal Growth*, 266(4):523–527.

## ANEXOS

## ANEXO A. DATOS EXPERIMENTALES DE LAS CURVAS DE POLARIZACIÓN.

Tabla A.1: Datos curva de polarización anódica de la calcopirita.

mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
281	0.281	-0.0090	4.24E-08	-7.372	318	0.318	0.0280	1.33E-07	-6.877
282	0.282	-0.0080	4.24E-08	-7.373	319	0.319	0.0290	1.36E-07	-6.867
283	0.283	-0.0070	4.58E-06	-5.339	320	0.320	0.0300	1.39E-07	-6.858
284	0.284	-0.0060	5.00E-08	-7.301	321	0.321	0.0310	1.42E-07	-6.848
285	0.285	-0.0050	5.31E-08	-7.275	322	0.322	0.0320	1.45E-07	-6.839
286	0.286	-0.0040	5.60E-08	-7.252	323	0.323	0.0330	1.48E-07	-6.830
287	0.287	-0.0030	5.91E-08	-7.228	324	0.324	0.0340	1.50E-07	-6.823
288	0.288	-0.0020	6.14E-08	-7.212	325	0.325	0.0350	1.51E-07	-6.822
289	0.289	-0.0010	6.30E-08	-7.201	326	0.326	0.0360	1.52E-07	-6.819
290	0.290	0.0000	6.40E-08	-7.194	327	0.327	0.0370	1.53E-07	-6.815
291	0.291	0.0010	6.49E-08	-7.188	328	0.328	0.0380	1.56E-07	-6.807
292	0.292	0.0020	6.53E-08	-7.185	329	0.329	0.0390	1.59E-07	-6.799
293	0.293	0.0030	6.64E-08	-7.178	330	0.330	0.0400	1.62E-07	-6.790
294	0.294	0.0040	6.88E-08	-7.162	331	0.331	0.0410	1.65E-07	-6.782
295	0.295	0.0050	7.17E-08	-7.145	332	0.332	0.0420	1.70E-07	-6.769
296	0.296	0.0060	7.46E-08	-7.127	333	0.333	0.0430	1.76E-07	-6.755
297	0.297	0.0070	7.73E-08	-7.112	334	0.334	0.0440	1.81E-07	-6.743
298	0.298	0.0080	7.98E-08	-7.098	335	0.335	0.0450	1.84E-07	-6.735
299	0.299	0.0090	8.25E-08	-7.083	336	0.336	0.0460	1.88E-07	-6.727
300	0.300	0.0100	8.45E-08	-7.073	337	0.337	0.0470	1.91E-07	-6.718
301	0.301	0.0110	8.51E-08	-7.070	338	0.338	0.0480	1.96E-07	-6.707
302	0.302	0.0120	8.52E-08	-7.069	339	0.339	0.0490	2.00E-07	-6.698
303	0.303	0.0130	8.56E-08	-7.067	340	0.340	0.0500	2.03E-07	-6.692
304	0.304	0.0140	8.58E-08	-7.066	341	0.341	0.0510	2.07E-07	-6.685
305	0.305	0.0150	8.68E-08	-7.061	342	0.342	0.0520	2.10E-07	-6.679
306	0.306	0.0160	8.72E-08	-7.059	343	0.343	0.0530	2.14E-07	-6.671
307	0.307	0.0170	8.89E-08	-7.051	344	0.344	0.0540	2.18E-07	-6.661
308	0.308	0.0180	9.20E-08	-7.036	345	0.345	0.0550	2.22E-07	-6.654
309	0.309	0.0190	9.71E-08	-7.013	346	0.346	0.0560	2.25E-07	-6.648
310	0.310	0.0200	1.02E-07	-6.989	347	0.347	0.0570	2.28E-07	-6.642
311	0.311	0.0210	1.08E-07	-6.965	348	0.348	0.0580	2.31E-07	-6.636
312	0.312	0.0220	1.14E-07	-6.945	349	0.349	0.0590	2.34E-07	-6.630
313	0.313	0.0230	1.19E-07	-6.923	350	0.350	0.0600	2.37E-07	-6.626
314	0.314	0.0240	1.24E-07	-6.907	351	0.351	0.0610	2.38E-07	-6.623
315	0.315	0.0250	1.27E-07	-6.896	352	0.352	0.0620	2.41E-07	-6.618
316	0.316	0.0260	1.28E-07	-6.892	353	0.353	0.0630	2.44E-07	-6.612
317	0.317	0.0270	1.30E-07	-6.886	354	0.354	0.0640	2.48E-07	-6.606

mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
363	0.363	0.0730	2.85E-07	-6.545	408	0.408	0.1180	5.06E-07	-6.296
364	0.364	0.0740	2.91E-07	-6.537	409	0.409	0.1190	5.12E-07	-6.291
365	0.365	0.0750	2.96E-07	-6.528	410	0.410	0.1200	5.18E-07	-6.285
366	0.366	0.0760	3.01E-07	-6.521	411	0.411	0.1210	5.24E-07	-6.280
367	0.367	0.0770	3.07E-07	-6.514	412	0.412	0.1220	5.30E-07	-6.276
368	0.368	0.0780	3.10E-07	-6.508	413	0.413	0.1230	5.37E-07	-6.270
369	0.369	0.0790	3.14E-07	-6.504	414	0.414	0.1240	5.43E-07	-6.265
370	0.370	0.0800	3.17E-07	-6.499	415	0.415	0.1250	5.48E-07	-6.262
371	0.371	0.0810	3.20E-07	-6.494	416	0.416	0.1260	5.51E-07	-6.259
372	0.372	0.0820	3.24E-07	-6.490	417	0.417	0.1270	5.55E-07	-6.256
373	0.373	0.0830	3.28E-07	-6.484	418	0.418	0.1280	5.61E-07	-6.251
374	0.374	0.0840	3.32E-07	-6.479	419	0.419	0.1290	5.67E-07	-6.247
375	0.375	0.0850	3.35E-07	-6.475	420	0.420	0.1300	5.72E-07	-6.243
376	0.376	0.0860	3.38E-07	-6.470	421	0.421	0.1310	5.76E-07	-6.240
377	0.377	0.0870	3.44E-07	-6.464	422	0.422	0.1320	5.79E-07	-6.237
378	0.378	0.0880	3.50E-07	-6.456	423	0.423	0.1330	5.83E-07	-6.235
379	0.379	0.0890	3.56E-07	-6.448	424	0.424	0.1340	5.88E-07	-6.231
380	0.380	0.0900	3.63E-07	-6.441	425	0.425	0.1350	5.92E-07	-6.228
381	0.381	0.0910	3.69E-07	-6.433	426	0.426	0.1360	5.95E-07	-6.226
382	0.382	0.0920	3.75E-07	-6.426	427	0.427	0.1370	5.98E-07	-6.223
383	0.383	0.0930	3.81E-07	-6.419	428	0.428	0.1380	6.02E-07	-6.220
384	0.384	0.0940	3.88E-07	-6.411	429	0.429	0.1390	6.08E-07	-6.216
385	0.385	0.0950	3.94E-07	-6.404	430	0.430	0.1400	6.14E-07	-6.212
386	0.386	0.0960	3.99E-07	-6.399	431	0.431	0.1410	6.20E-07	-6.207
387	0.387	0.0970	4.02E-07	-6.396	432	0.432	0.1420	6.26E-07	-6.203
388	0.388	0.0980	4.05E-07	-6.393	433	0.433	0.1430	6.32E-07	-6.199
389	0.389	0.0990	4.09E-07	-6.389	434	0.434	0.1440	6.38E-07	-6.195
390	0.390	0.1000	4.14E-07	-6.383	435	0.435	0.1450	6.44E-07	-6.191
391	0.391	0.1010	4.17E-07	-6.380	436	0.436	0.1460	6.51E-07	-6.187
392	0.392	0.1020	4.20E-07	-6.377	437	0.437	0.1470	6.56E-07	-6.183
393	0.393	0.1030	4.23E-07	-6.373	438	0.438	0.1480	6.60E-07	-6.181
394	0.394	0.1040	4.26E-07	-6.370	439	0.439	0.1490	6.63E-07	-6.179
395	0.395	0.1050	4.31E-07	-6.366	440	0.440	0.1500	6.66E-07	-6.177
396	0.396	0.1060	4.37E-07	-6.360	441	0.441	0.1510	6.69E-07	-6.174
397	0.397	0.1070	4.44E-07	-6.353	442	0.442	0.1520	6.74E-07	-6.171
398	0.398	0.1080	4.50E-07	-6.347	443	0.443	0.1530	6.78E-07	-6.169
399	0.399	0.1090	4.56E-07	-6.341	444	0.444	0.1540	6.81E-07	-6.167
400	0.400	0.1100	4.63E-07	-6.335	445	0.445	0.1550	6.84E-07	-6.165
401	0.401	0.1110	4.71E-07	-6.327	446	0.446	0.1560	6.88E-07	-6.162
402	0.402	0.1120	4.79E-07	-6.320	447	0.447	0.1570	6.95E-07	-6.158
403	0.403	0.1130	4.84E-07	-6.315	448	0.448	0.1580	7.00E-07	-6.155
404	0.404	0.1140	4.88E-07	-6.312	449	0.449	0.1590	7.07E-07	-6.151
405	0.405	0.1150	4.92E-07	-6.308	450	0.450	0.1600	7.13E-07	-6.147

mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
453	0.453	0.1630	7.33E-07	-6.135	497	0.497	0.2070	1.05E-06	-5.981
454	0.454	0.1640	7.39E-07	-6.131	498	0.498	0.2080	1.06E-06	-5.977
455	0.455	0.1650	7.44E-07	-6.128	499	0.499	0.2090	1.07E-06	-5.972
456	0.456	0.1660	7.48E-07	-6.126	500	0.500	0.2100	1.08E-06	-5.967
457	0.457	0.1670	7.52E-07	-6.124	501	0.501	0.2110	1.09E-06	-5.963
458	0.458	0.1680	7.55E-07	-6.122	502	0.502	0.2120	1.10E-06	-5.959
459	0.459	0.1690	7.60E-07	-6.119	503	0.503	0.2130	1.11E-06	-5.955
460	0.460	0.1700	7.65E-07	-6.116	504	0.504	0.2140	1.12E-06	-5.951
461	0.461	0.1710	7.68E-07	-6.114	505	0.505	0.2150	1.13E-06	-5.946
462	0.462	0.1720	7.72E-07	-6.113	506	0.506	0.2160	1.14E-06	-5.941
463	0.463	0.1730	7.75E-07	-6.111	507	0.507	0.2170	1.16E-06	-5.937
464	0.464	0.1740	7.80E-07	-6.108	508	0.508	0.2180	1.17E-06	-5.933
465	0.465	0.1750	7.86E-07	-6.104	509	0.509	0.2190	1.18E-06	-5.927
466	0.466	0.1760	7.92E-07	-6.101	510	0.510	0.2200	1.20E-06	-5.922
467	0.467	0.1770	7.99E-07	-6.098	511	0.511	0.2210	1.21E-06	-5.917
468	0.468	0.1780	8.06E-07	-6.094	512	0.512	0.2220	1.22E-06	-5.912
469	0.469	0.1790	8.15E-07	-6.089	513	0.513	0.2230	1.24E-06	-5.908
470	0.470	0.1800	8.24E-07	-6.084	514	0.514	0.2240	1.25E-06	-5.903
471	0.471	0.1810	8.32E-07	-6.080	515	0.515	0.2250	1.27E-06	-5.898
472	0.472	0.1820	8.36E-07	-6.078	516	0.516	0.2260	1.28E-06	-5.894
473	0.473	0.1830	8.41E-07	-6.075	517	0.517	0.2270	1.29E-06	-5.889
474	0.474	0.1840	8.48E-07	-6.072	518	0.518	0.2280	1.31E-06	-5.884
475	0.475	0.1850	8.56E-07	-6.067	519	0.519	0.2290	1.32E-06	-5.879
476	0.476	0.1860	8.62E-07	-6.064	520	0.520	0.2300	1.34E-06	-5.874
477	0.477	0.1870	8.68E-07	-6.061	521	0.521	0.2310	1.35E-06	-5.868
478	0.478	0.1880	8.77E-07	-6.057	522	0.522	0.2320	1.37E-06	-5.862
479	0.479	0.1890	8.87E-07	-6.052	523	0.523	0.2330	1.39E-06	-5.857
480	0.480	0.1900	8.95E-07	-6.048	524	0.524	0.2340	1.41E-06	-5.852
481	0.481	0.1910	9.04E-07	-6.044	525	0.525	0.2350	1.42E-06	-5.847
482	0.482	0.1920	9.11E-07	-6.041	526	0.526	0.2360	1.44E-06	-5.842
483	0.483	0.1930	9.17E-07	-6.037	527	0.527	0.2370	1.46E-06	-5.837
484	0.484	0.1940	9.25E-07	-6.034	528	0.528	0.2380	1.48E-06	-5.831
485	0.485	0.1950	9.32E-07	-6.031	529	0.529	0.2390	1.49E-06	-5.827
486	0.486	0.1960	9.38E-07	-6.028	530	0.530	0.2400	1.51E-06	-5.821
487	0.487	0.1970	9.46E-07	-6.024	531	0.531	0.2410	1.53E-06	-5.816
488	0.488	0.1980	9.54E-07	-6.021	532	0.532	0.2420	1.55E-06	-5.810
489	0.489	0.1990	9.63E-07	-6.016	533	0.533	0.2430	1.57E-06	-5.805
490	0.490	0.2000	9.72E-07	-6.012	534	0.534	0.2440	1.59E-06	-5.799
491	0.491	0.2010	9.83E-07	-6.007	535	0.535	0.2450	1.61E-06	-5.794
492	0.492	0.2020	9.92E-07	-6.003	536	0.536	0.2460	1.63E-06	-5.789
493	0.493	0.2030	1.00E-06	-5.999	537	0.537	0.2470	1.65E-06	-5.783
494	0.494	0.2040	1.01E-06	-5.994	538	0.538	0.2480	1.67E-06	-5.778
495	0.495	0.2050	1.02E-06	-5.990	539	0.539	0.2490	1.69E-06	-5.772

mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
496	0.496	0.2060	1.03E-06	-5.986	540	0.540	0.2500	1.71E-06	-5.767
542	0.542	0.2520	1.76E-06	-5.755	587	0.587	0.2970	3.31E-06	-5.481
543	0.543	0.2530	1.78E-06	-5.750	588	0.588	0.2980	3.36E-06	-5.474
544	0.544	0.2540	1.80E-06	-5.744	589	0.589	0.2990	3.41E-06	-5.467
545	0.545	0.2550	1.83E-06	-5.739	590	0.590	0.3000	3.46E-06	-5.461
546	0.546	0.2560	1.85E-06	-5.733	591	0.591	0.3010	3.51E-06	-5.454
547	0.547	0.2570	1.87E-06	-5.727	592	0.592	0.3020	3.57E-06	-5.447
548	0.548	0.2580	1.90E-06	-5.722	593	0.593	0.3030	3.63E-06	-5.440
549	0.549	0.2590	1.92E-06	-5.716	594	0.594	0.3040	3.69E-06	-5.433
550	0.550	0.2600	1.95E-06	-5.710	595	0.595	0.3050	3.75E-06	-5.426
551	0.551	0.2610	1.98E-06	-5.704	596	0.596	0.3060	3.82E-06	-5.418
552	0.552	0.2620	2.00E-06	-5.698	597	0.597	0.3070	3.88E-06	-5.411
553	0.553	0.2630	2.03E-06	-5.692	598	0.598	0.3080	3.95E-06	-5.404
554	0.554	0.2640	2.06E-06	-5.686	599	0.599	0.3090	4.02E-06	-5.396
555	0.555	0.2650	2.09E-06	-5.680	600	0.600	0.3100	4.09E-06	-5.389
556	0.556	0.2660	2.12E-06	-5.674	601	0.601	0.3110	4.16E-06	-5.381
557	0.557	0.2670	2.15E-06	-5.668	602	0.602	0.3120	4.23E-06	-5.373
558	0.558	0.2680	2.18E-06	-5.662	603	0.603	0.3130	4.31E-06	-5.366
559	0.559	0.2690	2.21E-06	-5.656	604	0.604	0.3140	4.39E-06	-5.358
560	0.560	0.2700	2.24E-06	-5.651	605	0.605	0.3150	4.47E-06	-5.350
561	0.561	0.2710	2.26E-06	-5.645	606	0.606	0.3160	4.56E-06	-5.341
562	0.562	0.2720	2.30E-06	-5.639	607	0.607	0.3170	4.64E-06	-5.333
563	0.563	0.2730	2.33E-06	-5.633	608	0.608	0.3180	4.73E-06	-5.325
564	0.564	0.2740	2.36E-06	-5.627	609	0.609	0.3190	4.82E-06	-5.317
565	0.565	0.2750	2.39E-06	-5.621	610	0.610	0.3200	4.91E-06	-5.309
566	0.566	0.2760	2.42E-06	-5.615	611	0.611	0.3210	5.00E-06	-5.301
567	0.567	0.2770	2.46E-06	-5.609	612	0.612	0.3220	5.10E-06	-5.293
568	0.568	0.2780	2.50E-06	-5.603	613	0.613	0.3230	5.20E-06	-5.284
569	0.569	0.2790	2.53E-06	-5.596	614	0.614	0.3240	5.30E-06	-5.276
570	0.570	0.2800	2.57E-06	-5.590	615	0.615	0.3250	5.41E-06	-5.267
571	0.571	0.2810	2.60E-06	-5.584	616	0.616	0.3260	5.52E-06	-5.258
572	0.572	0.2820	2.64E-06	-5.578	617	0.617	0.3270	5.63E-06	-5.249
573	0.573	0.2830	2.68E-06	-5.572	618	0.618	0.3280	5.75E-06	-5.240
574	0.574	0.2840	2.72E-06	-5.566	619	0.619	0.3290	5.87E-06	-5.231
575	0.575	0.2850	2.75E-06	-5.560	620	0.620	0.3300	6.00E-06	-5.222
576	0.576	0.2860	2.79E-06	-5.554	621	0.621	0.3310	6.13E-06	-5.212
577	0.577	0.2870	2.84E-06	-5.547	622	0.622	0.3320	6.27E-06	-5.203
578	0.578	0.2880	2.88E-06	-5.541	623	0.623	0.3330	6.40E-06	-5.194
579	0.579	0.2890	2.92E-06	-5.534	624	0.624	0.3340	6.55E-06	-5.184
580	0.580	0.2900	2.97E-06	-5.527	625	0.625	0.3350	6.70E-06	-5.174
581	0.581	0.2910	3.02E-06	-5.521	626	0.626	0.3360	6.86E-06	-5.164
582	0.582	0.2920	3.06E-06	-5.514	627	0.627	0.3370	7.02E-06	-5.154
583	0.583	0.2930	3.11E-06	-5.508	628	0.628	0.3380	7.19E-06	-5.143

mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eq (mV)	i(A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
584	0.584	0.2940	3.16E-06	-5.501	629	0.629	0.3390	7.36E-06	-5.133
585	0.585	0.2950	3.21E-06	-5.494	630	0.630	0.3400	7.54E-06	-5.123
586	0.586	0.2960	3.26E-06	-5.487	631	0.631	0.3410	7.73E-06	-5.112
632	0.632	0.3420	7.93E-06	-5.101	658	0.658	0.3680	1.84E-05	-4.736
633	0.633	0.3430	8.13E-06	-5.090	659	0.659	0.3690	1.92E-05	-4.718
634	0.634	0.3440	8.34E-06	-5.079	660	0.660	0.3700	2.00E-05	-4.699
635	0.635	0.3450	8.57E-06	-5.067	661	0.661	0.3710	2.09E-05	-4.681
637	0.637	0.3470	9.04E-06	-5.044	663	0.663	0.3730	2.28E-05	-4.643
638	0.638	0.3480	9.30E-06	-5.032	664	0.664	0.3740	2.38E-05	-4.623
640	0.640	0.3500	9.84E-06	-5.007	666	0.666	0.3760	2.61E-05	-4.584
641	0.641	0.3510	1.01E-05	-4.994	667	0.667	0.3770	2.73E-05	-4.564
643	0.643	0.3530	1.08E-05	-4.968	669	0.669	0.3790	3.00E-05	-4.523
644	0.644	0.3540	1.11E-05	-4.954	670	0.670	0.3800	3.15E-05	-4.502
647	0.647	0.3570	1.22E-05	-4.913	673	0.673	0.3830	3.63E-05	-4.440
648	0.648	0.3580	1.26E-05	-4.898	674	0.674	0.3840	3.81E-05	-4.419
650	0.650	0.3600	1.35E-05	-4.868	676	0.676	0.3860	4.12E-05	-4.385
652	0.652	0.3620	1.46E-05	-4.837	678	0.678	0.3880	4.33E-05	-4.363
653	0.653	0.3630	1.51E-05	-4.821	679	0.679	0.3890	4.40E-05	-4.357
654	0.654	0.3640	1.57E-05	-4.805	680	0.680	0.3900	4.44E-05	-4.353
655	0.655	0.3650	1.63E-05	-4.788	681	0.681	0.3910	4.44E-05	-4.352
656	0.656	0.3660	1.70E-05	-4.771	682	0.682	0.3920	4.44E-05	-4.352
657	0.657	0.3670	1.76E-05	-4.753	683	0.683	0.3930	4.44E-05	-4.352

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla A.2: Datos curva de polarización anódica de la pirita.

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
330	0.33	-0.01	-9.57E-09	-8.02	345	0.345	0.005	3.08E-09	-8.51
331	0.331	-0.009	-8.73E-09	-8.06	346	0.346	0.006	3.92E-09	-8.41
332	0.332	-0.008	-7.88E-09	-8.10	347	0.347	0.007	4.76E-09	-8.32
333	0.333	-0.007	-7.04E-09	-8.15	348	0.348	0.008	5.60E-09	-8.25
334	0.334	-0.006	-6.20E-09	-8.21	349	0.349	0.009	6.45E-09	-8.19
335	0.335	-0.005	-5.35E-09	-8.27	350	0.35	0.01	7.29E-09	-8.14
336	0.336	-0.004	-4.51E-09	-8.35	351	0.351	0.011	8.13E-09	-8.09
337	0.337	-0.003	-3.67E-09	-8.44	352	0.352	0.012	8.98E-09	-8.05
338	0.338	-0.002	-2.83E-09	-8.55	353	0.353	0.013	9.82E-09	-8.01
339	0.339	-0.001	-1.98E-09	-8.70	354	0.354	0.014	1.07E-08	-7.97
340	0.34	0	-1.14E-09	-8.94	355	0.355	0.015	1.15E-08	-7.94
341	0.341	0.001	-2.96E-10	-9.53	356	0.356	0.016	1.23E-08	-7.91
342	0.342	0.002	5.47E-10	-9.26	357	0.357	0.017	1.32E-08	-7.88
343	0.343	0.003	1.39E-09	-8.86	358	0.358	0.018	1.40E-08	-7.85
344	0.344	0.004	2.23E-09	-8.65	359	0.359	0.019	1.49E-08	-7.83

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
360	0.36	0.02	1.57E-08	-7.80	403	0.403	0.063	5.29E-08	-7.28
361	0.361	0.021	1.66E-08	-7.78	404	0.404	0.064	5.40E-08	-7.27
362	0.362	0.022	1.74E-08	-7.76	405	0.405	0.065	5.51E-08	-7.26
363	0.363	0.023	1.82E-08	-7.74	406	0.406	0.066	5.61E-08	-7.25
364	0.364	0.024	1.91E-08	-7.72	407	0.407	0.067	5.72E-08	-7.24
365	0.365	0.025	1.99E-08	-7.70	408	0.408	0.068	5.84E-08	-7.23
366	0.366	0.026	2.08E-08	-7.68	409	0.409	0.069	5.95E-08	-7.23
367	0.367	0.027	2.16E-08	-7.67	410	0.41	0.07	6.07E-08	-7.22
368	0.368	0.028	2.25E-08	-7.65	411	0.411	0.071	6.19E-08	-7.21
369	0.369	0.029	2.33E-08	-7.63	412	0.412	0.072	6.31E-08	-7.20
370	0.37	0.03	2.42E-08	-7.62	413	0.413	0.073	6.44E-08	-7.19
371	0.371	0.031	2.50E-08	-7.60	414	0.414	0.074	6.56E-08	-7.18
372	0.372	0.032	2.58E-08	-7.59	415	0.415	0.075	6.69E-08	-7.17
373	0.373	0.033	2.67E-08	-7.57	416	0.416	0.076	6.83E-08	-7.17
374	0.374	0.034	2.75E-08	-7.56	417	0.417	0.077	6.96E-08	-7.16
375	0.375	0.035	2.84E-08	-7.55	418	0.418	0.078	7.10E-08	-7.15
376	0.376	0.036	2.92E-08	-7.53	419	0.419	0.079	7.24E-08	-7.14
377	0.377	0.037	3.01E-08	-7.52	420	0.42	0.08	7.38E-08	-7.13
378	0.378	0.038	3.09E-08	-7.51	421	0.421	0.081	7.53E-08	-7.12
379	0.379	0.039	3.17E-08	-7.50	422	0.422	0.082	7.68E-08	-7.11
380	0.38	0.04	3.26E-08	-7.49	423	0.423	0.083	7.83E-08	-7.11
381	0.381	0.041	3.34E-08	-7.48	424	0.424	0.084	7.98E-08	-7.10
382	0.382	0.042	3.43E-08	-7.47	425	0.425	0.085	8.14E-08	-7.09
383	0.383	0.043	3.51E-08	-7.45	426	0.426	0.086	8.30E-08	-7.08
385	0.385	0.045	3.72E-08	-7.43	428	0.428	0.088	8.63E-08	-7.06
386	0.386	0.046	3.80E-08	-7.42	429	0.429	0.089	8.80E-08	-7.06
387	0.387	0.047	3.87E-08	-7.41	430	0.43	0.09	8.98E-08	-7.05
388	0.388	0.048	3.95E-08	-7.40	431	0.431	0.091	9.15E-08	-7.04
389	0.389	0.049	4.03E-08	-7.40	432	0.432	0.092	9.33E-08	-7.03
390	0.39	0.05	4.11E-08	-7.39	433	0.433	0.093	9.52E-08	-7.02
391	0.391	0.051	4.19E-08	-7.38	434	0.434	0.094	9.71E-08	-7.01
392	0.392	0.052	4.27E-08	-7.37	435	0.435	0.095	1.01E-07	-7.00
393	0.393	0.053	4.35E-08	-7.36	436	0.436	0.096	1.03E-07	-6.99
394	0.394	0.054	4.44E-08	-7.35	437	0.437	0.097	1.05E-07	-6.98
395	0.395	0.055	4.53E-08	-7.34	438	0.438	0.098	1.07E-07	-6.97
396	0.396	0.056	4.62E-08	-7.34	439	0.439	0.099	1.09E-07	-6.96
397	0.397	0.057	4.71E-08	-7.33	440	0.44	0.1	1.11E-07	-6.95
398	0.398	0.058	4.80E-08	-7.32	441	0.441	0.101	1.13E-07	-6.95
399	0.399	0.059	4.90E-08	-7.31	442	0.442	0.102	1.16E-07	-6.94
400	0.4	0.06	4.99E-08	-7.30	443	0.443	0.103	1.18E-07	-6.93
401	0.401	0.061	5.09E-08	-7.29	444	0.444	0.104	1.20E-07	-6.92
402	0.402	0.062	5.19E-08	-7.28	445	0.445	0.105	1.23E-07	-6.91

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
448	0.448	0.108	1.30E-07	-6.89	491	0.491	1.51E-01	2.87E-07	-6.54
449	0.449	0.109	1.33E-07	-6.88	492	0.492	1.52E-01	2.94E-07	-6.53
450	0.45	0.11	1.35E-07	-6.87	493	0.493	1.53E-01	3.00E-07	-6.52
451	0.451	0.111	1.38E-07	-6.86	494	0.494	1.54E-01	3.05E-07	-6.52
452	0.452	0.112	1.41E-07	-6.85	495	0.495	1.55E-01	3.12E-07	-6.51
453	0.453	0.113	1.43E-07	-6.84	496	0.496	1.56E-01	3.20E-07	-6.50
454	0.454	0.114	1.46E-07	-6.83	497	0.497	1.57E-01	3.25E-07	-6.49
455	0.455	0.115	1.49E-07	-6.83	498	0.498	1.58E-01	3.29E-07	-6.48
456	0.456	0.116	1.52E-07	-6.82	499	0.499	1.59E-01	3.33E-07	-6.48
457	0.457	0.117	1.55E-07	-6.81	500	0.5	1.60E-01	3.37E-07	-6.47
458	0.458	0.118	1.58E-07	-6.80	501	0.501	1.61E-01	3.42E-07	-6.47
459	0.459	0.119	1.61E-07	-6.79	502	0.502	1.62E-01	3.45E-07	-6.46
460	0.46	0.12	1.65E-07	-6.78	503	0.503	1.63E-01	3.49E-07	-6.46
461	0.461	0.121	1.68E-07	-6.78	504	0.504	1.64E-01	3.53E-07	-6.45
462	0.462	0.122	1.71E-07	-6.77	505	0.505	1.65E-01	3.60E-07	-6.44
463	0.463	0.123	1.74E-07	-6.76	506	0.506	1.66E-01	3.67E-07	-6.44
464	0.464	0.124	1.78E-07	-6.75	507	0.507	1.67E-01	3.73E-07	-6.43
465	0.465	0.125	1.81E-07	-6.74	508	0.508	1.68E-01	3.80E-07	-6.42
466	0.466	0.126	1.85E-07	-6.73	509	0.509	1.69E-01	3.87E-07	-6.41
467	0.467	0.127	1.95E-07	-6.71	510	0.51	1.70E-01	3.94E-07	-6.40
468	0.468	0.128	1.95E-07	-6.71	511	0.511	1.71E-01	4.00E-07	-6.40
469	0.469	0.129	1.96E-07	-6.71	512	0.512	1.72E-01	4.06E-07	-6.39
470	0.47	0.13	2.00E-07	-6.70	513	0.513	1.73E-01	4.14E-07	-6.38
471	0.471	0.131	2.03E-07	-6.69	514	0.514	1.74E-01	4.21E-07	-6.38
472	0.472	0.132	2.05E-07	-6.69	515	0.515	1.75E-01	4.27E-07	-6.37
473	0.473	0.133	2.08E-07	-6.68	516	0.516	1.76E-01	4.34E-07	-6.36
474	0.474	0.134	2.12E-07	-6.67	517	0.517	1.77E-01	4.42E-07	-6.35
475	0.475	0.135	2.17E-07	-6.66	518	0.518	1.78E-01	4.50E-07	-6.35
476	0.476	0.136	2.21E-07	-6.65	519	0.519	1.79E-01	4.57E-07	-6.34
477	0.477	0.137	2.27E-07	-6.64	520	0.52	1.80E-01	4.62E-07	-6.33
478	0.478	1.38E-01	2.32E-07	-6.64	521	0.521	1.81E-01	4.68E-07	-6.33
479	0.479	1.39E-01	2.37E-07	-6.63	522	0.522	1.82E-01	4.75E-07	-6.32
480	0.48	1.40E-01	2.42E-07	-6.62	523	0.523	1.83E-01	4.81E-07	-6.32
481	0.481	1.41E-01	2.48E-07	-6.61	524	0.524	1.84E-01	4.87E-07	-6.31
482	0.482	1.42E-01	2.53E-07	-6.60	525	0.525	1.85E-01	4.94E-07	-6.31
483	0.483	1.43E-01	2.57E-07	-6.59	526	0.526	1.86E-01	5.02E-07	-6.30
484	0.484	1.44E-01	2.60E-07	-6.59	527	0.527	1.87E-01	5.09E-07	-6.29
485	0.485	1.45E-01	2.62E-07	-6.58	528	0.528	1.88E-01	5.19E-07	-6.28
486	0.486	1.46E-01	2.66E-07	-6.57	529	0.529	1.89E-01	5.27E-07	-6.28
487	0.487	1.47E-01	2.71E-07	-6.57	530	0.53	1.90E-01	5.35E-07	-6.27
488	0.488	1.48E-01	2.73E-07	-6.56	531	0.531	1.91E-01	5.44E-07	-6.26
489	0.489	1.49E-01	2.76E-07	-6.56	532	0.532	1.92E-01	5.51E-07	-6.26
490	0.49	1.50E-01	2.81E-07	-6.55	533	0.533	1.93E-01	5.59E-07	-6.25

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
536	0.536	1.96E-01	5.88E-07	-6.23	579	0.579	2.39E-01	1.22E-06	-5.91
537	0.537	1.97E-01	5.97E-07	-6.22	580	0.58	2.40E-01	1.25E-06	-5.90
538	0.538	1.98E-01	6.07E-07	-6.22	581	0.581	2.41E-01	1.27E-06	-5.90
539	0.539	1.99E-01	6.18E-07	-6.21	582	0.582	2.42E-01	1.29E-06	-5.89
540	0.54	2.00E-01	6.26E-07	-6.20	583	0.583	2.43E-01	1.32E-06	-5.88
541	0.541	2.01E-01	6.35E-07	-6.20	584	0.584	2.44E-01	1.34E-06	-5.87
542	0.542	2.02E-01	6.46E-07	-6.19	585	0.585	2.45E-01	1.37E-06	-5.86
543	0.543	2.03E-01	6.55E-07	-6.18	586	0.586	2.46E-01	1.40E-06	-5.85
544	0.544	2.04E-01	6.66E-07	-6.18	587	0.587	2.47E-01	1.42E-06	-5.85
545	0.545	2.05E-01	6.76E-07	-6.17	588	0.588	2.48E-01	1.45E-06	-5.84
546	0.546	2.06E-01	6.89E-07	-6.16	589	0.589	2.49E-01	1.48E-06	-5.83
547	0.547	2.07E-01	7.03E-07	-6.15	590	0.59	2.50E-01	1.51E-06	-5.82
548	0.548	2.08E-01	7.15E-07	-6.15	591	0.591	2.51E-01	1.54E-06	-5.81
549	0.549	2.09E-01	7.27E-07	-6.14	592	0.592	2.52E-01	1.57E-06	-5.80
550	0.55	2.10E-01	7.38E-07	-6.13	593	0.593	2.53E-01	1.60E-06	-5.80
551	0.551	2.11E-01	7.51E-07	-6.12	594	0.594	2.54E-01	1.64E-06	-5.79
552	0.552	2.12E-01	7.64E-07	-6.12	595	0.595	2.55E-01	1.67E-06	-5.78
553	0.553	2.13E-01	7.77E-07	-6.11	596	0.596	2.56E-01	1.70E-06	-5.77
554	0.554	2.14E-01	7.89E-07	-6.10	597	0.597	2.57E-01	1.73E-06	-5.76
555	0.555	2.15E-01	8.01E-07	-6.10	598	0.598	2.58E-01	1.77E-06	-5.75
556	0.556	2.16E-01	8.15E-07	-6.09	599	0.599	2.59E-01	1.80E-06	-5.74
557	0.557	2.17E-01	8.30E-07	-6.08	600	0.6	2.60E-01	1.84E-06	-5.74
558	0.558	2.18E-01	8.45E-07	-6.07	601	0.601	2.61E-01	1.88E-06	-5.73
559	0.559	2.19E-01	8.60E-07	-6.07	602	0.602	2.62E-01	1.92E-06	-5.72
560	0.56	2.20E-01	8.74E-07	-6.06	603	0.603	2.63E-01	1.96E-06	-5.71
561	0.561	2.21E-01	8.87E-07	-6.05	604	0.604	2.64E-01	2.00E-06	-5.70
562	0.562	2.22E-01	9.04E-07	-6.04	605	0.605	2.65E-01	2.04E-06	-5.69
563	0.563	2.23E-01	9.20E-07	-6.04	606	0.606	2.66E-01	2.08E-06	-5.68
564	0.564	2.24E-01	9.36E-07	-6.03	607	0.607	2.67E-01	2.12E-06	-5.67
565	0.565	2.25E-01	9.53E-07	-6.02	608	0.608	2.68E-01	2.17E-06	-5.66
566	0.566	2.26E-01	9.70E-07	-6.01	609	0.609	2.69E-01	2.21E-06	-5.65
567	0.567	2.27E-01	9.88E-07	-6.01	610	0.61	2.70E-01	2.26E-06	-5.65
568	0.568	2.28E-01	1.01E-06	-6.00	611	0.611	2.71E-01	2.31E-06	-5.64
569	0.569	2.29E-01	1.02E-06	-5.99	612	0.612	2.72E-01	2.36E-06	-5.63
570	0.57	2.30E-01	1.04E-06	-5.98	613	0.613	2.73E-01	2.41E-06	-5.62
571	0.571	2.31E-01	1.06E-06	-5.97	614	0.614	2.74E-01	2.46E-06	-5.61
572	0.572	2.32E-01	1.08E-06	-5.97	615	0.615	2.75E-01	2.51E-06	-5.60
573	0.573	2.33E-01	1.10E-06	-5.96	616	0.616	2.76E-01	2.57E-06	-5.59
574	0.574	2.34E-01	1.12E-06	-5.95	617	0.617	2.77E-01	2.63E-06	-5.58
575	0.575	2.35E-01	1.14E-06	-5.94	618	0.618	2.78E-01	2.68E-06	-5.57
576	0.576	2.36E-01	1.16E-06	-5.94	619	0.619	2.79E-01	2.74E-06	-5.56
577	0.577	2.37E-01	1.18E-06	-5.93	620	0.62	2.80E-01	2.80E-06	-5.55
578	0.578	2.38E-01	1.20E-06	-5.92	621	0.621	2.81E-01	2.86E-06	-5.54

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
624	0.624	2.84E-01	3.06E-06	-5.51	656	0.656	3.16E-01	6.59E-06	-5.18
625	0.625	2.85E-01	3.13E-06	-5.50	657	0.657	3.17E-01	6.76E-06	-5.17
626	0.626	2.86E-01	3.20E-06	-5.49	660	0.66	3.20E-01	7.31E-06	-5.14
627	0.627	2.87E-01	3.27E-06	-5.49	661	0.661	3.21E-01	7.51E-06	-5.12
628	0.628	2.88E-01	3.35E-06	-5.48	662	0.662	3.22E-01	7.71E-06	-5.11
629	0.629	2.89E-01	3.43E-06	-5.47	663	0.663	3.23E-01	7.92E-06	-5.10
630	0.63	2.90E-01	3.51E-06	-5.46	664	0.664	3.24E-01	8.14E-06	-5.09
631	0.631	2.91E-01	3.59E-06	-5.45	665	0.665	3.25E-01	8.36E-06	-5.08
632	0.632	2.92E-01	3.67E-06	-5.44	666	0.666	3.26E-01	8.59E-06	-5.07
633	0.633	2.93E-01	3.76E-06	-5.43	667	0.667	3.27E-01	8.83E-06	-5.05
634	0.634	2.94E-01	3.84E-06	-5.42	668	0.668	3.28E-01	9.07E-06	-5.04
635	0.635	2.95E-01	3.93E-06	-5.41	669	0.669	3.29E-01	9.33E-06	-5.03
636	0.636	2.96E-01	4.03E-06	-5.39	670	0.67	3.30E-01	9.59E-06	-5.02
637	0.637	2.97E-01	4.12E-06	-5.38	671	0.671	3.31E-01	9.86E-06	-5.01
638	0.638	2.98E-01	4.23E-06	-5.37	672	0.672	3.32E-01	1.01E-05	-4.99
639	0.639	2.99E-01	4.32E-06	-5.36	673	0.673	3.33E-01	1.04E-05	-4.98
640	0.64	3.00E-01	4.43E-06	-5.35	674	0.674	3.34E-01	1.07E-05	-4.97
641	0.641	3.01E-01	4.54E-06	-5.34	675	0.675	3.35E-01	1.10E-05	-4.96
642	0.642	3.02E-01	4.65E-06	-5.33	676	0.676	3.36E-01	1.14E-05	-4.94
643	0.643	3.03E-01	4.77E-06	-5.32	677	0.677	3.37E-01	1.17E-05	-4.93
644	0.644	3.04E-01	4.88E-06	-5.31	678	0.678	3.38E-01	1.20E-05	-4.92
645	0.645	3.05E-01	5.00E-06	-5.30	679	0.679	3.39E-01	1.24E-05	-4.91
646	0.646	3.06E-01	5.13E-06	-5.29	680	0.68	3.40E-01	1.28E-05	-4.89
647	0.647	3.07E-01	5.26E-06	-5.28	681	0.681	3.41E-01	1.31E-05	-4.88
649	0.649	3.09E-01	5.51E-06	-5.26	683	0.683	3.43E-01	1.39E-05	-4.86
650	0.65	3.10E-01	5.66E-06	-5.25	684	0.684	3.44E-01	1.44E-05	-4.84
651	0.651	3.11E-01	5.80E-06	-5.24	685	0.685	3.45E-01	1.48E-05	-4.83
652	0.652	3.12E-01	5.95E-06	-5.23	686	0.686	3.46E-01	1.53E-05	-4.82
653	0.653	3.13E-01	6.10E-06	-5.21	687	0.687	3.47E-01	1.57E-05	-4.80
654	0.654	3.14E-01	6.26E-06	-5.20	688	0.688	3.48E-01	1.62E-05	-4.79
655	0.655	3.15E-01	6.42E-06	-5.19	689	0.689	3.49E-01	1.67E-05	-4.78

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla A.3: Datos curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre la calcopirita.

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
290	0.29	-0.390	-3.8E-05	-4.42	296	0.296	-0.384	-3.4E-05	-4.46
291	0.291	-0.389	-3.8E-05	-4.42	297	0.297	-0.383	-3.4E-05	-4.47
292	0.292	-0.388	-3.7E-05	-4.43	298	0.298	-0.382	-3.3E-05	-4.48
293	0.293	-0.387	-3.6E-05	-4.44	299	0.299	-0.381	-3.3E-05	-4.49
294	0.294	-0.386	-3.6E-05	-4.45	300	0.3	-0.380	-3.2E-05	-4.50
295	0.295	-0.385	-3.5E-05	-4.45	301	0.301	-0.379	-3.1E-05	-4.50

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
302	0.302	-0.378	-3.1E-05	-4.51	345	0.345	-0.335	-1.3E-05	-4.89
303	0.303	-0.377	-3.0E-05	-4.52	346	0.346	-0.334	-1.3E-05	-4.90
304	0.304	-0.376	-3.0E-05	-4.53	347	0.347	-0.333	-1.2E-05	-4.90
305	0.305	-0.375	-2.9E-05	-4.54	348	0.348	-0.332	-1.2E-05	-4.91
306	0.306	-0.374	-2.8E-05	-4.55	349	0.349	-0.331	-1.2E-05	-4.92
307	0.307	-0.373	-2.8E-05	-4.56	350	0.35	-0.330	-1.2E-05	-4.93
308	0.308	-0.372	-2.7E-05	-4.56	351	0.351	-0.329	-1.1E-05	-4.94
309	0.309	-0.371	-2.7E-05	-4.57	352	0.352	-0.328	-1.1E-05	-4.95
310	0.31	-0.370	-2.6E-05	-4.58	353	0.353	-0.327	-1.1E-05	-4.96
311	0.311	-0.369	-2.6E-05	-4.59	354	0.354	-0.326	-1.1E-05	-4.97
312	0.312	-0.368	-2.5E-05	-4.60	355	0.355	-0.325	-1.1E-05	-4.98
313	0.313	-0.367	-2.5E-05	-4.61	356	0.356	-0.324	-1.0E-05	-4.99
314	0.314	-0.366	-2.4E-05	-4.61	357	0.357	-0.323	-1.0E-05	-5.00
315	0.315	-0.365	-2.4E-05	-4.62	358	0.358	-0.322	-9.9E-06	-5.00
316	0.316	-0.364	-2.3E-05	-4.63	359	0.359	-0.321	-9.7E-06	-5.01
317	0.317	-0.363	-2.3E-05	-4.64	360	0.36	-0.320	-9.5E-06	-5.02
318	0.318	-0.362	-2.2E-05	-4.65	361	0.361	-0.319	-9.3E-06	-5.03
319	0.319	-0.361	-2.2E-05	-4.66	362	0.362	-0.318	-9.1E-06	-5.04
320	0.32	-0.360	-2.2E-05	-4.67	363	0.363	-0.317	-8.9E-06	-5.05
321	0.321	-0.359	-2.1E-05	-4.67	364	0.364	-0.316	-8.7E-06	-5.06
322	0.322	-0.358	-2.1E-05	-4.68	365	0.365	-0.315	-8.6E-06	-5.07
323	0.323	-0.357	-2.0E-05	-4.69	366	0.366	-0.314	-8.4E-06	-5.08
324	0.324	-0.356	-2.0E-05	-4.70	367	0.367	-0.313	-8.2E-06	-5.09
325	0.325	-0.355	-2.0E-05	-4.71	368	0.368	-0.312	-8.0E-06	-5.09
326	0.326	-0.354	-1.9E-05	-4.72	369	0.369	-0.311	-7.9E-06	-5.10
327	0.327	-0.353	-1.9E-05	-4.73	370	0.37	-0.310	-7.7E-06	-5.11
328	0.328	-0.352	-1.8E-05	-4.74	371	0.371	-0.309	-7.6E-06	-5.12
329	0.329	-0.351	-1.8E-05	-4.74	372	0.372	-0.308	-7.4E-06	-5.13
330	0.33	-0.350	-1.8E-05	-4.75	373	0.373	-0.307	-7.2E-06	-5.14
331	0.331	-0.349	-1.7E-05	-4.76	374	0.374	-0.306	-7.1E-06	-5.15
332	0.332	-0.348	-1.7E-05	-4.77	375	0.375	-0.305	-6.9E-06	-5.16
333	0.333	-0.347	-1.7E-05	-4.78	376	0.376	-0.304	-6.8E-06	-5.17
334	0.334	-0.346	-1.6E-05	-4.79	377	0.377	-0.303	-6.7E-06	-5.18
335	0.335	-0.345	-1.6E-05	-4.80	378	0.378	-0.302	-6.5E-06	-5.18
336	0.336	-0.344	-1.6E-05	-4.81	379	0.379	-0.301	-6.4E-06	-5.19
337	0.337	-0.343	-1.5E-05	-4.82	380	0.38	-0.300	-6.3E-06	-5.20
338	0.338	-0.342	-1.5E-05	-4.82	381	0.381	-0.299	-6.1E-06	-5.21
339	0.339	-0.341	-1.5E-05	-4.83	382	0.382	-0.298	-6.0E-06	-5.22
340	0.34	-0.340	-1.4E-05	-4.84	383	0.383	-0.297	-5.9E-06	-5.23
341	0.341	-0.339	-1.4E-05	-4.85	384	0.384	-0.296	-5.8E-06	-5.24
342	0.342	-0.338	-1.4E-05	-4.86	385	0.385	-0.295	-5.7E-06	-5.25
343	0.343	-0.337	-1.4E-05	-4.87	386	0.386	-0.294	-5.5E-06	-5.26
344	0.344	-0.336	-1.3E-05	-4.88	387	0.387	-0.293	-5.4E-06	-5.26

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
388	0.388	-0.292	-5.3E-06	-5.27	431	0.431	-0.249	-2.4E-06	-5.63
389	0.389	-0.291	-5.2E-06	-5.28	432	0.432	-0.248	-2.3E-06	-5.63
390	0.39	-0.290	-5.1E-06	-5.29	433	0.433	-0.247	-2.3E-06	-5.64
391	0.391	-0.289	-5.0E-06	-5.30	434	0.434	-0.246	-2.2E-06	-5.65
392	0.392	-0.288	-4.9E-06	-5.31	435	0.435	-0.245	-2.2E-06	-5.66
393	0.393	-0.287	-4.8E-06	-5.32	436	0.436	-0.244	-2.2E-06	-5.66
394	0.394	-0.286	-4.7E-06	-5.33	437	0.437	-0.243	-2.1E-06	-5.67
395	0.395	-0.285	-4.6E-06	-5.34	438	0.438	-0.242	-2.1E-06	-5.68
396	0.396	-0.284	-4.5E-06	-5.34	439	0.439	-0.241	-2.1E-06	-5.68
397	0.397	-0.283	-4.4E-06	-5.35	440	0.44	-0.240	-2.0E-06	-5.69
398	0.398	-0.282	-4.4E-06	-5.36	441	0.441	-0.239	-2.0E-06	-5.70
399	0.399	-0.281	-4.3E-06	-5.37	442	0.442	-0.238	-2.0E-06	-5.70
400	0.4	-0.280	-4.2E-06	-5.38	443	0.443	-0.237	-1.9E-06	-5.71
401	0.401	-0.279	-4.1E-06	-5.39	444	0.444	-0.236	-1.9E-06	-5.72
402	0.402	-0.278	-4.0E-06	-5.39	445	0.445	-0.235	-1.9E-06	-5.73
403	0.403	-0.277	-4.0E-06	-5.40	446	0.446	-0.234	-1.8E-06	-5.73
404	0.404	-0.276	-3.9E-06	-5.41	447	0.447	-0.233	-1.8E-06	-5.74
405	0.405	-0.275	-3.8E-06	-5.42	448	0.448	-0.232	-1.8E-06	-5.75
406	0.406	-0.274	-3.7E-06	-5.43	449	0.449	-0.231	-1.8E-06	-5.75
407	0.407	-0.273	-3.7E-06	-5.44	450	0.45	-0.230	-1.8E-06	-5.76
408	0.408	-0.272	-3.6E-06	-5.45	451	0.451	-0.229	-1.7E-06	-5.76
409	0.409	-0.271	-3.5E-06	-5.45	452	0.452	-0.228	-1.7E-06	-5.77
410	0.41	-0.270	-3.4E-06	-5.46	453	0.453	-0.227	-1.7E-06	-5.77
411	0.411	-0.269	-3.4E-06	-5.47	454	0.454	-0.226	-1.7E-06	-5.78
412	0.412	-0.268	-3.3E-06	-5.48	455	0.455	-0.225	-1.6E-06	-5.79
413	0.413	-0.267	-3.3E-06	-5.49	456	0.456	-0.224	-1.6E-06	-5.79
414	0.414	-0.266	-3.2E-06	-5.49	457	0.457	-0.223	-1.6E-06	-5.80
415	0.415	-0.265	-3.1E-06	-5.50	458	0.458	-0.222	-1.6E-06	-5.80
416	0.416	-0.264	-3.1E-06	-5.51	459	0.459	-0.221	-1.6E-06	-5.81
417	0.417	-0.263	-3.0E-06	-5.52	460	0.46	-0.220	-1.5E-06	-5.81
418	0.418	-0.262	-3.0E-06	-5.53	461	0.461	-0.219	-1.5E-06	-5.82
419	0.419	-0.261	-2.9E-06	-5.53	462	0.462	-0.218	-1.5E-06	-5.83
420	0.42	-0.260	-2.9E-06	-5.54	463	0.463	-0.217	-1.5E-06	-5.83
421	0.421	-0.259	-2.8E-06	-5.55	464	0.464	-0.216	-1.5E-06	-5.84
422	0.422	-0.258	-2.8E-06	-5.56	465	0.465	-0.215	-1.4E-06	-5.84
423	0.423	-0.257	-2.7E-06	-5.57	466	0.466	-0.214	-1.4E-06	-5.85
424	0.424	-0.256	-2.7E-06	-5.57	467	0.467	-0.213	-1.4E-06	-5.85
425	0.425	-0.255	-2.6E-06	-5.58	468	0.468	-0.212	-1.4E-06	-5.85
426	0.426	-0.254	-2.6E-06	-5.59	469	0.469	-0.211	-1.4E-06	-5.86
427	0.427	-0.253	-2.5E-06	-5.60	470	0.47	-0.210	-1.4E-06	-5.86
428	0.428	-0.252	-2.5E-06	-5.61	471	0.471	-0.209	-1.4E-06	-5.87
429	0.429	-0.251	-2.4E-06	-5.61	472	0.472	-0.208	-1.3E-06	-5.87
430	0.43	-0.250	-2.4E-06	-5.62	473	0.473	-0.207	-1.3E-06	-5.88

mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )	mV	V	E-Eeq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log i (A/cm <sup>2</sup> )
474	0.474	-0.206	-1.3E-06	-5.88	478	0.478	-0.202	-1.3E-06	-5.89
475	0.475	-0.205	-1.3E-06	-5.88	479	0.479	-0.201	-1.3E-06	-5.89
476	0.476	-0.204	-1.3E-06	-5.89	480	0.48	-0.200	-1.3E-06	-5.90
477	0.477	-0.203	-1.3E-06	-5.89					

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla A.4: Datos curva de polarización catódica de reducción del ion férrico sobre la pirita.

mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i	mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i
330	0.33	-0.35	-5.0E-04	2.37	364	0.364	-0.316	-4.5E-04	0.94
331	0.331	-0.349	-5.0E-04	2.24	365	0.365	-0.315	-4.5E-04	0.92
332	0.332	-0.348	-5.0E-04	2.19	366	0.366	-0.314	-4.5E-04	0.90
333	0.333	-0.347	-5.0E-04	2.24	367	0.367	-0.313	-4.5E-04	0.88
334	0.334	-0.346	-5.0E-04	2.06	368	0.368	-0.312	-4.5E-04	0.87
335	0.335	-0.345	-5.0E-04	1.94	369	0.369	-0.311	-4.4E-04	0.85
336	0.336	-0.344	-5.0E-04	1.86	370	0.37	-0.31	-4.4E-04	0.83
337	0.337	-0.343	-5.0E-04	1.77	371	0.371	-0.309	-4.4E-04	0.82
338	0.338	-0.342	-5.0E-04	1.72	372	0.372	-0.308	-4.4E-04	0.80
339	0.339	-0.341	-5.0E-04	1.67	373	0.373	-0.307	-4.3E-04	0.78
340	0.34	-0.34	-4.9E-04	1.61	374	0.374	-0.306	-4.3E-04	0.77
341	0.341	-0.339	-4.9E-04	1.56	375	0.375	-0.305	-4.3E-04	0.75
342	0.342	-0.338	-4.9E-04	1.53	376	0.376	-0.304	-4.3E-04	0.74
343	0.343	-0.337	-4.9E-04	1.49	377	0.377	-0.303	-4.2E-04	0.72
344	0.344	-0.336	-4.9E-04	1.45	378	0.378	-0.302	-4.2E-04	0.71
345	0.345	-0.335	-4.9E-04	1.41	379	0.379	-0.301	-4.2E-04	0.69
346	0.346	-0.334	-4.9E-04	1.37	380	0.38	-0.3	-4.2E-04	0.68
347	0.347	-0.333	-4.8E-04	1.34	381	0.381	-0.299	-4.1E-04	0.66
348	0.348	-0.332	-4.8E-04	1.31	382	0.382	-0.298	-4.1E-04	0.65
349	0.349	-0.331	-4.8E-04	1.28	383	0.383	-0.297	-4.1E-04	0.63
350	0.35	-0.33	-4.8E-04	1.25	384	0.384	-0.296	-4.1E-04	0.62
351	0.351	-0.329	-4.8E-04	1.23	385	0.385	-0.295	-4.0E-04	0.60
352	0.352	-0.328	-4.8E-04	1.20	386	0.386	-0.294	-4.0E-04	0.59
353	0.353	-0.327	-4.7E-04	1.17	387	0.387	-0.293	-4.0E-04	0.58
354	0.354	-0.326	-4.7E-04	1.15	388	0.388	-0.292	-4.0E-04	0.56
355	0.355	-0.325	-4.7E-04	1.12	389	0.389	-0.291	-3.9E-04	0.55
356	0.356	-0.324	-4.7E-04	1.10	390	0.39	-0.29	-3.9E-04	0.54
357	0.357	-0.323	-4.7E-04	1.08	391	0.391	-0.289	-3.9E-04	0.52
358	0.358	-0.322	-4.6E-04	1.06	392	0.392	-0.288	-3.9E-04	0.51
359	0.359	-0.321	-4.6E-04	1.04	393	0.393	-0.287	-3.8E-04	0.50
360	0.36	-0.32	-4.6E-04	1.02	394	0.394	-0.286	-3.8E-04	0.48
361	0.361	-0.319	-4.6E-04	1.00	395	0.395	-0.285	-3.8E-04	0.47
362	0.362	-0.318	-4.6E-04	0.97	396	0.396	-0.284	-3.7E-04	0.45
363	0.363	-0.317	-4.6E-04	0.96	397	0.397	-0.283	-3.7E-04	0.44

mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i	mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i
398	0.398	-0.282	-3.7E-04	0.43	441	0.441	-0.239	-2.3E-04	-0.08
399	0.399	-0.281	-3.7E-04	0.41	442	0.442	-0.238	-2.3E-04	-0.09
400	0.4	-0.28	-3.6E-04	0.40	443	0.443	-0.237	-2.2E-04	-0.10
401	0.401	-0.279	-3.6E-04	0.39	444	0.444	-0.236	-2.2E-04	-0.11
402	0.402	-0.278	-3.6E-04	0.38	445	0.445	-0.235	-2.2E-04	-0.13
403	0.403	-0.277	-3.5E-04	0.36	446	0.446	-0.234	-2.1E-04	-0.14
404	0.404	-0.276	-3.5E-04	0.35	447	0.447	-0.233	-2.1E-04	-0.15
405	0.405	-0.275	-3.5E-04	0.34	448	0.448	-0.232	-2.1E-04	-0.16
406	0.406	-0.274	-3.4E-04	0.33	449	0.449	-0.231	-2.0E-04	-0.17
407	0.407	-0.273	-3.4E-04	0.31	450	0.45	-0.23	-2.0E-04	-0.18
408	0.408	-0.272	-3.4E-04	0.30	451	0.451	-0.229	-2.0E-04	-0.19
409	0.409	-0.271	-3.3E-04	0.29	452	0.452	-0.228	-1.9E-04	-0.20
410	0.41	-0.27	-3.3E-04	0.28	453	0.453	-0.227	-1.9E-04	-0.22
411	0.411	-0.269	-3.3E-04	0.27	454	0.454	-0.226	-1.9E-04	-0.23
412	0.412	-0.268	-3.3E-04	0.26	455	0.455	-0.225	-1.9E-04	-0.24
413	0.413	-0.267	-3.2E-04	0.24	456	0.456	-0.224	-1.8E-04	-0.25
414	0.414	-0.266	-3.2E-04	0.23	457	0.457	-0.223	-1.8E-04	-0.26
415	0.415	-0.265	-3.2E-04	0.22	458	0.458	-0.222	-1.8E-04	-0.27
416	0.416	-0.264	-3.1E-04	0.21	459	0.459	-0.221	-1.7E-04	-0.28
417	0.417	-0.263	-3.1E-04	0.19	460	0.46	-0.22	-1.7E-04	-0.29
418	0.418	-0.262	-3.1E-04	0.18	461	0.461	-0.219	-1.7E-04	-0.30
419	0.419	-0.261	-3.0E-04	0.17	462	0.462	-0.218	-1.6E-04	-0.32
420	0.42	-0.26	-3.0E-04	0.16	463	0.463	-0.217	-1.6E-04	-0.33
421	0.421	-0.259	-3.0E-04	0.15	464	0.464	-0.216	-1.6E-04	-0.34
422	0.422	-0.258	-2.9E-04	0.14	465	0.465	-0.215	-1.6E-04	-0.35
423	0.423	-0.257	-2.9E-04	0.12	466	0.466	-0.214	-1.5E-04	-0.36
424	0.424	-0.256	-2.9E-04	0.11	467	0.467	-0.213	-1.5E-04	-0.37
425	0.425	-0.255	-2.8E-04	0.10	468	0.468	-0.212	-1.5E-04	-0.39
426	0.426	-0.254	-2.8E-04	0.09	469	0.469	-0.211	-1.4E-04	-0.40
427	0.427	-0.253	-2.8E-04	0.08	470	0.47	-0.21	-1.4E-04	-0.41
428	0.428	-0.252	-2.7E-04	0.07	471	0.471	-0.209	-1.4E-04	-0.42
429	0.429	-0.251	-2.7E-04	0.06	472	0.472	-0.208	-1.4E-04	-0.43
430	0.43	-0.25	-2.7E-04	0.04	473	0.473	-0.207	-1.3E-04	-0.44
431	0.431	-0.249	-2.6E-04	0.03	474	0.474	-0.206	-1.3E-04	-0.45
432	0.432	-0.248	-2.6E-04	0.02	475	0.475	-0.205	-1.3E-04	-0.46
433	0.433	-0.247	-2.6E-04	0.01	476	0.476	-0.204	-1.3E-04	-0.47
434	0.434	-0.246	-2.5E-04	0.00	477	0.477	-0.203	-1.2E-04	-0.49
435	0.435	-0.245	-2.5E-04	-0.01	478	0.478	-0.202	-1.2E-04	-0.50
436	0.436	-0.244	-2.5E-04	-0.02	479	0.479	-0.201	-1.2E-04	-0.51
437	0.437	-0.243	-2.4E-04	-0.04	480	0.48	-0.2	-1.2E-04	-0.52
438	0.438	-0.242	-2.4E-04	-0.05	481	0.481	-0.199	-1.1E-04	-0.53
439	0.439	-0.241	-2.4E-04	-0.06	482	0.482	-0.198	-1.1E-04	-0.55
440	0.44	-0.24	-2.3E-04	-0.07	483	0.483	-0.197	-1.1E-04	-0.56

mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i	mV	mV	E-Eq (V)	i (A/cm <sup>2</sup> )	log(iL-i)/i
486	0.486	-0.194	-1.0E-04	-0.59	529	0.529	-0.151	-3.6E-05	-1.12
487	0.487	-0.193	-1.0E-04	-0.60	530	0.53	-0.15	-3.5E-05	-1.13
488	0.488	-0.192	-9.9E-05	-0.61	531	0.531	-0.149	-3.4E-05	-1.14
489	0.489	-0.191	-9.7E-05	-0.63	532	0.532	-0.148	-3.3E-05	-1.16
490	0.49	-0.19	-9.5E-05	-0.64	533	0.533	-0.147	-3.2E-05	-1.17
491	0.491	-0.189	-9.3E-05	-0.65	534	0.534	-0.146	-3.1E-05	-1.19
492	0.492	-0.188	-9.1E-05	-0.66	535	0.535	-0.145	-3.0E-05	-1.20
493	0.493	-0.187	-8.9E-05	-0.67	536	0.536	-0.144	-2.9E-05	-1.22
494	0.494	-0.186	-8.7E-05	-0.69	537	0.537	-0.143	-2.8E-05	-1.23
495	0.495	-0.185	-8.5E-05	-0.70	538	0.538	-0.142	-2.7E-05	-1.24
496	0.496	-0.184	-8.3E-05	-0.71	539	0.539	-0.141	-2.6E-05	-1.26
497	0.497	-0.183	-8.1E-05	-0.72	540	0.54	-0.14	-2.6E-05	-1.27
498	0.498	-0.182	-7.9E-05	-0.73	541	0.541	-0.139	-2.5E-05	-1.28
499	0.499	-0.181	-7.7E-05	-0.74	542	0.542	-0.138	-2.4E-05	-1.30
500	0.5	-0.18	-7.5E-05	-0.76	543	0.543	-0.137	-2.4E-05	-1.31
501	0.501	-0.179	-7.4E-05	-0.77	544	0.544	-0.136	-2.3E-05	-1.32
502	0.502	-0.178	-7.2E-05	-0.78	545	0.545	-0.135	-2.3E-05	-1.33
503	0.503	-0.177	-7.0E-05	-0.79	546	0.546	-0.134	-2.2E-05	-1.34
504	0.504	-0.176	-6.9E-05	-0.80	547	0.547	-0.133	-2.1E-05	-1.36
505	0.505	-0.175	-6.7E-05	-0.82	548	0.548	-0.132	-2.0E-05	-1.38
506	0.506	-0.174	-6.5E-05	-0.83	549	0.549	-0.131	-2.0E-05	-1.39
507	0.507	-0.173	-6.4E-05	-0.84	550	0.55	-0.13	-1.9E-05	-1.41
508	0.508	-0.172	-6.2E-05	-0.85	551	0.551	-0.129	-1.8E-05	-1.43
509	0.509	-0.171	-6.1E-05	-0.86	552	0.552	-0.128	-1.8E-05	-1.44
510	0.51	-0.17	-5.9E-05	-0.88	553	0.553	-0.127	-1.7E-05	-1.46
511	0.511	-0.169	-5.8E-05	-0.89	554	0.554	-0.126	-1.6E-05	-1.48
513	0.513	-0.167	-5.5E-05	-0.92	556	0.556	-0.124	-1.5E-05	-1.51
514	0.514	-0.166	-5.3E-05	-0.93	557	0.557	-0.123	-1.5E-05	-1.52
515	0.515	-0.165	-5.2E-05	-0.94	558	0.558	-0.122	-1.4E-05	-1.55
517	0.517	-0.163	-5.0E-05	-0.96	560	0.56	-0.12	-1.3E-05	-1.59
518	0.518	-0.162	-4.8E-05	-0.98	561	0.561	-0.119	-1.3E-05	-1.60
519	0.519	-0.161	-4.7E-05	-0.99	562	0.562	-0.118	-1.2E-05	-1.61
520	0.52	-0.16	-4.6E-05	-1.00	563	0.563	-0.117	-1.2E-05	-1.63
521	0.521	-0.159	-4.4E-05	-1.02	564	0.564	-0.116	-1.1E-05	-1.65
522	0.522	-0.158	-4.3E-05	-1.03	565	0.565	-0.115	-1.1E-05	-1.66
523	0.523	-0.157	-4.2E-05	-1.04	566	0.566	-0.114	-1.0E-05	-1.67
525	0.525	-0.155	-4.0E-05	-1.07	568	0.568	-0.112	-9.8E-06	-1.71
526	0.526	-0.154	-3.9E-05	-1.08	569	0.569	-0.111	-9.5E-06	-1.72
527	0.527	-0.153	-3.8E-05	-1.09	570	0.57	-0.11	-9.3E-06	-1.73
528	0.528	-0.152	-3.7E-05	-1.10	571	0.571	-0.109	-9.0E-06	-1.74

Fuente: Elaboración Propia.

## ANEXO B. FOTOS DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN.



Figura B1: De Izquierda a derecha: Dr Francisca, M.sc. Katherine, Ing. Francisco, M.sc.(c) Joaquin, Ph.D. Tomas, Ph.D. Melanie, M.sc. Jose, Dr.(c) Carla, M.sc.(c) Evelin.

ANEXO C. ANÁLISIS MICROSCOPIA DE BARRIDO ELECTRÓNICO (SEM DEL INGLÉS SCANNING ELECTRON MICROSCOPE) DE LAS MUESTRAS

Figura C.1: Microscopia de barrido electrónico para la calcopirita.

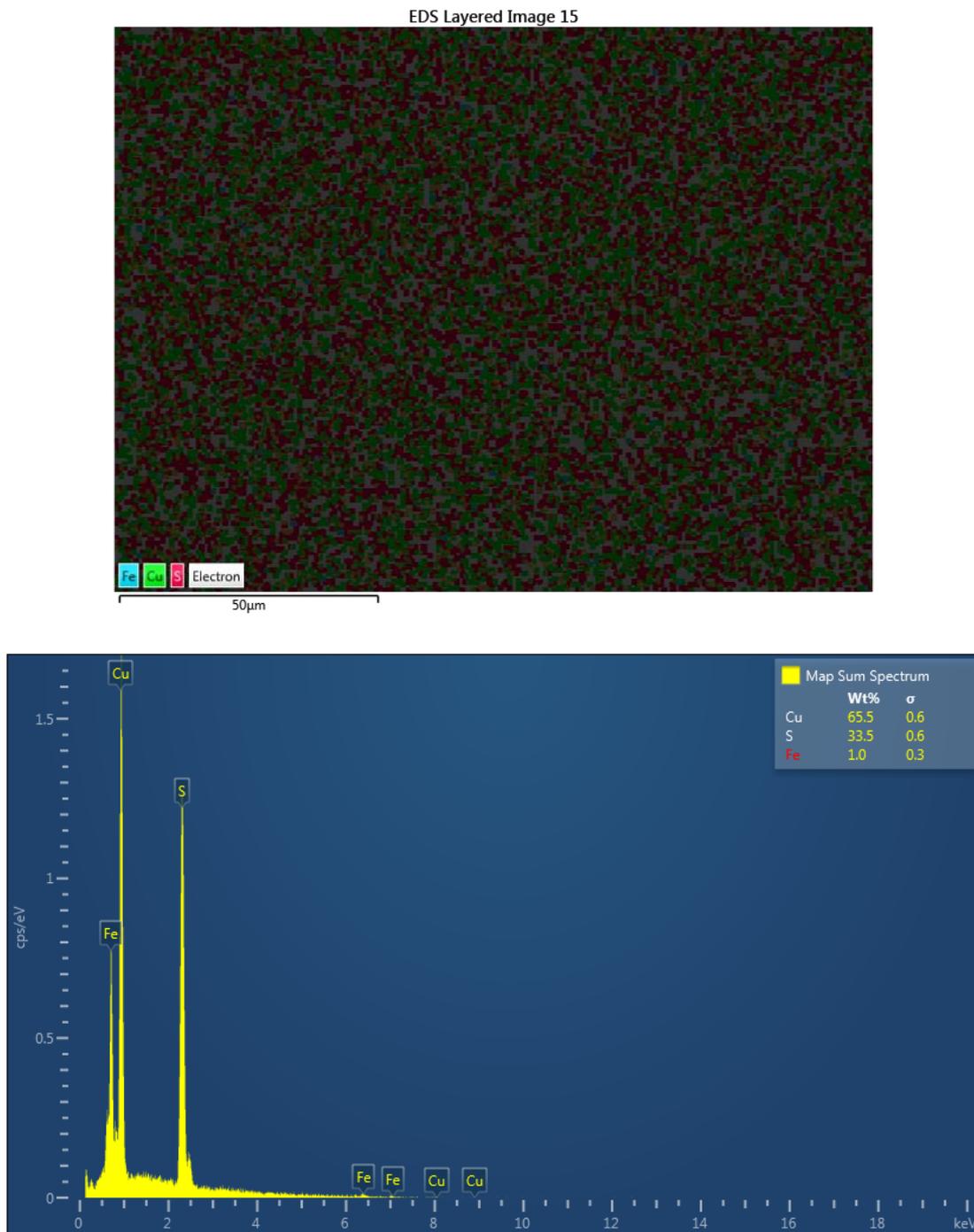
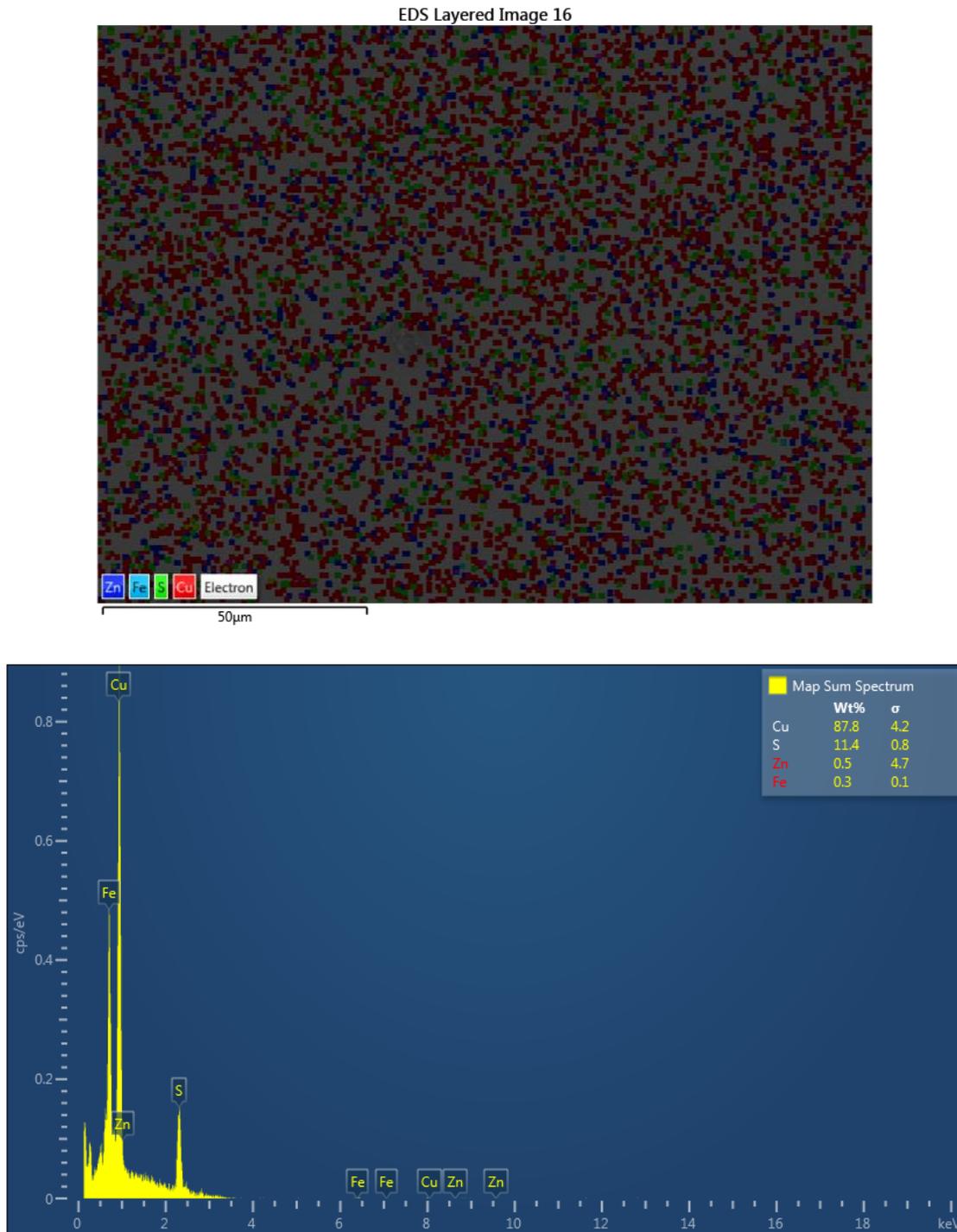


Figura C.2: Microscopia de barrido electrónico para la pirita



ANEXO D. ANÁLISIS MICROSCÓPICOS DE LOS ELECTRODOS DE  
CALCOPIRITA Y PIRITA.

**Dr. Manuel A. Carballo Monge**  
Assistant Professor  
Department of Mining Engineering  
Universidad de Chile  
Avenida Tupper 2069  
8370451, Santiago, Chile  
Phone: (+56) 2 29784479  
mcarballo@ing.uchile.cl

**09 de junio de 2017**

## CARACTERIZACIÓN MICROSCÓPICA

At: Dr. Tomás Vargas  
Académico del Depto. de  
Ingeniería Química y Biotecnología.

--- El presente estudio de caracterización microscópica e informe correspondiente ha sido realizado por el Sr. Mario Jara (Técnico Especialista en Microscopía) y ha sido visado por el Prof. Dr. Manuel A. Carballo (Jefe de la Unidad de Caracterización Mineral).

## ANTECEDENTES

1. Las muestras entregadas en la solicitud de trabajo son las siguientes:
  - Muestra Electrodo N°01 (mineral sulfurado de cobre)
  - Muestra Electrodo N°02 (mineral sulfurado de hierro)
2. La zonas a estudiar presentan las siguientes dimensiones:
  - Electrodo N°01 = 6 x 7 mm
  - Electrodo N°02 = 5 x 6 mm
3. Se solicitó hacer un estudio de luz incidente con el fin de identificar:
  - Especies minerales presentes.
  - Impurezas metálicas y no metálicas.
  - Microfotografías

## COTIZACIÓN

--- El presente estudio, por sus características peculiares (muestra ya preparada en briqueta pulida y especificidad de la muestra mineral asociada a un electrodo) no se ajustaba a ninguno de los paquetes de análisis mineral ofertados por la Unidad de Caracterización Mineral, por lo que fue cotizada tan solo en base a las horas necesarias de estudio microscópico. Además, el trabajo fue considerado bajo tarifa INTERNA. Con todo esto se ofreció una **cotización de 2,25 UF (56.133 CLP)** por el estudio mineralógico más informe.

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Electrodo N° 01

- La Calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es la única especie mineral de cobre presente.
- Se observan partículas de Blenda y ganga no metálica como impurezas incluidas en la zona de la Calcopirita.
- Se midieron diversos cristales de Blenda y de Ganga no metálica, para determinar su tamaño mínimo y máximo:

Mineral	T. Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	T. Máximo ( $\mu\text{m}$ )
BLEND A	3	20
GANGA NO METÁLICA	3	35

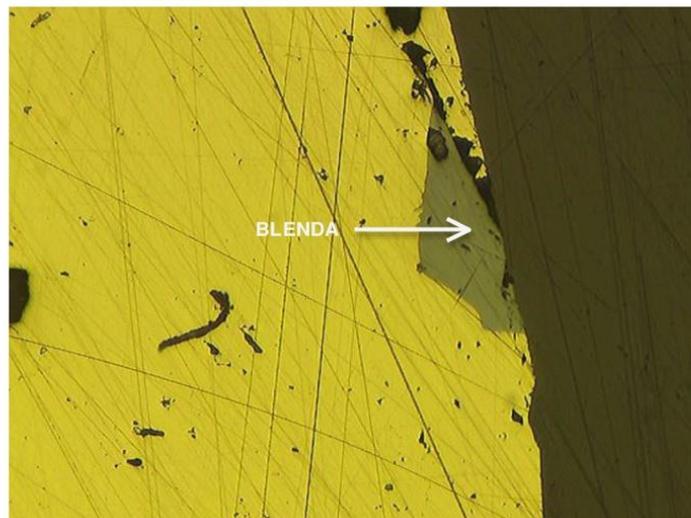
- Se observó un cristal aislado de Blenda ( $\text{SZn}$ ), como se puede observar en la fotografía N°2, su granulometría es de  $152 \mu\text{m}$  (para la granulometría se consideró el promedio de  $80 \times 224$  micrones).
- Tanto la Blenda como la ganga no metálica se observan 100% incluida en la zona de la Calcopirita.
- En la microfotografías siguientes se observan las principales características de la muestra:

Ingeniería de Minas

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO



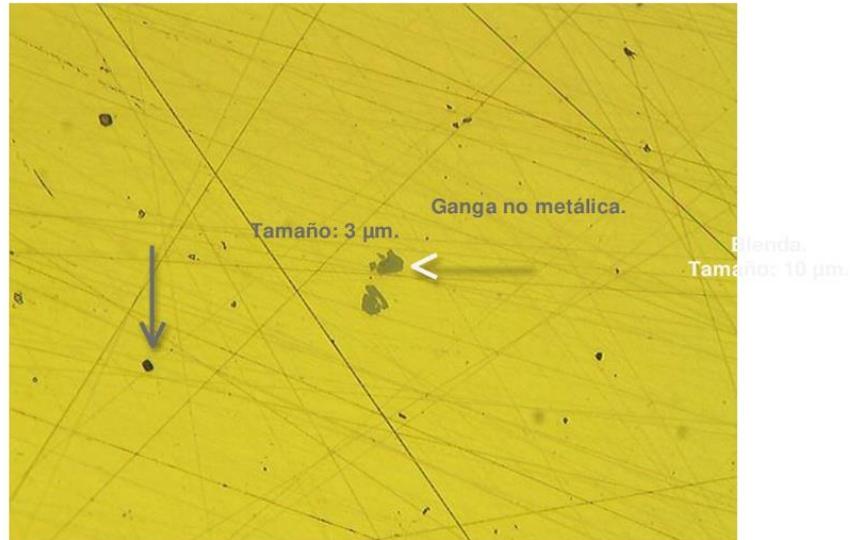
FOTOGRAFÍA N° 1. Escala: 1 cm=50  $\mu$ m Vista general de la zona de la Calcopirita.



FOTOGRAFÍA N° 2. Escala: 1 cm=50  $\mu$ m. Blenda asociada a Calcopirita (152  $\mu$ m), cabe señalar que es la única partícula de mayor tamaño observada.

*Ingeniería de Minas*

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



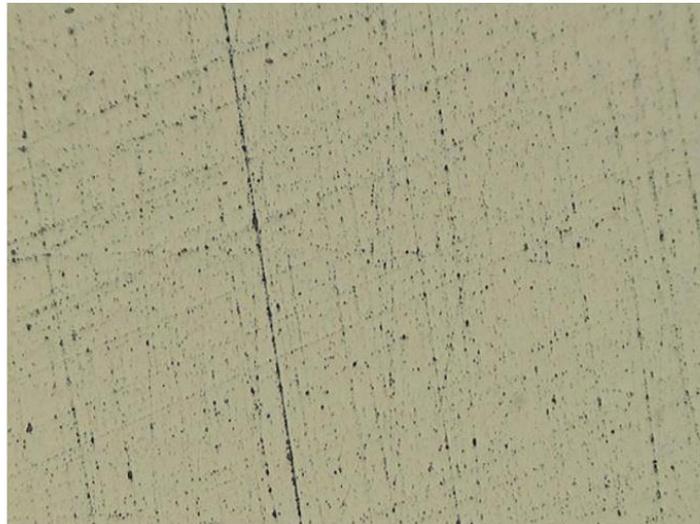
**FOTOGRAFÍA N° 3.** Escala: 1 cm=25  $\mu\text{m}$ . En la fotografía N°3, se puede observar ganga no metálica, de tamaños inferiores a 3 micrones.

*Ingeniería de Minas*

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

**Electrodo N° 02:**

- La Pirita ( $S_2Fe$ ) es el mineral sulfurado de hierro predominante de la zona.
- En esta muestra, se observan impurezas de ganga no metálica finamente diseminada en la Pirita.
- La granulometría de la ganga no metálica, fluctúa entre 5 y 40  $\mu m$ ; Se observa un cristal aislado de 65  $\mu m$  en la zona de la Pirita.
- La ganga no metálica se observa 100% incluida en la Pirita.
- A continuación se observan vistas generales de la muestras:



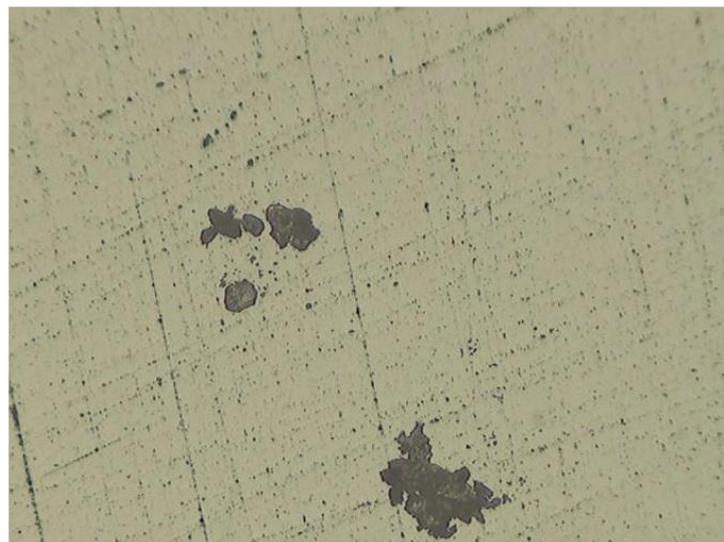
**FOTOGRAFÍA N° 4.** Escala: 1 cm=50  $\mu m$ . Vista general de la Pirita, se observa rayado de pulimento.

*Ingeniería de Minas*

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



FOTOGRAFÍA N° 5. Escala: 1 cm=50  $\mu$ m. Ganga no metálica incluida en la Pirita



FOTOGRAFÍA N° 6. Escala: 1 cm=50  $\mu$ m. En la parte inferior, se puede observar la ganga no metálica de mayor granulometría encontrada en la muestra.

*Ingeniería de Minas*

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

-- No dude en contactar ante cualquier estudio adicional o aclaración que necesite al respecto.

Sr. Mario Jara

Atentamente,  
Prof. Dr. Manuel A.  
Carballo

*Ingeniería de Minas*

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE

ANEXO E. CERTIFICADO DE TRABAJO EN EL CENTRO AVANZADO DE  
TECNOLOGÍA PARA LA MINERÍA (AMTC)**CERTIFICADO**

En Santiago, 10 de Agosto de 2017, **JAVIER RUIZ DEL SOLAR, R.U.T. 8.323.448-2** Director Ejecutivo de Advanced Mining Technology Center - AMTC; perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, ofrece el cargo de Investigador en este proyecto de investigación (Fondo Basal FB0809 - Conicyt) a **JOSE NESTOR MAMANI QUISPE, RUT: 24.226.938-1**, nacionalidad Peruana, de profesión Ingeniero Químico, estado civil Soltero.

Por su desempeño en esta labor percibe un salario base imponible de \$675.518 (seiscientos setenta y cinco quinientos diez y ocho mil pesos) mensuales.

Esta oferta es efectiva desde Agosto del 2017.

Se extiende este certificado a petición del interesado para los fines que estime conveniente.

JAVIER RUIZ DEL SOLAR  
R.U.T. 8.323.448-2  
DIRECTOR AMTC

