

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

**EXTRACCIÓN DEL COBRE MEDIANTE LIXIVIACIÓN ACIDA POR  
AGITACIÓN DE LOS BOTADEROS DE LA MINERIA ARTESANAL DE LA  
COMUNIDAD QOCHAPATA-COTABAMBAS**

**PRESENTADO POR:**

Br. JHENRRY , QUISPE SONCCO

Br. KEVIN RAUL , PUMA HUILLCA

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

Ing. EDUARDO MARCELO , QUISPE NINA

**CUSCO-PERU**

**2025**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: Extracción del cobre mediante lixiviación ácida por agitación de los botaderos de la minería artesanal de la comunidad Qochapata - cotabambas

presentado por: Jhenry Quispe Soncco con DNI Nro.: 74423903 presentado por: Kevin Raul Puma Huilca con DNI Nro.: 72490557 para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Metalurgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 3 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7%.

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

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 17 de Junio de 2025



Firma

Post firma Eduardo Marcelo Quispe Nina

Nro. de DNI 23957145

ORCID del Asesor 0000 - 0002 - 4473 - 1580

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:467820365

# Jhenrry Quispe/Kevin Puma

## EXTRACCIÓN DEL COBRE MEDIANTE LIXIVIACIÓN ACIDA POR AGITACIÓN DE LOS BOTADEROS DE LA MINERIA ARTESANAL DE LA COMUNIDAD QOCHAPATA-COTABAMBAS

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

**Identificador de la entrega****trn:oid:::27259:467820365****Fecha de entrega****17 jun 2025, 2:25 p.m. GMT-5****Fecha de descarga****17 jun 2025, 2:54 p.m. GMT-5****Nombre de archivo****Tesis Jhenrry Quispe y Kevin Puma (Levantamiento de observaciones).pdf****Tamaño de archivo****2.0 MB****151 Páginas****26.754 Palabras****147.809 Caracteres**

# 7% Similitud general

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

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto citado
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 170 palabras)

## Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

## Marcas de integridad

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

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

## PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA:

SEÑORES CATEDRÁTICO MIEMBROS DEL JURADO:

Por nombramiento del Reglamento de Grados y Títulos para Optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la tesis Colectiva Titulada **“EXTRACCIÓN DEL COBRE MEDIANTE LIXIVIACIÓN ACIDA POR AGITACIÓN DE LOS BOTADEROS DE LA MINERÍA ARTESANAL DE LA COMUNIDAD QOCHAPATA-COTABAMBAS”**

(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

El presente trabajo de investigación tecnológica muestra nuestros conocimientos académicos, científicos y técnicos, principalmente en el campo de la hidrometalurgia. que se desarrolló en el laboratorio metalúrgico mediante el proceso de lixiviación acida con  $H_2SO_4$ .

En lo cual se planteó objetivos para ayudar a resolver la problemática que tiene la minería artesanal de Qochapata, así mismo con la presente investigación se podrá dar valor económico y social al tratamiento de los botaderos que poseen.

Los graduandos

## DEDICATORIA

*Primeramente, agradezco a Dios Todopoderoso por haberme bendecido con sabiduría, fortaleza y salud para culminar esta hermosa etapa universitaria, en la que viví tantos momentos significativos dentro y fuera de las aulas.*

*Con profundo amor y gratitud, dedico este logro a mis padres, Juan Quispe y Domitila Soncco, por su amor incondicional y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por brindarme cada día la fuerza y el aliento necesarios para seguir adelante. Extiendo mi agradecimiento a mis hermanas, quienes siempre estuvieron a mi lado, especialmente a mi hermana Felicitas, ejemplo de lucha y perseverancia. Gracias por su constante apoyo, amor y confianza durante este proceso académico, Los llevaré siempre en mi corazón a cada uno de ustedes, porque son y serán mi más grande inspiración y mi verdadera razón de superación. En un rincón especial de este trayecto, también queda el brillo discreto de una pequeña medallita.*

**Jhenry Quispe Soncco**

**Gracias a Dios por darme una oportunidad cada día y recordarme que todo es posible si tú te lo propones, y por estar a mi lado protegiéndome y guiándome.**

**A mi madre, quien es el soporte en mi vida y que gracias a su ayuda y enseñanzas me convirtieron en la persona que soy.**

**A mis hermanas Deysi y Kelly, y a mi hermano Kenny; que son ellos mi motivación para salir adelante.**

**A mis parientes y amigos que de alguna u otra forma me brindaron su apoyo en mis estudios.**

Kevin Raul Puma Huilca

## INTRODUCCIÓN

En la región Apurímac, exactamente en la provincia de Qochapata se encuentra la minería artesanal, que se dedican a la extracción y comercialización de minerales de cobre sin procesar, sometiéndose a desventajas significativas debido a falta de equipos, materiales y conocimiento técnico apropiados para el aprovechamiento de este mineral. En este contexto, el proceso de lixiviación acida con  $H_2SO_4$  por agitación nace como una solución alternativa.

La lixiviación ácida de cobre es un proceso hidrometalúrgico, que se basa netamente en la disolución del cobre con ácido sulfúrico a distintas concentraciones. Este proceso se caracteriza por su alta eficiencia en la extracción de cobre para minerales de baja ley y no requiere grandes inversiones en maquinarias o equipos de alta tecnología.

La investigación tecnológica realizada se fundamenta en seis capítulos principalmente, en las cuales cada capítulo aborda de aspectos fundamentales con el objetivo de poder de brindar mejor comprensión del trabajo de investigación. el primer capítulo se basa principalmente en planteamiento de problema, el segundo abarca el marco teórico, el tercero de las hipótesis y variables, el cuarto describe la metodología empleada, el quinto trata la parte experimental y, por último, el sexto capítulo discute los resultados obtenidos. Esta estructura empleada proporciona un enfoque completo y ordenada de la investigación, permitiendo una presentación coherente y lógica de sus hallazgos e implicaciones.

**INDICE GENERAL**

<b>PRESENTACIÓN .....</b>	<b>I</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>III</b>
<b>INDICE GENERAL.....</b>	<b>IV</b>
<b>INDICE DE TABLAS .....</b>	<b>X</b>
<b>INDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>XV</b>
<b>ABSTRAC .....</b>	<b>XVI</b>
<b>CAPITULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
1.1. Situación problemática .....	1
1.2. Formulación del problema .....	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos .....	2
1.3. Justificación e importancia.....	2
1.3.1. Justificación económica .....	2
1.3.2. Justificación tecnológica .....	3
1.3.3. Justificación ambiental .....	3
1.3.4. Justificación social .....	3
1.4. Objetivo.....	3

1.4.1.	Objetivo general .....	3
1.4.2.	Objetivo específico.....	4
<b>CAPIPTULO II .....</b>		<b>5</b>
<b>2. MARCO TEORICO .....</b>		<b>5</b>
2.1.	Antecedentes internacionales. ....	5
2.2.	antecedentes nacionales.....	7
2.3.	Antecedentes locales .....	9
2.4.	Bases teóricos.....	10
2.4.1.	Fundamentos de la lixiviación del cobre.....	10
2.4.2.	Propiedades de los Agentes lixivante.....	11
2.4.3.	Métodos Lixiviación. ....	11
2.4.3.1.	Lixiviación en lugar (in place o in situ).....	12
2.4.3.2.	Lixiviación en bateas .....	12
2.4.3.3.	Lixiviación en botaderos.....	13
2.4.4.	Lixiviación en columnas .....	16
2.5.	Características de los minerales de cobre.....	17
2.5.1.	Minerales de cobre .....	17
2.5.1.1.	Efecto Especies Mineralógicas con Cobre.....	18
2.5.1.2.	Ganga en el mineral .....	21
2.5.1.3.	Química de soluciones .....	26
2.5.2.	Cinética de la lixiviación.....	26
2.5.3.	Diseño de quipos y proceso.....	27
2.5.3.1.	Determinación de mecanismos. ....	27

2.5.3.2.	Velocidad de reacción.....	29
2.5.3.3.	Reacciones de primer orden.....	30
2.5.3.4.	Reacciones de segundo orden .....	31
2.5.4.	Modelos cinéticos usados en la lixiviación de malaquita con diferentes agentes lixiviantes.....	31
2.5.4.1.	Modelo cinético usado por Bingöl y Canbazoglu (2004).....	31
2.5.4.2.	Modelo descrito por Wadsworth-Dickinson.....	32
2.5.5.	Caso control difusional.....	32
2.5.6.	Termodinámica.....	34
2.5.6.1.	Energía de activación.....	35
2.5.7.	Estructura de los Minerales .....	36
2.5.8.	Cinética de la lixiviación.....	37
2.5.8.1.	Factores influyentes sobre la cinética .....	38
2.5.9.	Efecto de la concentración de reactantes.....	38
2.5.9.1.	Efecto del grado de agitación.....	39
2.5.9.2.	Efecto de la temperatura .....	39
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>41</b>
<b>3. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....</b>		<b>41</b>
3.1.	Hipótesis.....	41
3.1.1.	Hipótesis generales.....	41
3.1.2.	Hipótesis específicas .....	41
3.2.	Variables .....	41
3.2.1.	Variables dependientes.....	41

3.2.2.	Variables independientes.....	41
3.2.3.	Variables intervinientes.....	41
3.3.	Operacionalización de Variables e Indicadores .....	42
<b>CAPÍTULO IV .....</b>		<b>43</b>
<b>4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION .....</b>		<b>43</b>
4.1.	Tipo de investigación .....	43
4.2.	Diseño de la investigación.....	43
4.3.	Nivel de investigación.....	45
4.4.	Método de la investigación.....	45
4.5.	Ámbito de investigación.....	45
4.6.	Población y muestra .....	45
4.6.1.	Población.....	45
4.7.	Validez y confiabilidad de instrumentos .....	46
4.8.	Plan de análisis de datos.....	46
4.9.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	47
<b>CAPÍTULO V.....</b>		<b>50</b>
<b>5. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....</b>		<b>50</b>
5.1.	Muestreo en yacimiento .....	50
5.2.	Toma de muestra.....	50
5.3.	Preparación mecánica.....	51
5.3.1.	Preparación de la muestra .....	51
5.4.	Análisis mineralógico y químico.....	52

5.4.1.	Determinación de ley de Cu.....	52
5.4.2.	Determinación de elementos acompañantes.....	53
5.4.3.	Análisis mineralógico por difracción de rayos x.....	54
5.5.	Determinación de la Gravedad específica.....	56
5.6.	Pruebas de moliendabilidad.....	59
5.7.	Preparación de pulpa.....	61
5.8.	Preparación de solución.....	65
5.8.1.	Preparación de hidróxido de sodio a una concentración de 0.1 N para 100ml de solución	65
5.8.1.1.	Procedimiento para preparar la solución NaOH.....	66
5.8.2.	Preparación de solución de ácido sulfúrico.....	67
5.8.2.1.	Procedimiento para preparar la solución H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .....	68
5.9.	Prueba de cinética de lixiviación.....	70
5.9.1.	Condiciones operativas para la prueba de cinética de lixiviación.....	70
5.9.2.	Determinación del porcentaje de extracción de cobre.....	71
5.9.2.1.	Determinación de cobre fino en la solución.....	71
5.9.2.2.	Determinación de cobre fino en el relave.....	72
5.9.2.3.	Determinación de % de extracción de cobre.....	73
5.9.3.	Determinación del tiempo óptimo de lixiviación.....	74
5.10.	Determinación del consumo de ácido y relación de consumo.....	77
5.10.1.	Proceso de titulación y cálculo de (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) g/l libre.....	77
5.10.1.1.	cálculo de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> g/l libre.....	77
5.10.1.2.	Cálculo de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> g/l gastado.....	77

5.10.1.3.	Cálculo de volumen de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> g/l para la reposición.....	78
5.11.	Matriz del diseño.....	79
5.12.	Pruebas de lixiviación acida en botellas.....	82
<b>CAPITULO VI .....</b>		<b>92</b>
<b>6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>		<b>92</b>
6.1.	Evaluación estadística .....	92
6.2.	Análisis de Datos.....	93
6.2.1.	Grafica de efecto de Variables Individuales para el tiempo de lixiviación.....	99
6.2.2.	Grafica de efecto de Variables Individuales para la densidad de pulpa.....	101
6.2.3.	Grafica de efecto de Variables Individuales para la concentración de ácido H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	104
6.2.4.	Diagrama de Pareto .....	108
6.2.5.	Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la extracción de cobre 109	
6.2.6.	Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción .....	111
6.2.7.	Gráfico de superficie y contornos de respuesta.....	114
6.2.8.	Optimización de Respuesta: % Extrac. de Cu.....	118
6.2.8.1.	Modelo matemático de correlación para la optimización de extracción de Cu mediante lixiviación acida.....	119
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>121</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>		<b>122</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>123</b>

<b>ANEXO.....</b>	<b>124</b>
<b>PANEL FOTOGRÁFICO .....</b>	<b>125</b>

### INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Óxidos de cobre, presente en minerales mixtos .....</i>	<b>18</b>
<b>Tabla 2</b> <i>Principales minerales de cobre (composición química.).....</i>	<b>19</b>
<b>Tabla 3</b> <i>Velocidad de disolución de las principales especies de cobre al lixiviarse con una solución diluida de ácido sulfúrico.....</i>	<b>20</b>
<b>Tabla 4</b> <i>Minerales carbonatos consumidores de ácido y sus caracterizas mineralógicas, .....</i>	<b>23</b>
<b>Tabla 5</b> <i>Minerales hidróxidos consumidores de ácido y sus características mineralógicas</i> <i>Minerales hidróxidos consumidores de ácido y sus caracterizas mineralógicas .....</i>	<b>24</b>
<b>Tabla 6</b> <i>Operacionalización de Variables e Indicadores .....</i>	<b>42</b>
<b>Tabla 7</b> <i>Análisis cuantitativo (ley), por absorción atómica .....</i>	<b>52</b>
<b>Tabla 8</b> <i>Análisis por ensayo multi elemental.....</i>	<b>53</b>
<b>Tabla 9</b> <i>Estudio mineralógico por difracción de rayos X para muestra MMO-101 y MMO-10355</i>	
<b>Tabla 10</b> <i>Porcentaje en peso de la muestra para cada elemento químico.....</i>	<b>56</b>
<b>Tabla 11</b> <i>Determinación de la GE Prueba 1.....</i>	<b>57</b>
<b>Tabla 12</b> <i>Determinación de la GE Prueba.....</i>	<b>58</b>
<b>Tabla 13</b> <i>Determinación de la GE Prueba 3.....</i>	<b>58</b>
<b>Tabla 14</b> <i>Resumen de tiempo de molienda .....</i>	<b>60</b>
<b>Tabla 15</b> <i>Tiempo de molienda .....</i>	<b>61</b>
<b>Tabla 16</b> <i>Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1250g/l64</i>	

<b>Tabla 17</b> <i>Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1300g/l64</i>	
<b>Tabla 18</b> <i>Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1350g/l64</i>	
<b>Tabla 19</b> <i>Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 40 g/l de ácido sulfúrico.....</i>	69
<b>Tabla 20</b> <i>Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 50 g/l de ácido sulfúrico.....</i>	69
<b>Tabla 21</b> <i>Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 60 g/l de ácido sulfúrico.....</i>	69
<b>Tabla 22</b> <i>Resultados de análisis químico de las pruebas de cinética de lixiviación.....</i>	71
<b>Tabla 23</b> <i>Porcentaje de extracción de cobre en las pruebas de cinética de lixiviación.....</i>	73
<b>Tabla 24</b> <i>Modelamiento matemático de difusión controlada.....</i>	76
<b>Tabla 25</b> <i>Relación de consumo de acido.....</i>	78
<b>Tabla 26</b> <i>Variables y su codificación.....</i>	80
<b>Tabla 27</b> <i>Variables reales.....</i>	80
<b>Tabla 28</b> <i>Condiciones para cada prueba.....</i>	81
<b>Tabla 29</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°1.....</i>	82
<b>Tabla 30</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°1.....</i>	82
<b>Tabla 31</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°2.....</i>	83
<b>Tabla 32</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°2.....</i>	83
<b>Tabla 33</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°3.....</i>	84
<b>Tabla 34</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°3.....</i>	84
<b>Tabla 35</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°4.....</i>	85
<b>Tabla 36</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°4.....</i>	85

<b>Tabla 37</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°5</i> .....	86
<b>Tabla 38</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°5</i> .....	86
<b>Tabla 39</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°6</i> .....	87
<b>Tabla 40</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°6</i> .....	87
<b>Tabla 41</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°7</i> .....	88
<b>Tabla 42</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°7</i> .....	88
<b>Tabla 43</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°8</i> .....	89
<b>Tabla 44</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°8</i> .....	89
<b>Tabla 45</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°9</i> .....	90
<b>Tabla 46</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°9</i> .....	90
<b>Tabla 47</b> <i>Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°10</i> .....	91
<b>Tabla 48</b> <i>Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°10</i> .....	91
<b>Tabla 49</b> <i>Resultados obtenidos para cada prueba</i> .....	92
<b>Tabla 50</b> <i>Coefficientes codificados</i> .....	93
<b>Tabla 51</b> <i>Análisis de varianza</i> .....	96
<b>Tabla 52</b> <i>Análisis de varianza de tiempo de lixiviación</i> .....	99
<b>Tabla 53</b> <i>Resumen del modelo de tiempo de lixiviación</i> .....	99
<b>Tabla 54</b> <i>Análisis de varianza de densidad de pulpa</i> .....	101
<b>Tabla 55</b> <i>Resumen del modelo de densidad de pulpa</i> .....	102
<b>Tabla 56</b> <i>Análisis de varianza de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> .....	104
<b>Tabla 57</b> <i>Resumen del modelo de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> .....	104
<b>Tabla 58</b> <i>Parámetros</i> .....	119
<b>Tabla 59</b> <i>Solución</i> .....	119

<b>Tabla 60</b> <i>Predicción de respuesta múltiple</i> .....	120
---	-----

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>lixiviación en botadero</i> .....	14
<b>Figura 2</b> <i>lixiviación en pila</i> .....	15
<b>Figura 3</b> <i>Lixiviación en columnas</i> .....	17
<b>Figura 4</b> <i>Influencia de la ganga en la lixiviación de cobre</i> .....	25
<b>Figura 5</b> <i>Cinética de reacción heterogénea cinética</i> .....	32
<b>Figura 6</b> <i>Ubicación del yacimiento de minerales oxidados de Cu</i> .....	46
<b>Figura 7</b> <i>Grafica de tamaño de partícula vs Tiempo de molienda</i> .....	61
<b>Figura 8</b> <i>Grafica de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación</i> .....	74
<b>Figura 9</b> <i>Grafica de XB vs tiempo en la etapa de difusión a través de la capa de ceniza</i> .....	76
<b>Figura 10</b> <i>Curva de cinético de consumo de ácido sulfúrico</i> .....	79
<b>Figura 11</b> <i>Rango de variables</i> .....	80
<b>Figura 12</b> <i>Valores individuales de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación</i> .....	100
<b>Figura 13</b> <i>Gráfica de cajas de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación</i> .....	101
<b>Figura 14</b> <i>Valores individuales de extracción de cobre vs densidad de pulpa</i> .....	102
<b>Figura 15</b> <i>Gráfica de cajas de extracción de cobre vs densidad de pulpa</i> .....	103
<b>Figura 16</b> <i>Valores individuales de extracción de cobre vs concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> .....	105
<b>Figura 17</b> <i>Gráfica de cajas de extracción de cobre vs concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></i> .....	106
<b>Figura 18</b> <i>Diagrama de Pareto de los efectos</i> .....	108
<b>Figura 19</b> <i>Grafica de efectos principales para extracción de Cobre</i> .....	109
<b>Figura 20</b> <i>Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación de cobre</i> .....	111

<b>Figura 21</b> <i>Gráfica de residuos para porcentaje de extracción</i> .....	112
<b>Figura 22</b> <i>Gráfica de superficie de extracción de cobre vs variables independientes.</i> .....	114
<b>Figura 23</b> <i>Gráfica de superficies para la extracción de cobre</i> .....	115
<b>Figura 24</b> <i>Gráfica de cubos (medias ajustadas) de extracción de Cu</i> .....	116
<b>Figura 25</b> <i>Gráfica de contorno de extracción vs variable independientes.</i> .....	117
<b>Figura 26</b> <i>Gráfica de optimización de extracción de cobre</i> .....	118

## RESUMEN

El Perú, es uno de los principales productores de cobre a nivel mundial, en la provincia de Cotabambas la minería artesanal, es una actividad económica fundamental que brinda sustento económico y desarrollo para la población, pero la falta de tecnología, equipos y conocimiento técnico para la extracción de sus minerales valiosos hace que su rentabilidad sea baja. Por ende, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal, obtener una mejor extracción por lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre. La metodología utilizada es de carácter tecnológico experimental, teniendo variables independientes y dependientes. La parte experimental, se realizó en el laboratorio metalúrgico de procesamiento de minerales e hidrometalurgia de la UNSAAC; se estudió la lixiviación de minerales oxidados del yacimiento minero artesanal Qochapata-Cotabambas, cuya ley de cabeza de cobre soluble es 4.35%. Este mineral tiene como composición mineralógica a la malaquita, crisocola, brocantita y enargita, como trabajo preliminar se realizó el procesamiento del mineral, para el cual se obtuvo el estudio cinético de lixiviación utilizando ácido sulfúrico a una concentración 60 g/l obteniendo un tiempo de 169.63 min y un consumo de ácido sulfúrico de 2.29 Kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / Kg de Cu, se determinaron los efectos de la densidad de pulpa, el tiempo de lixiviación y la concentración de ácido sulfúrico. Los resultados determinan, las condiciones de lixiviación ácida con una ley de cobre soluble 18.46%, densidad de pulpa de 1250 g/l, concentración de ácido sulfúrico de 60 g/l y tiempo de lixiviación de 4 horas para un tamaño de partícula de 60 % malla -200, obteniendo la extracción máxima de cobre de 93.226 %, el modelo estadístico que representa el diseño factorial completo es: % Extra. Cu=68+5.37A+0.01320B+0.456C-0.00330A\*B- 0.0903A\*C 0.000265B\*C+0.000060A \*B\*C

Se puede concluir, que el proceso de lixiviación ácido con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es una solución efectiva para la extracción de cobre oxidado de la minería artesanal de Qochapata.

Palabras Clave: Lixiviación de cobre, Ácido sulfúrico, Cinética, Extracción

## ABSTRAC

This experimental research focused on obtaining improved copper recovery through acid leaching of oxidized copper ores.

It was carried out in the metallurgical laboratory for mineral processing and hydrometallurgy of UNSAAC. The leaching of oxidized ore from the Qochapata-Cotabambas artisanal mining deposit was studied. The mineralization had a soluble copper head grade of 4.35%. Its mineralogical composition included malachite, chrysocolla, brochantite, and enargite. As a preliminary study, a kinetic study of leaching was performed with a sulfuric acid solution at a concentration of 60 g/L, obtaining an optimal time of 169.63 min and a sulfuric acid consumption of 2.29 kg H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / kg Cu. The effects of pulp density, leaching time, and sulfuric acid concentration were determined. The results determine that the optimal acid leaching conditions for the oxidized Qochapata ore with a soluble copper grade of 18.46% are: pulp density of 1250 g/L, sulfuric acid concentration of 60 g/L, leaching time of 4 hours, and a particle size of 60% -200 mesh, obtaining a maximum copper extraction of 93.226%. The statistical model representing the full factorial design is: %Rec. Cu = 68 + 5.37A + 0.01320B + 0.456C - 0.00330A\*B - 0.0903A\*C 0.000265B\*C + 0.000060A\*B\*C

Keywords: Copper leaching, Sulfuric acid, Kinetics, Extraction

## CAPITULO I

### 1. Planteamiento del problema

#### 1.1. Situación problemática

En la actualidad, es ampliamente conocido que la industria de la minería y la metalurgia del cobre emplea una variedad de métodos para extraer metales valiosos, como la flotación, lixiviación y concentración gravimétrica, cada uno de los cuales se basa en factores granulométricos, mineralógicos y otros factores.

El interés de la hidrometalurgia en la extracción de metales de concentrados y menas está impulsado por la preocupación actual por controlar la contaminación ambiental causada por los procesos pirometalúrgicos y el aumento creciente de la demanda de cobre. Existe una serie de normas que limitan la contaminación ambiental y la producción de minerales y concentrados, lo que reduce la eficiencia y, por lo tanto, la economía de los procesos convencionales. Por tanto, para evitar ello, es necesario utilizar el proceso de lixiviación por agitación.

En la minería artesanal de la comunidad de Qochapata, el desecho de los minerales oxidados de cobre es muy común hacia los botaderos, ya que estos minerales poseen leyes bajas para su comercialización, lo cual no es rentable como materia prima, como también el escaso conocimiento que poseen sobre el tratamiento de este tipo de minerales. Optan por desechar como un material ganga.

Con el conocimiento de los procesos extractivos en lixiviación de óxidos de cobre, se podrá extraer metales valiosos teniendo en cuenta factores importantes, como la granulometría, concentración ácida y el tiempo de extracción, que son variables más importantes que pueden afectar a este proceso, de este modo se dará valor agregado para obtener mejores rentabilidades, ya que este recurso natural es no renovable.

Con la presente investigación de lixiviación por agitación, se podrá solucionar estos problemas en la comunidad tratando de obtener a nivel de laboratorio los valores más óptimos de las variables indicadas, de este modo obtener mayor extracción de cobre para satisfacer las necesidades económicas de la comunidad.

Se tendrá en cuenta el control de las variables más importantes que pueden causar efectos negativos ambientales.

## **1.2. Formulación del problema**

### ***1.2.1. Problema general***

¿Será posible la extracción de cobre mediante lixiviación acida por agitación de los botaderos de la comunidad de Qochapata?

### ***1.2.2. Problemas específicos***

¿Cuál será la densidad de pulpa adecuada para la extracción de cobre mediante lixiviación acida por agitación?

¿Cuál será la concentración adecuada del ácido sulfúrico en la lixiviación de cobre?

¿Cuál será el tiempo adecuado para la lixiviación por agitación para su extracción de cobre?

## **1.3. Justificación e importancia**

### ***1.3.1. Justificación económica***

A mayor porcentaje de extracción de cobre obtenido por lixiviación, mayor será el valor agregado con buenas ganancias económicas, que permitirá a la comunidad desarrollarse brindando mayor desarrollo.

### ***1.3.2. Justificación tecnológica***

Al implementar un sistema de lixiviación con uso de soluciones ácidas, permitirá elegir la lixiviación ácida en columnas que conduce a obtener de manera experimental valores óptimos de las variables para extraer alto contenido de cobre.

### ***1.3.3. Justificación ambiental***

Al lixiviar minerales con ácido sulfúrico no se produce gran contaminación ambiental a bajas concentraciones, ya que el PLS obtenido consiste en sulfato de cobre, y lo cual no tiene mayor impacto ambiental en el yacimiento, por que la solución pobre de este proceso será recirculada, de esta manera se evitará el desecho del ácido sulfúrico, como también se estará cumpliendo con los estándares permisibles ambientales.

### ***1.3.4. Justificación social***

Al respetar los estándares de contaminación según ley, no habría contaminación ambiental y por tanto los trabajadores de la comunidad no se contaminarán ni habrá enfermedades que causen malestar. A su vez con la implementación de este proceso se generará puestos laborales y estos beneficios serán para la comunidad de Qochapata que será como un sustento económico-social y que ayudará a un desarrollo urbano, y rural que se beneficia las comunidades aledañas.

## **1.4. Objetivo**

### ***1.4.1. Objetivo general***

Determinar el porcentaje de cobre extraído por lixiviación acida de los botaderos de la comunidad de Qochapata.

#### **1.4.2. *Objetivo específico***

- ✓ Determinar la densidad de pulpa para la extracción de cobre por el proceso de lixiviación.
- ✓ Determinar la concentración en g/l del ácido para la lixiviación de cobre.
- ✓ Establecer el tiempo de lixiviación para obtener una mayor extracción de cobre.

## CAPIPTULO II

### 2. MARCO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes internacionales.

(Jordan & Vargas, 2020) en el trabajo "*Lixiviación de minerales oxidados de cobre con soluciones acidas de alta carga iónica*", el objetivo extraer cobre de soluciones ácidas. Se realizo lixiviación en pilas donde se recircula solución que proviene de la extracción por solventes. Esta solución posee una alta carga iónica (200 gr/lt de sulfato) debido a que los iones distintos del cobre permanecen y se acumulan en el circuito. Realizando pruebas de lixiviación en lecho fijo inundado, se demostró que estas altas concentraciones de iones en solución tienen efectos perjudiciales en la recuperación de cobre, ya que al lixiviar un mineral oxidado de cobre con soluciones de 15 gr/L de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) durante 175 horas con una solución que tiene una alta carga iónica, la recuperación de cobre es de 60%, en cambio con una solución diluida la recuperación fue de 76%. Se comprobó asimismo que el control en la velocidad de lixiviación es por difusión del ion cúprico a través del material reaccionado tanto en soluciones ácidas diluidas como en altas concentraciones de iones. Se demostró además que la velocidad de lixiviación decrece en soluciones de alta carga iónica debido a una disminución del coeficiente de difusión del ion cúprico. Se encontró que la velocidad de disolución de cobre es independiente de la concentración de ácido sulfúrico en el rango de 15 a 30 [gr/lt.

(Guiachetti D. , 2016)“ *Consumo de ácido Sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre*” La lixiviación ácida es el proceso más utilizado para la recuperación de cobre desde minerales oxidados. La rentabilidad de esta operación va a estar determinada por el consumo de ácido sulfúrico y el grado de extracción de cobre. Se sabe que un aumento en la concentración de ácido en las soluciones lixiviantes impulsa una mayor recuperación de cobre,

pero también se produce un elevado consumo de ácido por especies reactivas de la ganga, lo que repercute negativamente en la economía del proceso. De estudios anteriores se sabe que con una adecuada selección del nivel de concentración de ácido es posible optimizar el consumo de ácido en el proceso.

De esta forma, el objetivo principal de este trabajo de título es identificar y estudiar los mecanismos involucrados en las cinéticas del consumo de ácido y de disolución del cobre de un mineral al variar la concentración de ácido sulfúrico en la solución lixiviante. Se estudió el comportamiento de un mineral oxidado con una ley de 1,2% de cobre principalmente presente como cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), con un diámetro de partícula entre 0,93 y 1,4 cm. Se realizaron pruebas experimentales de lixiviación ácida en columnas diferenciales inundadas con circulación de la solución inducida mediante un agitador. Se analizó el efecto de la concentración de ácido sobre la velocidad de lixiviación utilizando las siguientes concentraciones: 2, 3, 5, 10, 15 y 20 g/l. Luego, para la interpretación de los datos experimentales se ajustó el modelo del núcleo sin reaccionar, con el fin de identificar los mecanismos involucrados en los procesos de lixiviación.

En base a estudios anteriores de lixiviación de minerales oxidados de cobre se esperaba que la velocidad de lixiviación de cobre no aumentara con la concentración de ácido a concentraciones sobre los 5 [g/l]. Por lo tanto, el comportamiento observado con este mineral indica que en la lixiviación de la cuprita interviene también el ión férrico como agente lixiviante, ion producido por la lixiviación de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y limonita ( $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n(\text{H}_2\text{O})$ ) presentes en la ganga de este mineral. Este mecanismo impide que en este caso se pueda controlar el consumo de ácido durante la lixiviación de este mineral sin afectar la disolución de cobre. Se logró estudiar detalladamente las cinéticas de consumo de ácido y disolución de cobre, y se determinó el mecanismo que controla estos procesos, encontrándose los parámetros claves que

caracterizan al mineral. Un estudio cinético como el que se realizó en este trabajo brinda información relevante sobre el comportamiento de un mineral bajo condiciones controladas, que puede ser aplicada en el diseño de las soluciones en los procesos de producción de cobre mediante la vía hidrometalúrgica, aumentando la lixiviación de cobre y disminuyendo el consumo de ácido sulfúrico, es decir, mejorando la economía de todo el proceso.

## 2.2. antecedentes nacionales

(Mamani J. & Collque M, 2020) "Extracción Del Cobre Mediante Lixiviación Por Agitación De Los Relaves Del Yacimiento San Rafael De Belén - Canas". La presente investigación, tiene por objetivo la extracción de cobre mayor al 90%. Se utilizó una técnica de lixiviación con ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), donde se ha demostrado una recuperación de cobre sulfurado de 86.22% además de contar con la presencia de minerales oxidados de cobre, así como la crisocola y la malaquita (4.15 % total en promedio), los cuales fueron determinados por medio del proceso de lixiviación. Como consecuencia de que los relaves cuentan con una granulometría fina se ha visto por conveniente someterlo al proceso de lixiviación por agitación, las pruebas fueron evaluadas por el diseño factorial  $2^k$  y se ha considerado el ácido sulfúrico como agente lixivante además de las siguientes variables: tiempo de lixiviación, concentración de ácido y porcentaje de sólidos. Se concluye que con las pruebas experimentales realizadas se logra una extracción de 96.27% de cobre, tomando en consideración los siguientes valores óptimos en remplazo de las variables del proceso de lixiviación: 4 Horas, 60 g/l de ácido y 20 % sólidos, para sustituirlo en el siguiente modelo matemático a escala natural: % de extracción de

$$Cu = 72.451 + 2.012.Z_1 - 0.2076.Z_2 + 0.332.Z_3.$$

(Aguila & Valencia, 2020) “Lixiviación acida de minerales oxidados de cobre del yacimiento de La zona de Tambo – Cocachacra.” tiene por objetivo la extracción del cobre. La presente investigación se complementa con aspectos introductorios (teóricos) para la lixiviación acida de minerales oxidados de cobre. En un primer instante se identifican y cualifican las características mineralógicas. El yacimiento TAMBO - COCACHACRA, presenta especies mineralógicas tales como, abundante cantidad de óxido de cobre (malaquita, azurita, crisocola, cuprita), óxido de hierro como limonitas y magnetitas de forma ovoidal, hierro libre y calcopirritas. Se determinó la gravedad específica mediante el método de la probeta, posteriormente se determina la densidad aparente del mineral, el análisis granulométrico y el tiempo de chancado del mineral del estudio. Por las características físicas, químicas, mineralógicas y por las pruebas preliminares, se plantea la presente investigación para determinar una extracción adecuada mediante el tratamiento metalúrgico por lixiviación acida de minerales oxidados de cobre, para lo cual se realizaron las ocho pruebas experimentales y más las tres replicas planificadas por el diseño factorial. El mejor resultado se obtiene con la combinación de tiempo de 30 días, concentración de ácido (20 g/litro), tamaño de partícula 3/8" y la extracción de cobre es: 90.19% Finalmente se realiza las pruebas de optimización utilizando el diseño factorial 23, para evaluar las variables del proceso de lixiviación acida de minerales oxidados de cobre, se concluye que las variables de mayor incidencia son el tiempo de lixiviación y concentración de ácido. Se llega a un modelo matemático de primer orden ( $Y$  estudiado =  $83.739 + 0.1521X_1 + 0.108X_2$ ) para la extracción del mineral de cobre oxidado presente en el yacimiento.

### 2.3. Antecedentes locales

(Aviles & Cutire, 2020)“Lixiviación Por Agitación De Minerales Oxidados De Cobre De La Zona De Taypitunga- Layo-Canas-Cusco”. tiene por objetivo extraer cobre a través de lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre de la zona Taypitunga–Layo–Canas–Cusco. Los minerales oxidados de cobre tienen por lo general una baja ley, para el presente estudio de investigación se ha trabajado con una muestra inicial de 40 kg de donde se muestreo hasta llegar a una muestra representativa de 10 kg para el diseño experimental con una granulometría de 100 % -100 mallas con el fin de liberar las especies mineralógicas valiosas, este mineral tiene una ley de 4.63 % de Cobre soluble y 5.17 % de Cobre total. Por la presencia de sus características de este mineral se han realizado pruebas de lixiviación por agitación a nivel de laboratorio con diseño factorial 2<sup>3</sup>. De acuerdo a las pruebas preliminares de lixiviación por agitación se ha podido establecer que las variables de mayor influencia son: la concentración de ácido sulfúrico, porcentaje de sólidos y el tiempo de lixiviación; variables que han sido de mayor significado para realizar las pruebas en la cinética de lixiviación y en el diseño factorial 2<sup>3</sup>. En estas condiciones, la mejor extracción se logra a 92.47 % de Cobre en el diseño factorial 2<sup>3</sup>, relativamente superior a las condiciones de extracción de la cinética de lixiviación que es de 91.15 % de Cobre. Finalmente, los parámetros más importantes en este proceso de extracción fueron: Concentración de ácido sulfúrico de 60 g/l, 20% porcentaje de sólidos y con un tiempo de 4 horas de lixiviación.

## 2.4. Bases teóricas.

### 2.4.1. Fundamentos de la lixiviación del cobre

La lixiviación consiste en la disolución de la especie de interés de mineral, por acción de un agente lixivante externo o proporcionando directamente por el mineral en condiciones apropiadas. Los procesos de lixiviación dependiendo de las condiciones de concentración del mineral (concentrado, mineral de alta o baja ley), y de sus características químicas y 14 mineralógicas (sulfuros, óxidos o mixtos) se pueden efectuar en los siguientes tipos de procesos.

Se estudia y analiza la descripción del proceso de fabricación de una planta productora de sulfato de cobre hidratado, teniendo en cuenta su reacción química, condiciones de operación, los equipos empleados, diagrama de flujo. Se ha tomado en cuenta los riesgos y las medidas de seguridad adoptadas en el manejo de ácido sulfúrico por ser muy corrosivo y del producto  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , por sus múltiples aplicaciones en el sector industrial como agrícola, minero, tratamiento de agua entre otros (Martinez, 2016).

#### **Agentes oxidantes**

Un análisis de la solubilidad de los sulfuros de metales, permite analizar y visualizar de manera manera cualitativa las diferentes especies a los cuales está unido:

a) Los cationes del grupo IA;  $\text{Ba}^{2+}$  y otros producen sulfuros solubles en agua.

b) Los cationes como  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , Etc., producen sulfuros insolubles en agua, pero se disuelven en ácidos fuertes ( $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

c) Los cationes como  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ , Etc., producen sulfuros insolubles en agua y ácidos Fuertes.

### **2.4.2. *Propiedades de los Agentes lixiviantes***

Existen una serie de variables que influyen decisivamente en la elección del agente lixiviante ideal para cada proceso, como la naturaleza del mineral o concentrado a lixiviar y deben tener algunas de las siguientes características (Ballester, 2016, 38):

a) Que sea selectivo, es decir, que disuelva en forma efectiva el metal que se pretende recuperar y que sea prácticamente inerte con los demás componentes del mineral o concentrado.

b) Que la concentración del agente lixiviante no sea muy alta y que reaccione disolviendo los valores metálicos a la temperatura ambiente.

c) Los valores metálicos disueltos que se encuentran en fase acuosa pueda recuperarse fácilmente precipitándoles, con un reactivo químico o por precipitación electrolítica

d) Que sea barato

e) Que no sea toxico.

f) Que sea regenerarle

Los agentes lixiviantes más utilizados: Agua, Aire, peróxido de hidrógeno, disoluciones de sales en agua (Sulfato férrico, cloruro férrico, cloruro de sodio, cianuro sódico, tío sulfato).

Ácidos: Ácido sulfúrico, Ácido clorhídrico, Ácido nítrico,

Bases: Hidróxido de sodio, Hidróxido de amonio

### **2.4.3. *Métodos Lixiviación.***

El mineral genera un lecho continuo de partículas que se irriga con una solución de ácido sulfúrico; es el agente lixiviante quien interactúa con el lecho mineral y, a medida que se desprende, va disolviendo el metal de interés. La solución abundante se recolecta en la superficie

del lecho y posteriormente se adentra en la fase de purificación con la extracción del elemento e interés; en caso de ser por agitación, la solución se consigue sedimentando y filtrando la pulpa.

continuación, abordaremos los distintos métodos de lixiviación que cumplen con el objetivo principal de cualquier proyecto metalúrgico, o sea, obtener el máximo beneficio económico con el menor número de costos y procedimientos posibles.

Por lo tanto, cada uno de estos métodos busca lograr el correcto balance entre los recursos aportados y el beneficio alcanzado al procesar estos recursos (Gaviria et al., 2007)

Entonces se puede disponer de los siguientes métodos de lixiviación para recuperar al cobre desde el mineral:

#### **2.4.3.1. Lixiviación en lugar (in place o in situ)**

Involucra la lixiviación de una mena fracturada en el yacimiento. La mena puede ser mineral de baja ley no extraído en la explotación del yacimiento y dejando en el lugar, o también cuerpos mineralizados que no pueden ser explotados por métodos convencionales. La zona a lixiviar puede ser superficies o subterráneas. Los tiempos de lixiviación son de varios meses hasta años.

La lixiviación también tiene lugar en la naturaleza, donde las rocas se disuelven por el agua. Después de la lixiviación, las rocas se quedan con una proporción menor de minerales de lo que originalmente contenían. El proceso de lixiviación en la minería se lleva a cabo como lixiviación en pilas o insitu lixiviación (Gonzales & Escobar, 2020).

#### **2.4.3.2. Lixiviación en bateas**

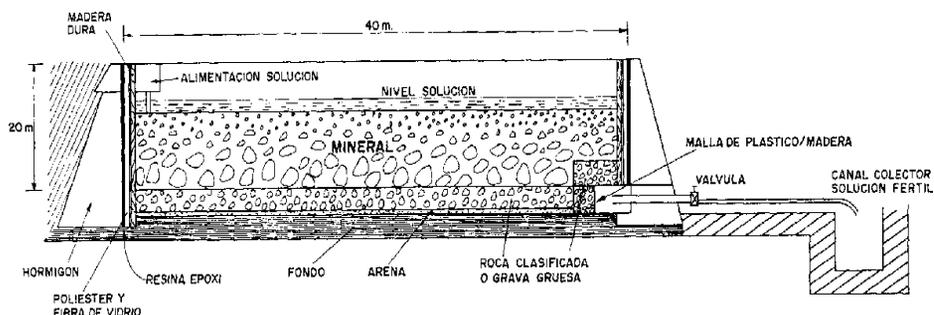
Consiste en contactar un lecho mineral con una solución que percola e inunda la batea, que está provista de un fondo falso cubierto con medio filtrante. La geometría del lecho la establece la batea. Este proceso es efectivo en aquellos casos donde el mineral a lixiviar presente

características especiales como alta ley de óxidos y mineralización expuesta, alta porosidad, baja generación de fino 16 durante el chancado y el ataque químico, baja retención de humedad y mínima comparación de lecho. Los ciclos de lixiviación en este caso son de varios días. Esta técnica consiste en contactar un lecho de mineral con una solución acuosa que percola e inunda la batea o estanque

#### **2.4.3.3. Lixiviación en botaderos**

El método es aplicado para minerales de cobre de leyes marginales (menor que 0,4 % de Cu), manejando así grandes volúmenes de material que son depositados sobre la topografía existente en la zona, aprovechando a las pendientes para el drenaje natural de soluciones. La solución lixivante es aplicada sobre la superficie, mediante un sistema de distribución percolando por gravedad. El tiempo de lixiviación es de varios años, con recuperación entre un 20 % y 50 % (Ortiz, 2012).

La lixiviación en pilas y en botaderos es el término dado a la técnica hidrometalúrgica de extraer metales pasando una solución a través de una pila de mineral. La solución lixivante reacciona químicamente con el mineral, disolviendo los metales y retirándolos de la roca mineralizada, produciendo una solución “rica” (Nuñovero, 2018). Los minerales a tratar por este método deben presentar contenidos metálicos altos o muy altos, debiendo ser posible lixiviar el mineral en un período razonable (3 a 14 días) y en trozos de tamaño medio con tonelajes suficientes de mineral percolable en el yacimiento que permitan amortizar la mayor inversión inicial que requiere este tipo de proceso.

**Figura 1***lixiviación en botadero*

Nota: Diseño de un sistema de lixiviación en pilas

Se basa en la percolación de la solución lixivante través de un mineral chancado y apilado, el que está formando una pila sobre un terreno previamente impermeabilizado. La base de la pila tiene una pendiente tal que permita que el líquido escurra a la canaleta de recolección de soluciones. La pila se riega por aspersión o goteo. La solución drenada se colecta en un estanque, para luego ser enviada a la etapa de recuperación del metal de interés, obteniéndose una solución agotada, la cual es acondicionada y reutilizada para lixiviar nuevas pilas de mineral. Se aplica a minerales de alta ley debido a los costos de operación y transporte. Los tiempos de lixiviación en este proceso son de algunas semanas en el caso de minerales oxidados y varios meses en el caso de sulfuros.

La lixiviación en pilas y en botaderos es el término dado a la técnica hidrometalúrgica de extraer metales pasando una solución a través de una pila de mineral. La solución lixivante reacciona químicamente con el mineral, disolviendo los metales y retirándolos de la roca mineralizada, produciendo una solución “rica” (Nuñovero, 2018).

En este método de lixiviación se agita un mineral finamente molido, lo que aumenta el área de contacto entre la superficie y la solución lixiviante. Este método se utiliza con minerales de alto valor comercial, por ejemplo, en la extracción de cobre, oro, plata, entre otros (Lombana, 2018).

Se necesita disponibilidad de amplias superficies de terreno llanas (menos de 10% de pendiente). La cancha debe ser considerada con su sistema de impermeabilización, para controlar las pérdidas de soluciones y evitar contaminaciones del medio ambiente. El sistema consiste en:

- Una base firme y consolidada, debidamente preparada
- Una capa de lecho granular sobre el que apoyar suavemente la lámina
- La lámina o capa de impermeabilización
- Un conjunto de drenaje o capa de recolección de líquidos
- Una capa protectora del sistema

## Figura 2

*lixiviación en pila*



*Nota:* estanque donde se almacena la solución cargada con el metal disuelto, que luego será procesado en la etapa de extracción (Ballester tomo I)

#### **2.4.4. Lixiviación en columnas**

El examen de lixiviación en columna de la norma ASTM consiste en columnas de 15 cm de diámetro, generalmente hechas de PVC o acrílico, como se muestra en la figura N° 03. La columna termina con dos platos perforados y un empaque de la columna de material es sostenida por la lana de vidrio. Una bomba peristáltica alimenta el sistema por la parte superior para asegurarse de que haya un flujo regular y que tenga suficiente espacio para inundar la superficie de la columna de agua. Al pasar el extractante a través de la lana de vidrio, el sistema descarga por la parte baja. y los platos perforados, que conforman. Con toda propiedad podemos afirmar que las columnas de lixiviación constituyen una importante herramienta a nivel de laboratorio para poder entender el fenómeno de la movilización de contaminantes producto de la meteorización de materiales provenientes de sistemas complejos como son botaderos, escoriales y tranques o depósitos de relaves. Las columnas de lixiviación nos permiten trabajar con perfiles de material geológico similares a los encontrados en los botaderos y someterlos a meteorización forzada para simular el efecto de la lluvia bajo condiciones sitio específicas para conocer en detalle cuales son los elementos y sustancias movilizadas.

### Figura 3

#### *Lixiviación en columnas*



*Nota:* lixiviación en columnas con tubería PVC

### 2.5. Características de los minerales de cobre

Las reacciones de lixiviación generalmente son dependientes de la presencia de los tipos de rocas que albergan a minerales que pueden ser principalmente sulfurados y oxidados. Es por ello que el cobre está presente en una amplia gama de mineralizaciones tales como: óxidos, carbonados, silicatos, hidróxidos de cobre y hierro, y otros; los que 18 son lixiviados usando mezclas de ácidos sulfúricos, sulfato férrico y bacterias; obviamente dependiendo del tipo de mineralización presente. A continuación, se detallan antecedente de las especies mineralógicas más importantes.

#### 2.5.1. *Minerales de cobre*

Los minerales de cobre se presentan en la naturaleza en forma de menas sulfuradas, menas oxidadas y en asociaciones con oro, sulfuros metálicos, constituyendo sulfuros complejos; de estos solo nos interesaran los dos primeros grupos para realizar las pruebas de la determinación cinética.

Los principales óxidos de cobre que se encuentran en los minerales oxidados o mixtos (sulfuros y óxidos) se muestran en la tabla 1; los cuales dentro de sus propiedades físico químicas y de comportamiento mineral presentan docilidad frente al ataque del ácido sulfúrico.

**Tabla 1**

*Óxidos de cobre, presente en minerales mixtos*

mineral	Formula
crisocola	$CuSiO_3 \cdot 2H_2O$
tenorita	$CuO$
cuprita	$Cu_2O$
azurita	$Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$
malaquita	$Cu_2(OH)_2CO_3$
brocantita	$CuSO_4 \cdot 3Cu(OH)_2$

Fuente:(elaboración propia)

La disolución de estas especies se puede lograr al contactarlas con cantidades suficientes de concentración con solución ácida; prestando especial interés al consumo del ácido especialmente de la malaquita que al tratarse de un carbonato requerirá mayor consumo de ácido.

#### **2.5.1.1. Efecto Especies Mineralógicas con Cobre**

Se pueden observar grandes diferencias entre las distintas especies de minerales procedentes de cada zona en los yacimientos, lo cual también involucra los niveles de extracción minera que tienden a cambiar el comportamiento y enriquecimiento de leyes cupríferas entre otras especies. Las especies cupríferas más importantes de cada zona se pueden observar en la

**Tabla 2***Principales minerales de cobre (composición química.)*

zona mineralizada	especie mineralógica	composiciones más frecuentes	cobre (%)
	cobre nativo	$\text{Cu}^{\circ}$	100
	malaquita	$\text{Cu}_2\text{CO}_3\text{Cu}(\text{OH})_2$	57.5
	azurita	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2\text{Cu}(\text{OH})_2$	55.3
	chalcantita	$\text{Cu}(\text{SO}_4) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25.5
	brochantita	$\text{Cu}_4\text{SO}_4\text{Cu}(\text{OH})_2$	56.2
zona oxidada	atacamita	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59.5
	crisocola	$(\text{Cu},\text{Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$	36.2
	diopstasa	$\text{Cu}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	40.3
	cuprita	$\text{Cu}_2\text{O}$	88.8
	tenorita	$\text{CuO}$	79.9
	delafosita	$\text{FeCuO}_2$	42
	Copper Wad	$\text{CuMnO}_2\text{Fe}$	variable
	copper pith	$\text{CuMn}_2\text{FeSiO}_2$	variable
	calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$	79.9
	Ddigenita	$\text{Cu}_9\text{S}_5$	78.1
zona secundaria	covelina	$\text{CuS}$	66.5
	cobre nativo	$\text{Cu}^{\circ}$	100
	calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	34.6
zona primaria	bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	63.3
	enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$	48.4

Fuente:(elaboración propia)

Se debe tener en cuenta que, a diferencia de otros fenómenos fisicoquímicos, en donde la energía de activación es aplicada a través de la temperatura; para el caso de los minerales oxidados de cobre la fuerza activadora es proporcionada por la existencia y por la cantidad disponible de los iones hidrógeno en la misma solución lixivante. De manera similar ocurre en el caso de los minerales sulfurados, en la cual ocurre que la fuerza activadora es proporcionada por la presencia y concentración de un aceptor de electrones, tales como el oxígeno disuelto en el ion férrico.

Es por ello que la cinética de lixiviación de los distintos minerales de cobre está directamente relacionada con el número de electrones que se necesita remover para hacer soluble a cada una de las especies, es decir del mecanismo electroquímico que se presente. La información cualitativa de cinéticas relativas se presenta en la Tabla 3, en donde se separa las especies mineralógicas en 5 categorías ordenadas.

**Tabla 3**

*Velocidad de disolución de las principales especies de cobre al lixiviarse con una solución diluida de ácido sulfúrico.*

Cinética Relativa	Tiempo de Referencia	Especie Minerales de Cobre
Muy Rápida (A temperatura ambiente)	Minutos (Disolución Completa)	Carbonatos (Malaquita, Azurita) Sulfatos (Chalcantita, Brochantita) Cloruros (Atacamita)
Rápida (Requiere mayor acidez)	Horas (Disolución Completa)	Oxidos Cupricos (Tenorita) Silicatos (Crisocola, Diaptasa)
Moderada (Requiere oxidante)	Días a semanas (Disolución puede ser no Completa)	Cobre Nativo, Oxidos Cuprosos (Cuprita, Delafosita) Oxidos Complejos con Magnesio (Copper Wad, Copper pitch)

Lenta (Requiere oxidante)	Semanas a meses (Disolución puede ser completa)	Sulfuros Simples (Calcosina, Covelina, Digenita)
Muy lenta (Requiere oxidante)	Años (Disolución es Incompleta)	Sulfuros Complejos (Bornita, Calcopirita, Enarguita)

Fuente:(elaboración propia)

### 2.5.1.2. Ganga en el mineral

La presencia de las gangas durante el proceso de lixiviación de los minerales de cobre puede manifestarse principalmente a través del consumo de ácido sulfúrico, generando efectos en la cinética de disolución y el grado de penetración (permeabilidad) de las partículas, así mismo durante la percolación de las soluciones.

Se debe tener en cuenta que la presencia de las gangas que tienden a consumir mayor cantidad de ácido son los carbonatos; en el caso de minerales de cobre los carbonatos más abundantes son: magnesita ( $MgCO_3$ ), dolomita ( $Ca Mg (CO_3)_2$ ), calcita ( $CaCO_3$ ), y siderita ( $FeCO_3$ ), se podría esperar que la disolución acida en estos minerales aumente la superficie accesible para la lixiviación. Sin embargo, la descomposición de estos carbonatos suele acompañarse de la generación de precipitados como  $CaSO_4$  y  $MgSO_4$ , produciendo una barrera difusional que tiende a incrementar tiempo y consumos del ácido sulfúrico utilizado.

En general la descomposición de carbonatos tiene una cinética mayor que la lixiviación simultánea de los minerales expuestos y por lo tanto la formación de precipitados tendrá un efecto adverso al bloquear el acceso a los sitios de reacción e influir desfavorablemente sobre la permanencia de la pila y la percolación de las soluciones (Lynn, 1997).

Pero también existe otra variedad de ganga consumidora de insumos, la cual está la constituida por los minerales de clorita ( $(Mg, Fe, Al)_6 (Si, Al)_4 O_{10} H_8$ ) y los silicatos; estos minerales reaccionan mucho más lento que los carbonatos y no pueden ser completamente

eliminados en la primera etapa de acidificación del mineral (curado). Es por ello que luego junto con los carbonatos residuales, persisten en las etapas iniciales de lixiviación.

Otro tipo de ganga la constituye aquellas que contienen potasio, fundamentalmente en la forma de minerales de feldespato de potasio  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  y las arcillas obviamente que se asocian también a esta estructura. Este tipo de ganga libera normalmente  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  en presencia de ácido sulfúrico, adicionalmente solubilizarían a la sílice, que se mantiene en forma coloidal, generando posible presencia de geles en suspensión.

El potasio se encuentra en cantidad importante generalmente en depósitos porfídicos asociado en la biotita  $\text{H}_2\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{Al}(\text{SiO}_4)_3$  y silicatos minerales similares. El potasio de estas estructuras es rápidamente intercambiado por protones y otros cationes pequeños; seguidamente son disueltos los otros cationes de la estructura, pero con una cinética mucho menor (salvo la sílice que permanece como residuo) y en proporciones estequiométrica (Lynn, 1997).

Debe destacarse que la liberación del potasio, en presencia de sulfato férrico, puede producir la precipitación de jarosita potásicas  $\text{KFe}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$  (o bien del tipo sódicas, si existiera sodio); y en presencia de sulfato de aluminio puede producir también la precipitación de alunitas potásicas  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ .<sup>24</sup> Esto incide en las características de permeabilidad de la pila y en la disponibilidad de sulfato férrico como agente lixivante.

Se debe considerar también las películas de silicatos, óxidos de hierro hidratados y sulfatos de calcio precipitado, los cuales son capaces de conducir procesos de intercambio iónico con soluciones acuosas, promoviendo la remoción de algunos metales. Ejemplos de estos compuestos son minerales de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) y talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{11} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

El comportamiento de la ganga se encuentra ligado a las condiciones de acidez en las cuales se desarrolla el proceso; por ello es necesario tener como referente los diagramas de Pourbaix para un mejor control de ellas. La lixiviación a muy bajo pH puede aumentar la reactividad de la ganga mineral y de este modo acelerar el consumo del ácido. Estas reacciones pueden causar severos efectos en los equilibrios de solución y equilibrios solución – mineral, acelerando la formación de precipitados.

La composición de la ganga mineral varía en forma importante de una mena a otra, por lo cual una de las formas de caracterizarlas que podemos utilizar es medir la cinética y valor máximo de consumo de ácido que presenta en función de los elementos que conforman los minerales albergados en las rocas.

Se debe tener presente que el mineral que consume más ácido es la calcita (carbonato de calcio), que reacciona con el ácido para formar bicarbonato o ácido carbónico; así mismo estas especies entran en equilibrio para formar dióxido de carbono.

Que en los siguientes Tablas 4 y Tabla 5 se observa minerales carbonatos e hidróxido consumidores de ácido.

#### **Tabla 4**

*Minerales carbonatos consumidores de ácido y sus características mineralógicas, Minerales carbonatos consumidores de ácido y sus características mineralógicas*

Minerales	Composición	Potencial consumo de ácido (%)
Calcita / Aragonita	CaCO <sub>3</sub>	100
Dolomita	MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	92
Siderita	FeCO <sub>3</sub>	116
Magnesita	MgCO <sub>3</sub>	84

Rodocrosita	MnCO <sub>3</sub>	115
Witerita	BaCO <sub>3</sub>	196
Ankerita	CaFe(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	108

Fuente:(elaboración propia)

### Tabla 5

*Minerales hidróxidos consumidores de ácido y sus características mineralógicas*  
*Minerales hidróxidos consumidores de ácido y sus caracterizas mineralógicas*

Minerales	Composición	Potencial consumo de ácido (%)
Malaquita	Cu <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>	74
Gibsita	Al(OH) <sub>3</sub>	26
Limonita / Gestita	FeO	89
Manganita	MnO(OH)	88
Brucita	Mg(OH) <sub>2</sub>	29

Fuente:(elaboración propia)

La calcita es generalmente el más reactivo de los minerales consumidores de ácido y como además es uno de los más comunes, se utiliza como referencia para señalar el potencial de consumo de ácido de un mineral.

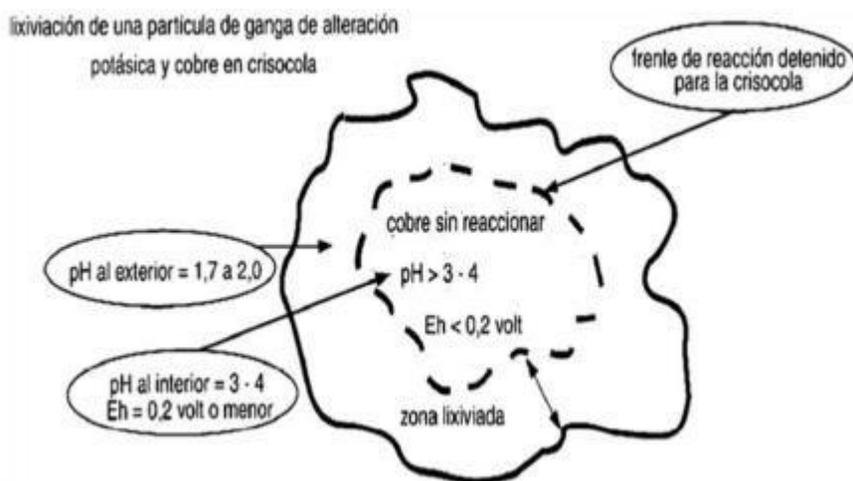
En la siguiente se expresa el potencial de consumo de ácido de los carbonatos e hidróxidos más abundantes (Lynn, 1997). Por otro lado el potencial de consumo de ácido corresponde el peso en gramos necesarios para lograr el mismo efecto neutralizador que cien gramos de calcita(Lynn, 1997).

En cuanto al efecto de la cinética de disolución con las especies mineralógicas que conforman la ganga pueden clasificarse desde muy reactivas, pasando por moderadamente reactivas, hasta ganga no reactiva con ácido sulfúrico, siendo las primeras las más perjudiciales

en la economía del proceso, debido principalmente al doble efecto que generan, al consumir ácido sulfúrico en grandes cantidades y disminuir la capacidad lixivante de la solución, decayendo la cinética de extracción de cobre, esto tiene estrecha relación con el grado de penetración en las partículas, ya que dependiendo de cuanto tiene que recorrer la solución al interior de las rocas, es cuanto se ven alteradas las condiciones iniciales de la solución lixivante, como por ejemplo el PH y la concentración de algún oxidante, como se observa en la siguiente figura(Lynn, 1997).

#### Figura 4

##### *Influencia de la ganga en la lixiviación de cobre*



*Nota:* lixiviación de una partícula de ganga de alteración potásica

Puede decirse que durante la disolución de los minerales algunas veces la ganga ocasiona un gran problema en la lixiviación del cobre; ya que por un lado producen problemas de permeabilidad y percolación en la partícula y por otro lado, ocasionan una disolución de impurezas ocasionando en la solución la precipitación de sales, aumentando los sólidos en suspensión, y en consecuencia disminuyendo así la productividad del proceso (Lynn, 1997).

Importancia de la química de soluciones, termodinámica y cinética hidrometalurgia

En general en hidrometalurgia se encuentran reacciones del tipo sólido/líquido salvo en el caso de extracción por solventes donde se trabaja en un intercambio líquido – líquido. También existen casos en que una fase gaseosa interviene en la reacción, pero en general ello ocurre previa disolución del gas en el líquido

### **2.5.1.3. Química de soluciones**

La reacción entonces se produce en la mayoría de los casos en la interface líquido – sólido y solo en algunos pocos casos entre gas y líquido o entre dos líquidos inmiscibles. Se trata en consecuencia de reacciones heterogéneas. Por ello la solución química utilizada en la lixiviación es la mezcla homogénea de una sustancia disuelta en otra sustancia en mayor proporción. Una solución química es compuesta por soluto y solvente (mineral y solución ácida). El soluto es la sustancia que se disuelve (óxidos de cobre) y el solvente la que lo disuelve (ácido sulfúrico).

### **2.5.2. Cinética de la lixiviación**

La termodinámica predice las condiciones de equilibrio a que debe llegar una reacción química en ciertas condiciones dadas, es decir, mide la tendencia de una reacción a ocurrir. Sin embargo, la termodinámica no nos dice nada acerca de la velocidad con que el sistema procederá hacia el equilibrio ni tampoco nada respecto, al mecanismo de las reacciones. La cinética por lo tanto nos dará información muy valiosa, tanto para la ingeniería de un proceso, como para predecir velocidades en una gran variedad de condiciones. Esto es importante porque el metalurgista necesita lograr un rendimiento óptimo en el menor tiempo posible. La importancia de la cinética trata de las velocidades en que los procesos, reacciones químicas y fenómenos difusionales que ocurren, son dependientes del tiempo; lo cual los análisis indican dependencia de la granulometría y concentración del ácido.

En general, un estudio cinético puede aportar dos tipos de información importantes para:

### **2.5.3. *Diseño de quipos y proceso.***

#### **2.5.3.1. Determinación de mecanismos.**

Conocer cuáles son los factores que determinan la velocidad de un proceso y como puede ser éste manejable en la práctica, es muy importante en todo proceso metalúrgico, pero en hidrometalurgia es un apoyo fundamental por varias causas:

- ✓ Los procesos hidrometalúrgicos operan a temperatura ambiente o algo superior.
- ✓ Las reacciones son de carácter heterogéneo.

En general, los procesos hidrometalúrgicos aplicados son lentos.

El mecanismo de reacción entre un sólido y una solución involucra las siguientes etapas consecutivas:

1. Disolución de reactantes gaseosos en la solución acuosa (si los hubiera).
2. Transporte de los reactantes disueltos hacia la interfase sólido-líquido.
3. Transporte de los reactantes a través de una capa producto o ganga de mineral hacia la superficie de reacción (difusión: poros; sólido).
4. Reacción química de los reactantes con el mineral (reacciones; adsorción; químicas; electroquímicas).
5. Transporte de los productos solubles a través de la capa producto hacia la superficie sólido-líquido.
6. Transporte de los productos solubles hacia el seno de la solución.

Esto puede ser tanto en cuanto a la velocidad de reacción química propiamente tal como a la rapidez en que ocurren los fenómenos de transporte de masa y difusionales involucrados.

La cinética química es el estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos mediante los que tienen lugar. La cinética química introduce la variable tiempo en el estudio de las reacciones químicas y estudia el camino que siguen los reactivos para convertirse en productos.

Así para evaluar un proceso determinado en Hidrometalurgia, interesara verificar además que este sea termodinámicamente posible o favorable, cual es la velocidad cinética a la que ocurre este proceso o transformación.

Por su parte la cinética medida a través de una cierta tasa de transformación entregara valiosa información sobre los mecanismos de reacción; sea de una reacción propiamente tal, o bien de fenómenos de transporte y difusionales que controlan el proceso de disolución. Esto permite influir sobre los mecanismos controlantes y acelerar las transformaciones buscadas.

Existen muy pocos antecedentes y base de datos cinéticos propios de la hidrometalurgia; por lo tanto, en la mayor de los casos debe trabajarse con la información existente procedente de laboratorio y de plantas metalúrgicas.

Nuestro próximo objetivo será definir la velocidad de reacción de modo que sea significativa y útil. Para ello adoptamos una serie de definiciones de velocidad de reacción, relacionadas entre sí, empleando magnitudes intensivas mejor que extensivas, seleccionando un componente *i* para definir la velocidad en función de este componente. Se considera a la velocidad de cambio en el número de moles de un componente (*i*) debido a la reacción en un determinado tiempo. Se define de los modos siguientes:

Basada en la unidad de volumen del fluido reactante:

$$r_i = \frac{1}{V} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de fluido}) (\text{tiempo})} \quad \text{Ecu. (1)}$$

Basada en la unidad de masa de sólido en los sistemas sólido-fluido

$$r'_i = \frac{1}{W} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{masa de sólido}) (\text{tiempo})}$$

Ecu. (2)

Basada en la unidad de superficie de interfase en los sistemas de dos fluidos, o basada en la unidad de superficie de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r''_i = \frac{1}{S} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{superficie}) (\text{tiempo})}$$

Ecu. (3)

Basada en la unidad de volumen de sólido en los sistemas gas-sólido:

$$r'''_i = \frac{1}{V_s} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de sólido de reactor}) (\text{tiempo})}$$

Ecu. (4)

Basada en la unidad de volumen del reactor, si es diferente de la velocidad basada en la unidad de volumen de fluido:

$$r''''_i = \frac{1}{V_r} \frac{dN_i}{dt} = \frac{\text{moles de } i \text{ formados}}{(\text{volumen de reactor}) (\text{tiempo})}$$

Ecu. (5)

### 2.5.3.2. Velocidad de reacción

A continuación, conviene pasar a definir la “velocidad de reacción” que, para una reacción cualquiera, será la variación del número de moléculas de los reaccionantes, es decir, corresponde a una disminución – o bien la variación del número de moléculas del producto de la reacción, es decir si se trata de un aumento en ambos casos en función del tiempo. (Bustamante & Gaviria, 2007).

En muchos casos, la velocidad de reacción, también puede expresarse como el producto de las concentraciones de los reactivos C1 y C2, y los exponentes: m y n, son denominados “orden de la reacción”. Con respecto a los reactivos 1 y 2 respectivamente.

$$v = kC_1^m C_2^n$$

Ecu. (6)

A su vez ( $n + m$ ) representan el “orden global de la reacción” y puede ser un número entero o fraccionario positivo o negativo. La constante de proporcionalidad ( $k$ ), es llamada “constante de velocidad de la reacción”. Su valor varía con la temperatura, de acuerdo a la “Ecuación de Arrhenius”.

$$K = Ae^{-Ea/RT} \quad \text{Ecu. (7)}$$

Dicha ecuación también puede expresarse en término logarítmico:

$$\log_{10}k = -Ea/(2,30RT) + \text{constante} \quad \text{Ecu. (8)}$$

O bien en términos diferenciales:

Donde:

$k$  = constante de velocidad de reacción

$R$  = constante de los gases (1,987 cal/K\* $\text{mol}$ )

$Ea$  = Energía de activación (Kcal/ $\text{mol}$ )

$A$  = Constante con factor de frecuencia, representa el número de colisiones.

$T$  = Temperatura en grados Kelvin.

### 2.5.3.3. Reacciones de primer orden

Para los casos en que una reacción o transformación ocurra en una misma fase estaremos hablando de una cinética homogénea. Por ejemplo, este será el caso de dos sustancias disueltas en un líquido (A y B) los “reactantes” que reaccionan produciendo otra sustancia (C), y el “producto de la reacción”, que también estarán disueltas en el mismo líquido. (Bustamante & Gaviria, 2007)

Si se tiene, por ejemplo:  $A + B \rightarrow C$ , reacción que ocurre en todo el reactor, en condiciones heterogéneas de concentración de cada uno de los dos compuestos, si la reacción no depende de la concentración de la especie B, la velocidad sería:

#### 2.5.3.4. Reacciones de segundo orden

La reacción de orden dos en el reactivo A (órdenes parciales en A y total iguales a dos) sigue una ecuación de la forma:

$$\text{Caso I} \quad v = k[A]^2 \quad \text{Ecu. (9)}$$

$$\text{Caso II} \quad v = k[A][B] \quad \text{Ecu. (10)}$$

Reacción del mineral de malaquita con ácido sulfúrico.



#### 2.5.4. Modelos cinéticos usados en la lixiviación de malaquita con diferentes agentes lixiviantes

Algunos autores propusieron modelos cinéticos para aplicar en la lixiviación de minerales de malaquita. Así se tiene:

##### 2.5.4.1. Modelo cinético usado por Bingöl y Canbazoglu (2004)

Hicieron la evaluación cinética de malaquita, con ácido sulfúrico, indicando que ni los modelos de difusión ni los de reacción son capaces de explicar la reacción inicial rápida y el periodo de lixiviación completo. Sin embargo, indicaron que la disolución inicial puede ser modelada usando una función logarítmica

$$y = a \ln(x) + b \quad \text{Ecu. (11)}$$

Donde “a” y “b” son los coeficientes constantes “y”, es la recuperación de cobre, “x” es el tiempo de lixiviación. Su “Ea” fue de 1.3 kJ/mol, indicando que la etapa inicial de disolución, fue controlada por la difusión, apoyado por la agitación.

### 2.5.4.2. Modelo descrito por Wadsworth-Dickinson

Este modelo está basado en la transferencia de la interface y la difusión a través de la capa de producto, ambos afectan la velocidad de reacción. Se usó en el experimento de Bingol et. al para explicar la lixiviación de la malaquita en medio amoniacal. La ecuación de este modelo está dada por:

$$3 \ln (1- \alpha) - [1-(1-(1- \alpha) - 1/3)] = Kt \quad \text{Ecu. (12)}$$

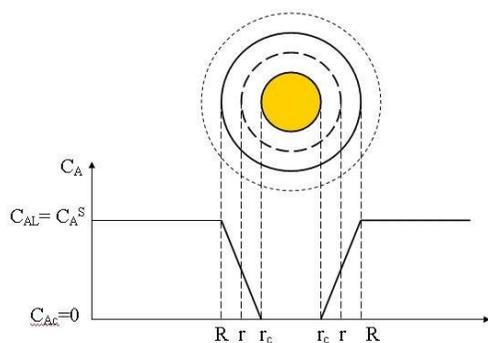
Se usará como modelo la siguiente reacción que corresponde al caso de la lixiviación de una especie mineral B con un reactivo de lixiviación A, produciendo un producto soluble C y un producto sólido D. En el caso de la lixiviación ácida de tenorita, H<sup>+</sup> corresponde a A, CuO a B, y Cu<sup>+2</sup> al producto soluble de la reacción. En el caso de la lixiviación de covelina con ión férrico, Fe<sup>+3</sup> corresponde a A, CuS a B, Cu<sup>+2</sup> y Fe<sup>+2</sup> a C, S<sub>0</sub> al producto sólido D.

### 2.5.5. Caso control difusional

La figura representa la configuración y el perfil de concentración de reactivo en un cierto momento de la lixiviación de una partícula R.

#### Figura 5

*Cinética de reacción heterogénea cinética*



Fuente: Hidrometalúrgica de cobre (Ballester pag.38)

✓ **ETAPA A**

La velocidad de reacción (de consumo) del agente lixivante está dada por su velocidad molar de difusión. En la superficie genérica de radio  $r$  ésta es:

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 Q_A \quad \text{Ecu. (13)}$$

En que  $Q_A$  es la densidad de flujo de A (moles A/ t x área) en el sólido a través de la superficie de la esfera de radio  $r$ , y que está dada por la Ley de Fick:

$$Q_A = D_{eff} \left. \frac{dC_A}{dr} \right|_{r=r} \quad \text{Ecu. (14)}$$

Donde  $D_{eff}$  es el coeficiente de difusividad efectiva del reactivo lixivante A a través de la capa de sólido reaccionado. Combinando ecuaciones 2 y 3 se tiene:

$$-\frac{dN_A}{dt} = 4\pi r^2 D_{eff} \frac{dC_A}{dr} \quad \text{Ecu. (15)}$$

Pero como el radio del núcleo sin reaccionar varía muy lentamente en relación a la velocidad de desplazamiento de A hacia la zona de reacción, se alcanza un estado pseudo-estacionario en el cual el flujo de A,  $-dN_A/dt$ , es constante. Luego se puede integrar a lo ancho de la zona no reaccionada, desde  $R$  a  $r_c$ :

$$-\frac{dN_A}{dt} \int_R^{r_c} \frac{dr}{r^2} = 4\pi D_{eff} \int_{C_{As}}^{C_{Ac}} dC_A \quad \text{Ecu. (16)}$$

Se obtiene:

$$-\frac{dN_A}{dt} = \frac{4\pi D_{eff} C^{As}}{\left( \frac{1}{r_c} - \frac{1}{R} \right)} \quad \text{Ecu. (17)}$$

## ✓ ETAPA B

la segunda etapa del análisis se considera la variación del tamaño del núcleo sin reaccionar en el tiempo. Para un determinado tamaño  $r_c$  del núcleo vimos  $-dNA/dt$  se puede considerar constante. Sin embargo, a medida que el núcleo disminuye su tamaño la capa de sólido a través de la cual debe difundir A para llegar a reaccionar será mayor, lo que ocasiona una disminución de la velocidad de difusión de A, o sea de  $-dNA/dt$ .

Para resolver en el tiempo es necesario relacionar primero la velocidad de consumo de A con la variación del radio  $r_c$ . Si la partícula de mineral o concentrado tiene un volumen  $V(\text{dm}^3)$  y la densidad molar de B (la especie mineral que se lixivia) en esa partícula es  $\rho_B(\text{moles B}/\text{dm}^3)$ , entonces el número total de moles en la partícula es:

$$\frac{t}{\tau} = \left[ 1 - 3(1 - X_B)^2 + 2(1 - X_B)^3 \right] \quad \text{Ecu. (18)}$$

### 2.5.6. Termodinámica

La termodinámica tiene que ver con la posibilidad o imposibilidad de la ocurrencia de un determinado proceso o reacción química, siendo disciplinas complementarias. Los procesos hidrometalúrgicos suceden a temperaturas bajas o moderadas y en fases acuosas en estas condiciones ocurre lo contrario aun cuando la termodinámica metalúrgica puede ser muy favorable medible a través de la disminución importante de la energía libre de Gibbs  $\Delta G$  grande y negativo, en la mayoría de los casos la limitación estará dada por la cinética. En ambos casos el resultado observable y medible es una determinada tasa de transformación en el tiempo. Comparativamente con el caso anterior.

### 2.5.6.1. Energía de activación

La primera consideración que se debe hacer es que las sustancias individualmente consideradas presentan un cierto grado de estabilidad en las condiciones ambientales en que permanecen y además tienden a conservar dicha situación de estabilidad. En caso de no ser ello así, se transformarían a su situación estable y permanecerían en dicha situación de ahí en adelante. Por ejemplo, el Hidrogeno en condiciones que existe como  $H_2$  y no tiende a unirse al oxígeno para formar  $H_2O$ . En cambio, si en un proceso electrolítico se forma  $H$  atómico, inmediatamente originaria una molécula de  $H_2$  (Mamani R., 2018).

Se observa que las reacciones se producen por el encuentro o por el choque entre sí de las partículas constituyentes de los elementos reaccionantes (átomos, moléculas, iones), que influirán en las causas que afectan la velocidad de esa reacción.

Entonces para que se produzca una reacción, esta antes debe encontrarse en un estado de energía superior al valor medio de las demás moléculas de los reaccionantes de tal forma que pueda vencer las fuerzas que se oponen a la situación de estabilidad.

Por ello sólo cuando se dispongan de esta “energía de activación” serán capaces de producir “encuentros eficaces”, es decir la presencia de choques tales que se genere el nuevo producto de manera efectiva, sacando a los demás reaccionantes de su situación de estabilidad identificada.

Las reacciones que ocurren en soluciones siguen una secuencia de etapas de las cuales una o más pueden ser controlantes. Estas son:

- 1.- Difusión de los reactivos para ponerse en contacto.
- 2.- Reacción de los reactivos entre sí.

3.- Difusión de los productos para separarse una vez que se han formado (Yong y Wadsworth (1986), mencionan a Glastone et al.1941). Arrhenius desarrolló un concepto para la variación de la velocidad con la temperatura, mostrando que la constante de velocidad se incrementa de forma exponencial con la temperatura:

$$K = A \exp (-E_a/RT) \quad \text{Ecu. (19)}$$

Donde:

K= constante de velocidad

R= constante de los gases

A= factor de frecuencia

T= temperatura absoluta

E<sub>a</sub>= energía de activación

Esta expresión ajusta datos experimentales sobre un amplio rango de temperaturas.

El valor numérico de la energía de activación puede ser determinado plotando ln k vs 1/T, siendo la pendiente de la recta -E<sub>a</sub>/R. El valor de la energía de activación es usualmente positivo. Este ha sido interpretado como la cantidad de energía potencial que debe ser superada antes que una reacción química específica pueda ocurrir sin consideración de la energía interna de los reactantes. Las energías de activación experimentales son frecuentemente usadas con la finalidad de diferenciar una reacción química de un proceso físico.

### **2.5.7. Estructura de los Minerales**

La estructura cristalina de los minerales, está basada en la unión entre átomos; estas uniones pueden realizarse por enlaces primarios o secundarios, según sea la energía de enlace que interviene. Los enlaces atómicos primarios son aquellos que desarrollan grandes fuerzas interatómicas y se pueden dividir en las 3 clases siguientes: metálicos, iónicos y covalentes,

aunque no es raro encontrar estructuras cristalinas en las que se presentan diferentes enlaces primarios (Bustamante & Gaviria, 2007).

Los defectos de punto y de línea en la estructura cristalina de los materiales, ocasionan desviaciones de una estructura ideal y esto a su vez, genera variaciones en las propiedades eléctricas y como consecuencia en la reactividad global del sólido, como consecuencia del movimiento de los electrones (Bustamante & Gaviria, 2007).

### **2.5.8. Cinética de la lixiviación**

Generalmente, las reacciones son del tipo heterogéneas, en el caso de la lixiviación se trata de reacciones de un sólido con los reactivos en solución, la velocidad de la reacción global será determinadas por la velocidad de la etapa más lenta que es entonces aquella que controla la cinética global; por lo cual diversas etapas deben ser consideradas, las cuales son (Bustamante & Gaviria, 2007).

- ✓ Transporte de los reactivos en solución hacia la interface sólido /líquido.
- ✓ Adsorción de los reactivos en la interface.
- ✓ Reacción química en la interface
- ✓ Desorción de los productos solubles que proviene de la reacción
- ✓ Transporte de estos productos hacia la solución.

Eventualmente, pero si se forma una capa porosa de productos subproductos sólidos de la reacción, en la interface, es necesario considerar las siguientes:

- Difusión de reactivos a través de esta capa porosa
- Difusión de productos a través de la capa porosa

### 2.5.8.1. Factores influyentes sobre la cinética

Existen diversos factores cuando se desea modificar la velocidad global de la realización de un proceso hidrometalúrgico; para lo cual hay que considerar la posibilidad de poder modificar alguno de sus factores determinantes entre ellos se destacan los efectos de interés siguientes:

- El grado de agitación o de percolación
- El tamaño de la partícula en el sólido.
- Tipo de mineralización
- La concentración del reactante.
- La temperatura.
- El uso de catalizadores.

### 2.5.9. Efecto de la concentración de reactantes

Este efecto de la concentración de reactantes permite determinar directamente la gradiente de difusión y se puede comprobar en los casos en que la difusión de los productos de la reacción sean los controlantes del proceso.

Pero por otra parte la velocidad de la reacción química es directamente proporcional a la concentración, elevado a la potencia correspondiente del orden de la reacción.

Consideremos graficar lo indicado mediante un ejemplo, para lo cual se usará el caso de la disolución de óxidos de cobre en  $H_2SO_4$  diluido, experimentalmente se observa que a bajas concentraciones de ácido el control es difusión, luego al aumentar el ácido disponible se pasa a un control químico.

la lixiviación presenta una implicancia de dependencia de control en función del grado de concentración del licor lixivante.

### **2.5.9.1. Efecto del grado de agitación**

Para el caso del estudio planteado no viene al caso el sistema por agitación, ya que se realiza la lixiviación en bateas.

Pero cabe tener ciertas consideraciones de las reacciones que al aumentarla agitación aumenta también la velocidad (la reacción), esto corresponde al caso en que la difusión controla el mecanismo global del proceso, lo que implica que la velocidad global ( $V$ ), entonces aumentara directamente proporcional con la velocidad de agitación (rpm), ya que ésta hace disminuir el espesor de la capa límite, mejorando la difusión de los reactantes y/o productos.

Pero en el caso en que la velocidad global de reacción del proceso está controlada por la velocidad de la reacción química entonces la velocidad del proceso será independiente de la agitación. Por ejemplo, considerando la disolución de cobre metálico ( $\text{Cu}^0$ ) con una solución amoniacal en presencia de  $\text{O}_2$  las condiciones operativas el proceso está controlado por la difusión; sin embargo, a una presión de oxígeno mayor el proceso está controlado por la reacción química, ya que la velocidad de disolución es independiente de la agitación aplicada. En este caso se observa que la agitación puede influir o no en la cinética según cuál sea el mecanismo controlante del proceso. Algo similar ocurrirá al aumentar la presión parcial de oxígeno durante la lixiviación del cobre.

### **2.5.9.2. Efecto de la temperatura**

La aplicación de calor durante la lixiviación permite en la mayoría de los casos incrementar la energía de activación a las moléculas reaccionantes y por tanto de aumentar la velocidad de una reacción.

En efecto, si las reacciones son endotérmicas, el suministro de calor se utiliza para incrementar la energía de activación a las moléculas reaccionantes y así promover la ocurrencia

del proceso. A su vez si las reacciones son exotérmicas se producen dos efectos; en primer lugar, se entrega calor para proporcionar la energía de activación sin el cual el proceso no se desarrolla o bien lo hace lentamente y en segundo lugar cuando la reacción desprende calor, este puede ser absorbido por el ambiente o bien puede provocar un nuevo aumento de la velocidad, en cuyo caso el proceso continúa acelerándose, terminando en una combustión o una explosión.

## CAPITULO III

### 3. HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. *Hipótesis generales*

Con el proceso de lixiviación acida se extrae el metal valioso de los botaderos de la comunidad de Qochapata con una eficacia alta.

##### 3.1.2. *Hipótesis específicas*

- ✓ A densidad de pulpa adecuada ayuda la extracción de cobre mediante la lixiviación acida.
- ✓ A una concentración de la solución acida  $H_2SO_4$  a 60g/l aumenta la recuperación de cobre en la lixiviación acida.
- ✓ El tiempo es muy significativo en la lixiviación que permite determinar la cinética y el grado de extracción del cobre.

#### 3.2. Variables

##### 3.2.1. Variables dependientes:

- ✓ Recuperación del cobre (%)

##### 3.2.2. *Variables independientes:*

- ✓ Densidad de Pulpa g/l
- ✓ Concentración del ácido (g/l)
- ✓ Tiempo de lixiviación (horas)

##### 3.2.3. *Variables intervinientes*

- ✓ Mineralogía
- ✓ Gravedad específica

### 3.3. Operacionalización de Variables e Indicadores

**Tabla 6**

*Operacionalización de Variables e Indicadores*

VARIABLES	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSION	RANGO	UNIDAD	TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE MEDICION	
DEPENDIENTE N°1	% DE EXTRACCIÓN DE COBRE	Es la Fracción de cobre presente en la solución rica en relación con el cobre presente en el mineral.	Porcentaje (%)	90-95	%	Calculo por balance metalúrgico (MS Excel)
INDEPENDIENTES	DENSIDAD DE PULPA	Es la relación que existe entre la masa del mineral y el volumen total de pulpa	Distribución de solido /liquido	1250-1350	g/l	Balanza marcy
	CONCENTRACIÓN DEL ÁCIDO H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Es la cantidad de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> presente en una solución, se expresa (g/l)	Concentración	40-60	g/l	Micropipetas
	TIEMPO DE LIXIVIACIÓN	Tiempo de contacto adecuado para lograr la disolución de cobre en contacto con solución lixivante.	Tiempo	2-4	horas	Cronometro

*Nota:* elaboración Propia

## CAPÍTULO IV

### 4. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 4.1. Tipo de investigación

Tecnológico: tendría como finalidad solucionar problemas o situaciones que el conocimiento científico consolidado como tecnología demanda, y por lo tanto no sería su objetivo descubrir nuevas leyes, y casualidades, sino la de reconstruir procesos en función de descubrimientos ya realizados (Freddy M.,2021)

#### 4.2. Nivel de investigación

##### **Descriptivo:**

En este nivel, se busca detallar las propiedades y características más relevantes del proceso de cianuración, incluyendo la descripción de las condiciones experimentales y el comportamiento del mineral durante el proceso. Se especifican las dimensiones y características del proceso hasta obtener el PLS (solución rica en oro disuelto)

##### **Explicativo:**

Este nivel tiene como objetivo establecer las causas de los fenómenos observados en el proceso de cianuración por agitación. Se analizan las relaciones entre las variables, proporcionando un entendimiento detallado de cómo cada variable afecta el porcentaje de extracción de oro. Se realiza un análisis predictivo mediante métodos estadísticos y matemáticos para prever el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones

#### 4.3. Diseño de la investigación

Este trabajo de investigación es cuantitativo experimental: porque se efectúa la manipulación más de una variable independiente (Densidad de pulpa, concentración de ácido y tiempo de lixiviación) para llevar a mejorar y elevar el porcentaje de extracción del cobre a partir de los variables independientes. En esta investigación hubo cambio de los valores de las variables independientes y se determinó la efectividad con la variable dependiente.

Para señalar las influencias de las variables operacionales del proceso de lixiviación de los

minerales de cobre, en este diseño se considera un solo grupo experimental.

En esta investigación desarrollada las causas principales a considerar son: densidad de pulpa, concentración de ácido sulfúrico, tiempo de lixiviación y el efecto es el porcentaje de extracción de cobre como consecuencia de estas variables.

X                    Y

CAUSA            EFECTO

X: variable independiente, que se manipula (causa)

Y: variable dependiente, es el efecto

**Diseño factorial  $2^k = N$**

Con la metodología del diseño factorial  $2^k$ , se estudió los efectos de los factores en dos categorías de cada uno, con respecto a las respuestas. Se indaga estudiar la conexión entre los

factores y las respuestas. Este estudio consta de  $2^3$ , en otras palabras  $2*2*2 = 8$ , son ensayos o pruebas de diseño.

$$2^k = N$$

Donde:

2: niveles de pruebas

K: factores o número (3 variables)

N: número de experimentos (8 pruebas)

Para una mejor comprensión de este diseño es apropiado establecer lo siguiente:

Niveles de un factor. Se refiere a los diferentes valores atribuidos a un factor en un experimento, o sea, el nivel de intensidad de un factor.

Combinación de tratamiento. Es la totalidad de los elementos utilizados en una experiencia específica, es decir, cualquier mezcla particular de niveles de factores.

Respuesta. Es la cifra resultante de una experiencia que se convierte en la variable dependiente.

Efecto de un factor. Se refiere a la alteración en la respuesta generada por una variación en el nivel del factor únicamente en dos niveles; el efecto, es únicamente que existe una diferencia entre los promedios de los resultados de todo el conjunto de la experiencia en el nivel alto menos los promedios del nivel bajo.

Interacción. Es la reacción diferencial a un factor en combinación con niveles variables de un segundo factor aplicado al mismo tiempo, la interacción se refiere al efecto adicional o conjunto, originado por la influencia conjunta de dos o más factores.

#### **4.4. Ámbito de investigación**

El presente trabajo de investigación, tomó como estudio el mineral procedente del yacimiento minero artesanal del centro poblado de Qochapata del distrito de Cotabambas. Las pruebas metalúrgicas son realizadas en los laboratorios de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

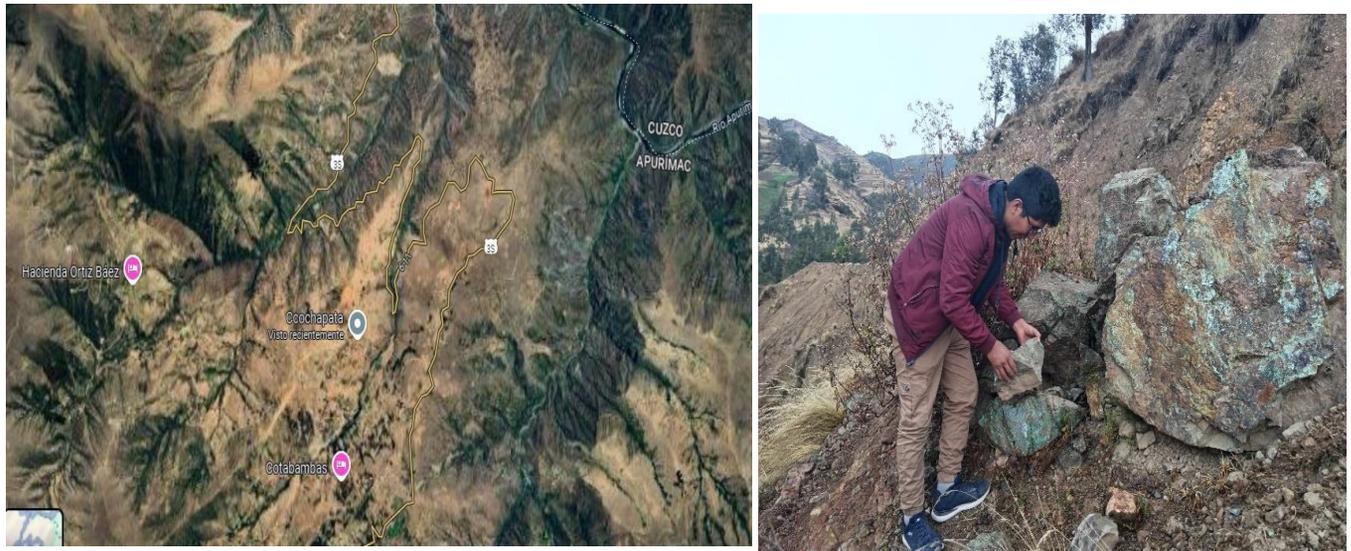
#### **4.5. Población y muestra**

##### **4.5.1. Población**

La comunidad campesina de Qochapata, siendo uno de comunidades del distrito de Cotabambas, pertenece a la provincia de Cotabambas del departamento de Apurímac; está ubicada a una altitud de 3425 m.s.n.m. y coordenadas geográficas siguientes: Latitud: -13.72498, Longitud: -72.355 y se ubica a 129 km de la ciudad del cuzco.

## Figura 6

*Ubicación del yacimiento de minerales oxidados de Cu.*



*Nota.* Adaptado de Geocatmin, (2021)

### 4.6. Muestra

La muestra representativa obtenida de los botaderos de la comunidad de Qochapata es 50 kg de mineral oxidado que generalmente el cobre se encuentra en forma de compuestos acomplexados con otros elementos, que posteriormente se desarrollara su estudio en el laboratorio de ingeniería metalúrgica con los instrumentos necesarios para su obtención de resultados.

### 4.7. Técnicas de muestreo

### 4.8. Validez y confiabilidad de instrumentos

Los instrumentos de investigación que se utilizó son equipos, materiales y reactivos netamente operativos que funcionan para el proceso de extracción por solventes de cobre, el cual en la experimentación tuvimos la recolección de datos para luego analizarlo e interpretar, cambiando algunos parámetros como la densidad de la pulpa, la concentración del ácido y el tiempo de lixiviación, luego de obtener los resultados damos a conocer en el presente informe. El trabajo de investigación realizado es validado y es altamente confiable porque trabajamos con la muestra extraído del yacimiento minero artesanal del centro poblado de ccochapata y elaborado en el laboratorio metalúrgico para conocer los parámetros óptimos.

#### **4.9. Plan de análisis de datos**

Procesamiento de Resultados: Con los datos que hemos obtenido en las pruebas de laboratorio, se realizó una evaluación estadística, para tal fin lo usamos el software Minitab y

Microsoft Excel, así mismo, los resultados se presentan en cuadros y gráficos con su respectiva interpretación.

Análisis de resultados: Los resultados son analizadas correlacionando las variables para poder observar el tipo de distribución de nuestros datos experimentales para luego hacer un análisis ANOVA; para determinar las variables que tienen mayor influencia en el trabajo de investigación que se desarrolló, a su vez las hipótesis planteadas son analizadas para poder validarlas o desmentirlas.

#### **4.10. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

##### ✓ **Técnicas**

- Revisión bibliográfica
- Reporte de análisis químico
- Pruebas metalúrgicas experimentales
- Pruebas de la molienda
- Pruebas de lixiviación

##### ✓ **Equipos usados:**

- **Chancadora de Mandíbula:** Nos permitió triturar la muestra de mineral hasta un tamaño de 1/4" malla Tyler.
- **Chancadora Cónica:** Triturara la muestra proveniente de la chancadora de mandíbula hasta un tamaño de 100% - 10 malla Tyler.
- **Molino de Bolas de Laboratorio:** Permite moler el mineral hasta un tamaño de 60% - 200 malla Tyler.

- **Tamizadora WS TYLER ROTAP RX-29-16:** Es un equipo de agitador de tamices rotap (agitador de tamices de 8 pulgadas 230V/60HZ). Marca: Tyler, Modelo: RX29 Digital. Se utiliza para usarse con tamices de 8 “(200 mm). Para mallas de acero inoxidable y laton.
- **Agitador de rodillos para botellas:**
- **Medidor portátil de pH marca METTLER TOLEDO:** permite medir el pH de la pulpa de mineral.
- **Balanza Marcy:** Nos permitió medir la densidad de la pulpa y el porcentaje de sólidos de la pulpa.
- **Balanza Electrónica:** nos ayudó a realizar el pesaje del reactivo que se dosificará para la flotación y la cantidad de mineral al momento de iniciar el proceso.
- **Cronometro:** Control de tiempo de lixiviación

✓ **Instrumentos de laboratorio**

- Vaso precipitado
- Vasos precipitados (25, 50, 100 ml)
- Embudo Buchner (5 y 10 cm de diámetro)
- Fiola (25, 150, 200 ml)
- Pizeta (1L)
- Pipetas vol. T. A. (2, 5,10 ml)
- Fiola T.A (25, 100, 250 ml)
- Papel filtro
- Baguete

- Probetas (50 ml)
- Tubos de ensayo
- Bureta de 100 (ml)
- Soporte universal
- **Reactivos para el desarrollo experimental**
  - Ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )
  - Carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) 0.1N
  - Anaranjado de metilo
  - Mineral oxidado de Cu
  - Agua desionizada

La capacidad y eficiencia de estos equipos e instrumentos contribuyó en la cuantificación de forma adecuada y significativa de las mediciones que se desarrolló, ya que son las fuentes de validez y confiabilidad del trabajo de investigación.

## CAPÍTULO V

### 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La evaluación de las variables operacionales del proceso de extracción de cobre mediante lixiviación acida, se requirió un trabajo experimental para ver en cuanto y cuáles de los parámetros que influyen en la mejor recuperación de cobre. Por consiguiente, se trajo la muestra de mineral mixto de cobre del yacimiento minero artesanal de la comunidad de ccochapata, la muestra se procesó en el laboratorio de procesamiento de minerales en la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

El objetivo de esta presente investigación es conocer y determinar las variables operativas en el proceso de extracción de cobre mediante lixiviación acida, estas variables son: densidad de pulpa, concentración de ácido y el tiempo de lixiviación.

#### 5.1. Muestreo en yacimiento

Se hizo un muestreo representativo del mineral de 40 kg en el yacimiento del minero artesano, se usó el método de muestreo por puntos GRAP SAMPLING que esta representa de 20 kg para la preparación de la muestra para el proceso de experimentación.

#### 5.2. Toma de muestra

Se tomó una muestra de forma aleatoria representativa de un total de 40 Kg de mineral mixto con contenido de cobre. Las cuáles son evaluadas en el laboratorio de procesamiento de minerales de la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Abad del Cusco (UNSAAC) para su respectiva preparación mecánica (chancado, homogenizado, cuarteado, tamizado y molienda). Posteriormente se realizó las pruebas experimentales de lixiviación por agitación en el laboratorio metalúrgico.

El muestreo se realizó mediante la obtención de pequeñas muestras de mineral mediante el método por muestreo por puntos, que representa las cualidades y propiedades físicas y químicas del mineral original a ser tratado.

### **5.3. Preparación mecánica**

#### **5.3.1. Preparación de la muestra**

- Operación de Chancado primario.

El mineral de prueba de 40 kg, con tamaño inicial de 2" a 3", fue sometido a la reducción de tamaño hasta el orden de 1/2" a 3/8" como producto saliente.

- Operación de Chancado secundario (rodillos)

El mineral ya fracturado como producto del chancado primario, fue sometido a una reducción más diminuta por acción continúa, obteniéndose productos 100 % malla -10.

- Operación de Molienda

El mineral ya con tratamiento mecánico previo, fue sometido a la operación molienda en seco, con el propósito de tener tamaños adecuados para su posterior análisis granulométrico hasta 60% malla 200

- Análisis de mallas

El mineral producto de las operaciones anteriores, fue sometido a un cuarteador de Rifles, obteniendo una distribución homogénea y una muestra representativa, para su respectivo análisis mineralógico.

- Operación de Pulverización

El mineral procedente de molienda fue sometido a una pulverización fina en seco, con el propósito de liberar lo necesario para la operación siguiente de tamizado.

#### 5.4. Análisis mineralógico y químico

Para el análisis mineralógico, se distribuyeron las muestras a diferentes laboratorios, en secciones de 200 g y a malla -200 para su posterior análisis químico y análisis mineralógico por difracción de rayos x, en coordinación con la empresa LAS (laboratorios analíticos del sur E.I.R.L) con Ruc: 20272874680 con domicilio fiscal, pasaje Rio seco C-1, cerro colorado – Arequipa y la empresa laboratorio Bizalab S.A.C. con RUC: 20600667280, ubicado en la Victoria – Lima, 2021. con el fin de conseguir un alto grado de confianza, rendimiento certificado, evidencia necesaria y seguridad en el método aplicado.

##### 5.4.1. Determinación de ley de Cu

La muestra codificada MN24028845, se ensayó digestando las muestras en soluciones ácidas y se consideró también un blanco; una vez obtenidos los minerales en solución, se procedió a leerlas en el equipo de Absorción Atómica VARIAN 240, bajo el método de la llama; mediante este análisis se encontró la ley de cabeza del mineral, teniendo en cuenta todas las especies mineralógicas de la muestra, este proceso se llevó a cabo, en el Laboratorio de Análisis Químico de Minerales, LAS (laboratorios analíticos del sur E.I.R.L) con Ruc: 20272874680 con domicilio fiscal, pasaje Rio seco C-1, cerro colorado – Arequipa

**Tabla 7**

*Análisis cuantitativo (ley), por absorción atómica*

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*505	502
				CuAcS	Cu
				%	%
MN24028845	PROYECTO CORTABAMBAS	No proporcionado por el cliente.	Mineral Granulado	4,245	4,35

*Nota:* Reporte por laboratorio de análisis químico, LAS (laboratorios analíticos del sur E.I.R.L)

### 5.4.2. Determinación de elementos acompañantes

Para la muestra codificada MN24028845, se realizó por análisis ICP-OES (digestión multiácida y agua regia) primero, usando el método de análisis multielemental por digestión, 2 ácidos, finalizando por ICP/OES-para determinar 32 elementos acompañantes al Cu. Segundo, digestión total (HCl + HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> + HF) –espectrometría de absorción atómica (AAS) y nivel de menas para determinar la ley del Cu, con el objetivo de encontrar metales que puedan entorpecer el proceso de lixiviación, por ello se determina el porcentaje de estos acompañantes y posteriormente calcular los gramos de reactivo de ácido sulfúrico a utilizar en la solución lixivante.

Desarrollo llevado en el en el Laboratorio de Análisis Químico de Minerales, LAS (laboratorios analíticos del sur E.I.R.L) con Ruc: 20272874680 con domicilio fiscal, pasaje Rio seco C-1, cerro colorado – Arequipa

**Tabla 8**

#### *Análisis por ensayo multielemental*

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*598										
				Ag	Al	B	Ba	Be	Bi	Ca	Cd	Co	Cr	
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MN24028845	PROYECTO CORTABAMBAS	No proporcionado por el cliente.	Mineral Granulado	10,59	>10000	286,6	168,1	b<0,40	b<0,80	5194	b<0,080	54,51	55,20	

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*598										
				Cu	Fe	Ga	In	K	Li	Mg	Mn	Mo	Na	Ni
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MN24028845	PROYECTO CORTABAMBAS	No proporcionado por el cliente.	Mineral Granulado	>10000	>10000	198,4	b<1,6	6744	17,47	>10000	2389	5,032	1426	b<0,40

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*598										
				P	Pb	Sb	Se	Sn	Sr	Te	Ti	Tl	V	Zn
				ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
MN24028845	PROYECTO CORTABAMBAS	No proporcionado por el cliente.	Mineral Granulado	1008	86,3	b<0,80	b<1,2	b<0,80	53,739	b<2,4	2794,8	b<0,80	200,6	325,4

*Nota:* Reporte por laboratorio de análisis químico, LAS (laboratorios analíticos del sur E.I.R.L)

### 5.4.3. *Análisis mineralógico por difracción de rayos x*

La muestra codificada MMO-101 a malla -10 y MMO-103 a malla -200, se sometieron a un análisis mineralógico por difracción de rayos x (DRX), determinando semicuantitativamente las fases cristalinas que presentaban la muestra, el equipo usado fue un difractómetro con tubo Co (35kV, 30mA), KAlfa1: 1,78897 Å; KAlfa2: 1,79285 Å y un filtro Kbeta: Fe, con un detector LynxEye, el rango de medida fue desde  $2\theta = 6^\circ$  hasta  $2\theta = 75^\circ$ ; para la identificación se usó la base de datos del Centro Internacional de Datos para Difracción (ICDD) y para la cuantificación se usó el método de refinamiento Rietveld (TOPAS Structure Database y Fiz Karlsruhe ICSD). El límite de detección de la técnica es aproximadamente 1%, la cuantificación de fases amorfas se evaluó a partir del 20% de contenido en la muestra, la identificación y cuantificación de fases de silicatos de cobre fue limitada debido a que éstas carecen de ordenamiento estructural (baja cristalinidad), también aclarar que el método de preparación aplicado a las muestras fue de polvo aleatorio, el análisis tuvo la finalidad de determinar el porcentaje de contenido de minerales oxidados, tales como la malaquita, azurita y brocantita. Llevado a cabo en el laboratorio Bizalab S.A.C. con RUC: 20600667280, ubicado en la Victoria – Lima, 2021.

**Tabla 9**

*Estudio mineralógico por difracción de rayos X para muestra MMO-101 y MMO-103*

Nombre de mineral	Formula general	Resultado aprox. (%) muestra MMO-101 a malla -10	Resultado aprox. (%) muestra MMO-103 a malla -200
Plagioclasa (Oligoclasa)	(Na, Ca) (Al, Si) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	32	35
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	23	26
Malaquita	Cu <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub>	9	7
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7	5
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	6	5
Fase indefinida	---	4	4
crisocola	Cu <sub>3</sub> SiO <sub>3</sub> (2H <sub>2</sub> O)	2	1.5
Brochantita	Cu <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>6</sub>	2	1.5
Barita	BaSO <sub>4</sub>	2	2
Enargita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	< Limite Definido	< Limite Definido
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	<L.D.	<L.D.

*Nota:* El ensayo se sometió a dos muestras, la primera, MMO-101 con malla pasante de 10 y con una réplica del ensayo con la muestra MMO-103 a malla pasante 200, (Bizalab, 2021)

En la tabla 9 que corresponden a las muestras MMO-101 y MMO-103, cuyos resultados exponen el predominio de la plagioclasa, cuarzo, entre otros minerales que conforman la ganga mineralógica., exhibe una superioridad de cantidad de minerales oxidados de cobre sobre los sulfuros existentes, tal es la presencia mayor de la malaquita  $Cu_2(CO_3)(OH)_2$ , seguida por la crisocola  $Cu_3(CO_3)(2H_2O)$  y posteriormente por la brochantita  $Cu_4(SO_4)(OH)_6$ . La técnica de estudio mineralógico por difracción de rayos X se realizó para dos tamaños diferentes de muestra, replicando en cada análisis, bajo ese hecho, se obtuvo valores más certeros, que permitió la cuantificación de estos minerales relevantes en la investigación, puesto que a partir de los resultados de la tabla 9 pudo determinarse ley del Cu soluble.

**Tabla 10***Porcentaje en peso de la muestra para cada elemento químico*

Especies	Fórmula Qca.	Peso	%	Cu	Fe	Si	O	H	Ca	As	C	S
Malaquita	CuCO <sub>3</sub> .Cu(OH) <sub>2</sub>	22.20	5.00	12.80			8.00	0.20			1.20	
Crisocola	CuSiO <sub>3</sub> .2H <sub>2</sub> O	4.44	1.00	1.61		0.71	2.02	0.10				
Brocantita	Cu <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>6</sub>	4.44	1.00	2.50			1.56	0.06				0.31
Anargita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>4</sub>	2.40	0.54	2.40						0.45		
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	26.64	6.00				12.79		10.66		3.20	
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39.96	9.00		85.25		11.99					
Sílice	SiO <sub>2</sub>	343.90	77.00			207.20	182.34					
TOTAL		444.00	100.00	19.31	85.25	207.91	218.69	0.36	10.66	0.45	4.40	0.31

*Nota:* Elaboración propia**5.5. Determinación de la Gravedad específica**

Se determinó la gravedad específica del mineral por el método de la fiola.

– **Materiales y equipos**

- Mineral (100% -10 Mallas)
- Agua destilada 1L
- Fiola de 250 ml
- Peseta
- Espátula
- Balanza de precisión
- Embudo de vidrio
- Probeta de 1L
- Calculadora
- Brocha

– **Procedimiento**

- Pesar 120g de mineral para 3 pruebas, cada prueba de 40gr
- Pesar la fiola vacía y seca
- Pesar fiola más agua destilada
- Pesar fiola más muestra de mineral
- Pesar fiola, más agua destilada, más mineral

Se realiza el cálculo de la gravedad específica utilizando la siguiente fórmula matemática:

$$GE = M / (FA - F) - (FAM - FM) \quad \text{Ecu. (20)}$$

Donde.

M: peso de mineral

F: peso de fiola

FA: peso de fiola más peso de agua

FM: peso de fiola más peso de mineral

FAM: peso de fiola más peso de agua más peso de mineral

**Tabla 11**

*Determinación de la GE Prueba 1*

Prueba N°:	1		
Volumen de Fiola	100	cc	
	DESCRIPCION	PESO	UNIDAD
M.	Peso de muestra	10	g
F.	Peso de Fiola Seca y Vacía	65.98	g
FM.	Peso de Fiola con Muestra pulverizada	75.98	g
FAM.	Peso de Fiola con Muestra y Agua	283.7	g

FA. Peso de Fiola con Agua Destilada	277.4	g
GRAVEDAD ESPECÍFICA 01	2.70	

*Nota.* Elaborado propia

**Tabla 12**

*Determinación de la GE Prueba*

Prueba N°:	2		
Volumen de Fiola	250	cc	
	DESCRIPCION	PESO	UNIDAD
M. Peso de muestra		10	g
F. Peso de Fiola Seca y Vacía		66.98	g
FM. Peso de Fiola con Muestra pulverizada		76.98	g
FAM. Peso de Fiola con Muestra y Agua		279.7	g
FA. Peso de Fiola con Agua Destilada		273.5	g
GRAVEDAD ESPECÍFICA 02		2.63	

*Nota.* Elaborado propia

**Tabla 13**

*Determinación de la GE Prueba 3*

Prueba N°:	3		
Volumen de Fiola	250	cc	
	DESCRIPCION	PESO	UNIDAD
M. Peso de muestra		10	g
F. Peso de Fiola Seca y Vacía		65.98	g
FM. Peso de Fiola con Muestra pulverizada		75.98	g
FAM. Peso de Fiola con Muestra y Agua		284.2	g

FA. Peso de Fiola con Agua Destilada	278.1	g
GRAVEDAD ESPECÍFICA 03	2.56	

*Nota.* Elaborado propia

Se realizó tres pruebas de gravedad específica teniendo como resultado de la gravedad específica promedio:  $GE = 2.628 \cong 2.63 \text{g/ml}$ .

### 5.6. Pruebas de moliendabilidad

Determinar el tiempo adecuado de la molienda (capacidad de reducir el tamaño de los materiales sólidos hasta obtener una granulometría final deseada), para este tipo de mineral oxidado mixto de cobre, del yacimiento minero arsenal del centro poblado de Qochapata para las respectivas pruebas de lixiviación acida.

En la presente práctica se determinó la ecuación de molienda que permita calcular el tiempo de molienda necesaria y la granulometría adecuada a 65% en Malla # -200 adecuadas para pruebas de lixiviación acida, pues con cinco muestras de mineral previamente preparadas cada una de 1000 g, se realizaron pruebas experimentales en el molino de bolas estándar a distintos tiempos (0, 5, 10, 15, 20 min.) de molienda seca para luego representarlos en una curva de granulometría de molienda vs tiempo que nos permita determinar el tiempo más óptimo de molienda; además de una prueba de verificación al tiempo óptimo calculado.

#### – Materiales y equipos

- 5 kg de mineral 100% a -10 malla
- Molino de bolas
- Malla 200 serie ASTM
- Balanza electrónica
- Cronómetro

➤ Brocha

➤ Bolsas plásticas

– **Procedimiento**

➤ Pesar 1 kg de mineral para cada ensayo de molienda (total de 4 pruebas)

➤ Realizar la molienda a distintos periodos de tiempo: 0, 5, 10, 15, y 20 minutos.

➤ Realizar el tamizado a 200 malla.

➤ Efectuar la gráfica % pasante (-200 malla) versus tiempo de molienda para las 4 pruebas.

➤ Establecer el período de molienda para 65% -200 malla.

**Tabla 14**

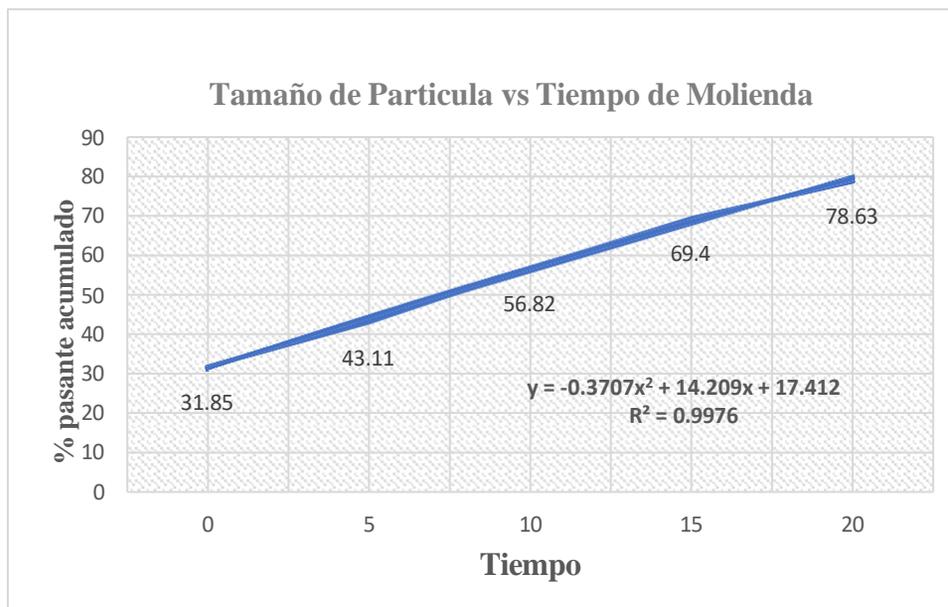
*Resumen de tiempo de molienda*

Tiempo (min)	Tiempo de molienda				
	Peso g +200m	Peso g -200m	Total, g	% -200m de Prueba	% -200m de modelo
0	681.5	318.50	1000.00	31.85	30.25
5	568.9	431.10	1000.00	43.11	43.35
10	431.8	568.20	1000.00	56.82	55.71
15	306	694.00	1000.00	69.4	67.33
20	213.7	786.30	1000.00	78.63	78.20

*Nota.* Elaborado propia

**Figura 7**

*Grafica de tamaño de partícula vs Tiempo de molienda*



*Nota:* Grafica de tamaño de partícula vs tiempo de molienda para obtener el modelo matemático para el cálculo de estudio la granulometría requerida es de 65% -200m para las pruebas de lixiviación acida.

**Tabla 15**

*Tiempo de molienda*

# de Malla	% -200m	Tiempo (Min)
200	65%	13 min 56seg

*Nota.* Elaborado propia

### 5.7. Preparación de pulpa

- Determinación de la constante K para determinar el % de sólidos.

$$K = (G.E. - 1) / G.E. \quad \text{Ecu. (21)}$$

$$\%S = ((D - 1000) / D * K) * 100\% \quad \text{Ecu. (22)}$$

$$W_s = (WP * \%S) / 100 \quad \text{Ecu. (23)}$$

$$W_s = (D - 1000) / K$$

Ecu. (24)

**Donde:**

K: constante de mineral

WP: peso de la pulpa

Ws: peso del mineral

D: Densidad de pulpa

G.E: Gravedad específica

%S: Porcentaje de solidos

- **Calculando la constante K.**

**Datos:**

GE: 2.63

$$K = (2.63 - 1) / 2.63$$

$$K = 0.619$$

- Calculando el porcentaje de sólidos (%S) y peso del solido (Ws) para las densidades de 1250gr/l, 1300gr/l, y 1350gr/l

**Para densidad de pulpa 1150gr/l**

$$\%S = ?$$

**Datos:**

K: 0.637

D pulpa: 1250gr/l

$$\%S = ((1250 - 1000) / 1250 * 0.619) * 100$$

$$\%S = 32.31$$

$$W_s=?$$

$$W_s=(D-1000)/K$$

$$W_s=(1250-1000)/0.619$$

$$W_s=403.8 \text{ gr}$$

- **Calculando el volumen del mineral:**

$$V_s=W_s/Ge$$

**Donde:**

$V_s$ = volumen del solido  $\text{cm}^3$

$W_s$ = peso del mineral en gr

$Ge$ = Gravedad especifica en  $\text{gr}/\text{cm}^3$

$$V_s=W_s/Ge$$

$$V_s=403.8\text{gr}/2.63\text{gr}/\text{cm}^3$$

$$V_s=153.56\text{cm}^3$$

**Calculando el volumen de la solución lixiviante para un reactor de 1250  $\text{cm}^3$**

Vol. reactor: 1300  $\text{cm}^3$

Vol. Reactor 80%: 1040  $\text{cm}^3$

$V_{\text{pulpa}} = V_{\text{solución}} + V_{\text{solido}}$

Ecu. (25)

$V_{\text{solución}} = 1040\text{cm}^3 - 153.56\text{cm}^3$

**$V_{\text{solución}} = 886.43\text{cm}^3$**

Realizando los mismos procedimientos y cálculos obtenemos los siguientes resultados como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 16**

*Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1250g/l*

Producto	Peso (gr)	Volumen (cm3)	Porcentaje %
Mineral oxidado	403.374	153.374	32.270
Sol. lixiviante	846.62	886.68	67.730
Pulpa	1250	1040	100

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 17**

*Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1300g/l*

Producto	Peso (gr)	Volumen (cm3)	Porcentaje %
Mineral oxidado	484.04	184.049	37.235
Sol. lixiviante	815.951	856.02	62.765
Pulpa	1300	1040	100

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 18**

*Determinación de peso de mineral y volumen solvente para una densidad de 1350g/l*

Producto	Peso (gr)	Volumen (cm3)	Porcentaje %
Mineral oxidado	564.724	214.724	41.831
Sol. lixiviante	785.276	825.36	58.169
Pulpa	1350	1040	100

*Nota:* Elaboración propia

## 5.8. Preparación de solución

Titulación ácido – base de la solución lixivante

El ácido con la cual contamos para nuestros experimentos fue de 600 g/l de concentración, lo cual se comprobó mediante la siguiente metodología:

- La muestra de ácido a titular (alícuota) se extrae con una pipeta, para luego ser filtrado mediante un embudo con papel de algodón hasta obtener 5ml en un vaso precipitado de 10ml.
- La alícuota se deposita en un matraz, se agita para homogenizarla. Luego se agrega aproximadamente 1 ml de un indicador, que en este caso es anaranjado de metilo de manera que la solución queda de color rojo al tener contacto con la solución base debido a la acidez de ésta. El anaranjado de metilo da un viraje en el pH de 3,8 a 4,4
- Para el proceso de titulación se utiliza una solución de NaOH a 0,1 N preparada con agua desionizada en el mismo laboratorio de hidrometalurgia de la UNSAAC. Este se agrega a la solución con una bureta graduada en centésimas de 100 ml, el volumen gastado de titulante se usa para determinar la concentración de ácido libre

### 5.8.1. Preparación de hidróxido de sodio a una concentración de 0.1 N para 100ml de solución

Sabemos que la normalidad (N) está relacionada con la concentración molar (M) de la solución y el número de equivalentes del soluto. El NaOH tiene un equivalente de 1, porque en disolución acuosa, 1 mol de NaOH puede liberar 1 mol de iones OH<sup>-</sup>.

La fórmula para calcular la cantidad de NaOH necesaria es:

$$N = \frac{\text{equivalentes de soluto}}{\text{volumen de solución en litros}} \quad \text{Ecu. (26)}$$

Gramos de NaOH=N equivalente de NaOH x vol. de sol. (en litros) x peso molecular de NaOH

Ecu. (27)

**Datos:**

- El peso molecular del NaOH es 40 g/mol.
- Entonces, para una solución de 0.1 N y 100 ml (0.1 L)

**Remplazando en la formula tenemos:**

Gramos de NaOH=0.1N×1equivalente/mol×0.1L×40g/mol

Gramos de NaOH=0.4g

**5.8.1.1. Procedimiento para preparar la solución NaOH**

1. Pesar 0.4 g de NaOH: pesar en una balanza 0.4 g de NaOH sólido.
2. Disolver en agua: Colocar el NaOH sólido en un vaso de precipitado y se agrega una pequeña cantidad de agua destilada (menos de 100 ml para empezar). Se disuelve bien el NaOH, ya que es muy soluble y puede liberar calor al disolverse.
3. Transferir a un matraz medido de 100 ml: Transfiere la solución disuelta a un matraz medido de 100 ml. Luego se ajusta el volumen.
4. Ajustar el volumen: Agrega agua destilada hasta alcanzar exactamente 100 ml de volumen total. Se mezcal bien la solución para asegurar que la concentración sea homogénea.

La función del NaOH es subir el pH de la solución, hasta llegar al viraje. By off del viraje lo indica el cambio de color que tiene la solución titulada, dada principalmente por el anaranjado de metilo, que pasa de color rojizo a un amarillo claro marcando el punto final de la titulación. De manera que el consumo de NaOH total para la titulación se contabiliza una vez alcanzado este color amarillo. Cabe destacar que cada titulación se realiza en triplicado, de

manera de tener una medición lo más certera posible. Para determinar la cantidad de ácido de la muestra se usa la siguiente expresión:

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre} = ((N (\text{NaOH}) \text{ eq/l}) (V (\text{NaOH}) \text{ ml}) (\text{P}_{\text{eq}} (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/eq})) / V \text{ sol. ml}$$

Ecu. (28)

**Donde:**

Concentración de NaOH=0.1 N

Peso equivalente gramo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=49

Volumen de la alícuota = 0.5ml

Volumen gastado en la titulación de NaOH= V sol. ml

Se debe reponer el volumen de ácido gastado y se enrasa con agua hasta los 1000 cm<sup>3</sup> para mantener la fuerza del ácido constante, se repite el procedimiento para cada análisis en cada tiempo indicado.

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l gastado} = C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l} - C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre} \quad \text{Ecu. (29)}$$

$$V (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ l gastado} = 1.087 (C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ gastado}) \text{ ml}$$

### 5.8.2. Preparación de solución de ácido sulfúrico

Concentración de C<sub>1</sub>=40, C<sub>2</sub>= 50 y C<sub>3</sub>=60g/l para V<sub>1</sub>=886.68, V<sub>2</sub>=856.02, V<sub>3</sub>=825.36 cm<sup>3</sup> de solución

Para preparar una solución de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) al 40 g/l de concentración a partir de una solución de ácido sulfúrico al 600g/l (en peso) y para obtener un volumen total de 911.31 ml, utilizamos la fórmula de dilución:

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad \text{Ecu. (30)}$$

**Donde:**

C<sub>1</sub> = es la concentración inicial del ácido sulfúrico (600 g/l en este caso).

$V_1$  = es el volumen de ácido concentrado que necesitamos tomar para preparar la solución.

$C_2$  = es la concentración final deseada (40 g/l en este caso).

$V_2$  = es el volumen final de la solución que queremos obtener (886.68ml).

**Sabemos que:**

$$C_1=600 \text{ g/l}$$

$$C_2=40\%$$

$$V_2=886.68\text{ml}$$

Ahora, despejamos  $V_1$  (el volumen de ácido concentrado que necesitamos):

$$V_1=C_2 \times V_2 / C_1$$

**Sustituyendo los valores:**

$$V_1=40\text{g/l} \times 886.68\text{ml} / 600 \text{ g/l}$$

$$V_1 \approx 59.1\text{ml}$$

$$V_{\text{agua}} = 886.68 \text{ ml} - 59.1\text{ml}$$

$$V_{\text{agua}} \approx 827.57\text{ml}$$

### 5.8.2.1. Procedimiento para preparar la solución $\text{H}_2\text{SO}_4$

1. Medimos el volumen de ácido sulfúrico concentrado de 59.1ml de ácido sulfúrico al 600 g/t utilizando una probeta.
2. Diluimos con agua: se coloca el ácido concentrado en un matraz, y luego se agrega agua destilada lentamente hasta alcanzar un volumen total de (886.68 ml).
3. Recordar siempre agregar el ácido al agua, no al revés, para evitar reacciones violentas.
4. mezclamos la solución de manera uniforme para que la concentración sea homogénea.

Realizando los mismos procedimientos y cálculos obtenemos los siguientes resultados como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 19**

*Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 40 g/l de ácido sulfúrico*

Densidad de pulpa g/l	Volumen de sol. Lixivante (ml)	Volumen de ácido a agregar (ml)	Volumen de agua a agregar (ml)
1250	886.68	59.1	827.57
1300	856.02	57.1	798.95
1350	825.36	55	770.33

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 20**

*Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 50 g/l de ácido sulfúrico*

Densidad de pulpa g/l	Volumen de sol. Lixivante (ml)	Volumen de ácido a agregar (ml)	Volumen de agua a agregar (ml)
1250	886.68	73.9	812.79
1300	856.02	71.3	784.68
1350	825.36	68.8	756.58

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 21**

*Volumen de ácido y agua a agregar para una concentración de 60 g/l de ácido sulfúrico*

Densidad de pulpa g/l	Volumen de sol. Lixivante (ml)	Volumen de ácido a agregar (ml)	Volumen de agua a agregar (ml)
1250	886.68	88.7	798.01
1300	856.02	85.6	770.42
1350	825.36	82.5	742.82

*Nota:* Elaboración propia

## 5.9. Prueba de cinética de lixiviación

La prueba de cinética de lixiviación se realizó para estudiar la velocidad de disolución de del mineral oxidado en la solución lixivante de ácido sulfúrico, con el objetivo de optimizar las condiciones del proceso de lixiviación.

Además, es crucial para entender y optimizar el proceso de extracción de cobre, permitiendo determinar la eficiencia de los reactivos, el tiempo necesario para alcanzar la máxima disolución, y las condiciones operativas ideales.

### – Procedimiento:

Se vierte 798.01 ml de solución con 60 g/l de concentración de ácido sulfúrico al reactor, que en este caso es una botella de 1300 ml.

Se agrega a la botella mediante un embudo 403.22 g de muestra de esta manera se llega a formarse una pulpa 1040 ml con una densidad de 1250 g/l

\* En posición horizontal, se procede con la lixiviación por agitación.

\* A intervalos de 10 min se extrae las muestras de 20 ml y luego se centrifuga usando embudo y papel filtro en sus respectivos recipientes de PLS.

\* La solución de coloración verdosa, rica en iones  $\text{Cu}^{*2}$ , se separa y se lleva al análisis químico por cobre y ácido libre.

### 5.9.1. Condiciones operativas para la prueba de cinética de lixiviación

- Tiempo máx.: 180 min
- Tamaño de partícula: 65% - 200 malla
- Porcentaje de solidos: 37.23 %
- Densidad de Pulpa: 1250 g/l.
- Velocidad de agitación: 1740 RPM

- Ley de cabeza: 4.35 % cobre soluble.
- Concentración de ácido: 60g/l
- Peso de muestra: 318.34g
- Volumen de pulpa: 1040 ml
- Volumen de solución lixivante: 886.68ml

**Tabla 22**

*Resultados de análisis químico de las pruebas de cinética de lixiviación*

Tiempo (min)	Cu g/l
0	0
10	8.59
20	10.2
40	10.95
80	11.86
160	12.35
180	12.56
240	12.6

*Nota:* informe de análisis químico por LAS (laboratorio de análisis del sur)

### **5.9.2. Determinación del porcentaje de extracción de cobre**

#### **5.9.2.1. Determinación de cobre fino en la solución**

$$\text{Fino g} = (\text{V sol.}) (\text{Ley de sol. de Cu g/l}) + (\text{V análisis a titular l}) (\text{Ley anterior g/l}) \quad \text{Ecu. (31)}$$

**Datos para ley de cobre de 8.59 g/l:**

V solución = 1040ml = 1.04L

Ley de sol. de Cu g/l = 8.59 g/l

V análisis a titular = 0.025 l

Ley anterior g/l = 0

**Remplazando:**

Fino g = (V sol.) (Ley de sol. de Cu g/l) + (V análisis a titular l) (Ley anterior g/l)

Fino g = (1.04L) (8.59 g/l) + (0.025 l) (0g/l)

**Fino g= 8.93 g**

**Datos para ley de cobre de 10.2 g/l:**

V solución =1040ml=1.04L

Ley de sol. de Cu g/l= 10.20 g/l

V análisis a titular = 0.025 l

Ley anterior g/l=8.59 g/l

**Remplazando:**

Fino g = (V sol.) (Ley de sol. de Cu g/l) + (V análisis a titular l) (Ley anterior g/l)

Fino g= (1.04L) (10.20 g/l) + (0.025 l) (8.59g/l)

**Fino g= 10.822 g**

**5.9.2.2. Determinación de cobre fino en el relave**

Finos de Cu Relave g = (1000 x masa Rlv. Kg) (% de Cu / 100) Ecu. (32)

**Datos:**

Masa relave Kg = 0.31256 kg

Ley de relave % de Cu= 0.30%

**Remplazando:**

Finos de Cu Relave g = (1000 x 0.31256 Kg) (0.30 % de Cu / 100)

**Finos de Cu Relave g=0.938 g**

Finos de Cabeza calculada g = Finos de Cu Distribución g + Finos de Cu Relave g Ecu. (33)

**Datos:**

Finos de Cu Distribución g: 12.91414 g

Finos de Cu Relave g: 0.938 g

**Remplazando:**

Finos de Cabeza calculada g = 12.91414 g + 0.938 g

Finos de Cabeza calculada g = 13.852 g

**5.9.2.3. Determinación de % de extracción de cobre**

% extracción Cu = (Fino de Cu disuelto) (100) / Cu cabeza calculada Ecu. (34)

**Datos:**

Fino de Cu disuelto: 8.59 g

Cu cabeza calculada: 13.852 g

**Remplazando:**

% extracción Cu = (8.59 g) (100) / 13.852 g

% extracción Cu = 62.014 %

Realizando los mismos procedimientos y cálculos obtenemos los siguientes resultados como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 23**

*Porcentaje de extracción de cobre en las pruebas de cinética de lixiviación*

Tiempo	Peso (g)	Cu g/l	titulación	finos Cu (g)	% Extracción	
					parcial	acumulado
0	318.34	4.35	0.000	0.000	0.000	0.000
10	318.34	8.59	0.000	8.590	62.014	62.014
20	318.34	10.2	0.215	10.415	13.173	75.188
40	318.34	10.95	0.255	11.205	5.705	80.893
80	318.34	11.86	0.274	12.134	6.705	87.598
160	318.34	12.35	0.297	12.647	3.702	91.299
180	318.34	12.56	0.309	12.869	1.604	92.904

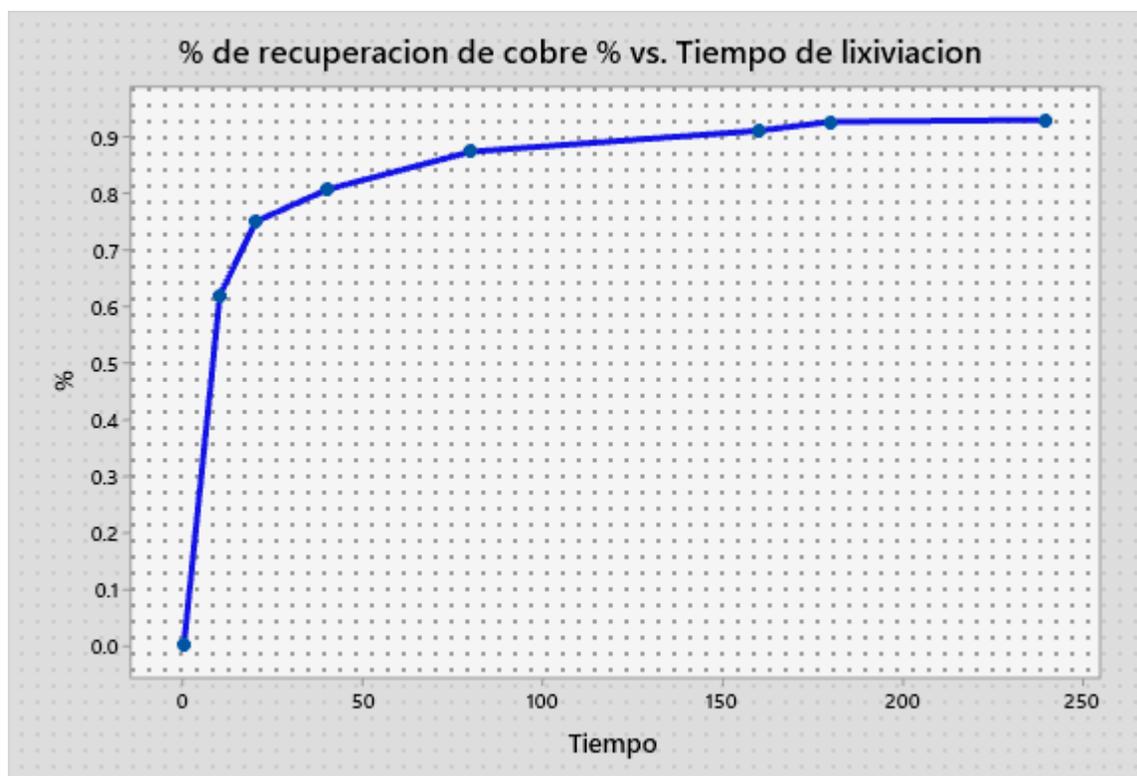
	240	318.34	12.6	0.314	12.914	0.327	93.231
Relave		312.56	0.3		0.938		
Cabeza calculada		318.34	4.351		13.852		
Cabeza ensayada		318.34	4.35		13.8		

*Nota:* Elaboración Propia

### 5.9.3. Determinación del tiempo óptimo de lixiviación

#### Figura 8

*Grafica de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación*



*Nota:* Elaborado en Minitab 20

La interacción entre las partículas de mineral y la solución lixivante es controlada por tres mecanismos: Difusión en la capa líquida, difusión en la capa de ceniza y la propia reacción química ande cada una de ellas tiene su propia modelación matemática y condiciones paramétricas.

Mediante una serie de cálculos en Excel se llega a saber que la etapa controlante es la difusión a través de la capa de ceniza, por tanto, utilizaremos este modelamiento matemático, ecuación (35) para nuestro estudio:

- Ecuación de control de difusión de película Demirkiran

$$(2vK_m/ar^2) C_{A0}t = 1 - (1 - X_B)^{2/3} \quad \text{Ecu. (35)}$$

Realizando la primera derivada de la ecuación

$$1 - 3(1 - X_B)^{-1/3} + 2(1 - X_B) = 1/t \quad \text{Ecu. (36)}$$

**Donde:**

$X_B$  = Fracción de sólido o material sin reaccionar

**Remplazando datos:**

$$X_B = \% \text{ de extracción} / 100$$

$$X_B = 62.014/100$$

$$X_B = 0.6201$$

$$1/t = 1 - 3(1 - x)^{-1/3} + 2(1 - x) = kt$$

$$1/t = 1 - 3(1 - 0.62)^{-1/3} + 2(1 - 0.62)$$

$$1/t = 0.185$$

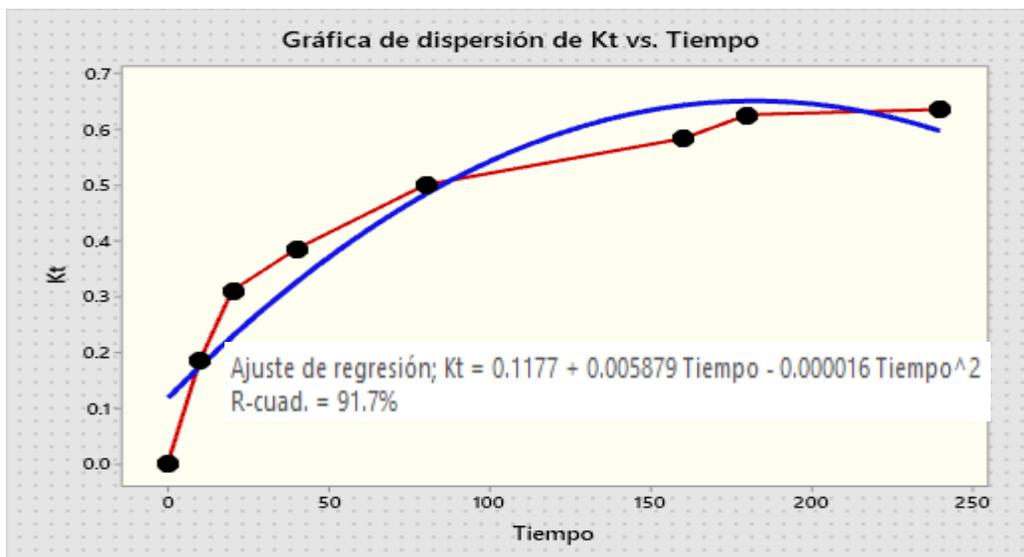
Realizando los mismos procedimientos y cálculos obtenemos los siguientes resultados como se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 24***Modelamiento matemático de difusión controlada*

Tiempo	% de extracción de cobre	X <sub>B</sub>	1- X <sub>B</sub>	1/t
0	0.000	0.000	0.000	0.000
10	62.014	0.620	0.380	0.185
20	75.188	0.752	0.248	0.311
40	80.893	0.809	0.191	0.386
80	87.598	0.876	0.124	0.501
160	91.299	0.913	0.087	0.584
180	92.904	0.929	0.071	0.627
240	93.231	0.932	0.068	0.636

*Nota:* Elaboración propia

En la Figura 9 se muestra el plateo del modelo matemático de difusión controlada vs el tiempo donde la relación lineal indica que el mecanismo de control de difusión de la capa de cenita es coherente y valido

**Figura 9***Grafica de X<sub>B</sub> vs tiempo en la etapa de difusión a través de la capa de ceniza*

*Nota:* Elaboración propia (uso de Minitab 2020)

EL coeficiente de determinación  $R^2$  nos indica que tan correcto es el estimado de la ecuación, entonces cuanto más alto sea  $R^2$  más confianza se podrá tener en el estimado de la línea de regresión.

Resaltando lo anterior, hallamos el tiempo óptimo:

Ecuación de la regresión lineal

$$Y = -0.000016XB + 0.005879XB + 0.1177 \quad \text{Ecu. (37)}$$

entonces  $XB=1$  y  $Y = 1/t$ , ( $Y = kt$  debido a que la curva ha sido linealizada)

$$1/t = 0.000016(1) - 0.005879(1) + 0.1177(0)$$

$$t = 169.63 \text{ min.} \approx 3 \text{ horas}$$

## 5.10. Determinación del consumo de ácido y relación de consumo

### 5.10.1. Proceso de titulación y cálculo de (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) g/l libre

#### 5.10.1.1. cálculo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/l libre

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre} = ((N (\text{NaOH}) \text{ eq/l}) (V (\text{NaOH}) \text{ ml}) (\text{Peq} (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/eq})) / V \text{ sol. ml}$$

**Datos:**

Concentración de NaOH=0.1 N

Peso equivalente gramo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>=49

Volumen de la alícuota = 0.5ml

Volumen gastado en la titulación de NaOH= 4.35 sol. ml

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre} = ((0.1N (\text{NaOH})) (4.35 \text{ ml} (\text{NaOH})) (49 (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/eq})) / 0.5 \text{ sol. ml}$$

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre} = 42.6 \text{ g/l}$$

#### 5.10.1.2. Cálculo de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/l gastado

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l gastado} = (C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l} - C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l libre}) / \text{volumen de solución}$$

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l gastado} = (60 \text{ g/l} - 42.6 \text{ g/l}) / 0.886 \text{ l}$$

$$C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g/l gastado} = 19.63$$

### 5.10.1.3. Cálculo de volumen de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> g/l para la reposición

$$V (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ l gastado} = 1.087 (C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ gastado}) \text{ ml} \quad \text{Ecu. (38)}$$

$$V (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ l gastado} = 1.087 \times 19.63 \text{ g/l gastado} \text{ ml}$$

$$V (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ l gastado} = 21.33 \text{ ml}$$

Se debe reponer el volumen de ácido gastado y se enrasa con agua hasta los 1040 cm<sup>3</sup> para mantener la fuerza del ácido constante, este cálculo se realizó para las 7 muestras obteniendo el consumo de ácido para cada una, luego determinamos la relación de consumo de ácido para lo cual dividimos el consumo de ácido entre la cantidad de cobre extraído:

$$\text{Consumo Kg/TM} = (C (\text{H}_2\text{SO}_4) \text{ g gastado}) / (\text{cobre extraído}) \quad \text{Ecu. (39)}$$

$$\text{Relación de consumo de ácido} = 19.63 \text{ g ácido} / 8.59 \text{ g de Cu}$$

$$\text{Relación de consumo de ácido} = 2.28$$

En la tabla N° 25 vemos los resultados para las 7 pruebas. De donde, se deduce que el consumo de ácido sulfúrico promedio es 2.29 Kg de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / Kg de Cu.

**Tabla 25**

*Relación de consumo de ácido*

Tiempo (min)	Cu g/l	Extracción de Cu (g)	Vol. de titulación de NaOH (ml)	Conc. (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) g/l libre	Acido gastado (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) g	Reposición de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ml)	relación de consumo de g H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> / g de cobre
0.0	0.0	0.0	0.0	60.0	0.0	0.0	0.0
10.0	9.2	8.6	4.3	42.6	19.6	21.3	2.49
20.0	10.6	10.4	4.1	40.1	22.5	24.4	2.34
40.0	11.6	11.2	4.0	39.6	23.0	25.0	2.23
80.0	11.9	12.1	3.9	38.3	24.5	26.6	2.19
160.0	12.4	12.6	3.8	37.2	25.7	28.0	2.21
180.0	12.5	12.9	3.7	36.2	26.9	29.2	2.27

---

240.0	12.5	12.9	3.7	36.0	27.1	29.4	2.28
-------	------	------	-----	------	------	------	------

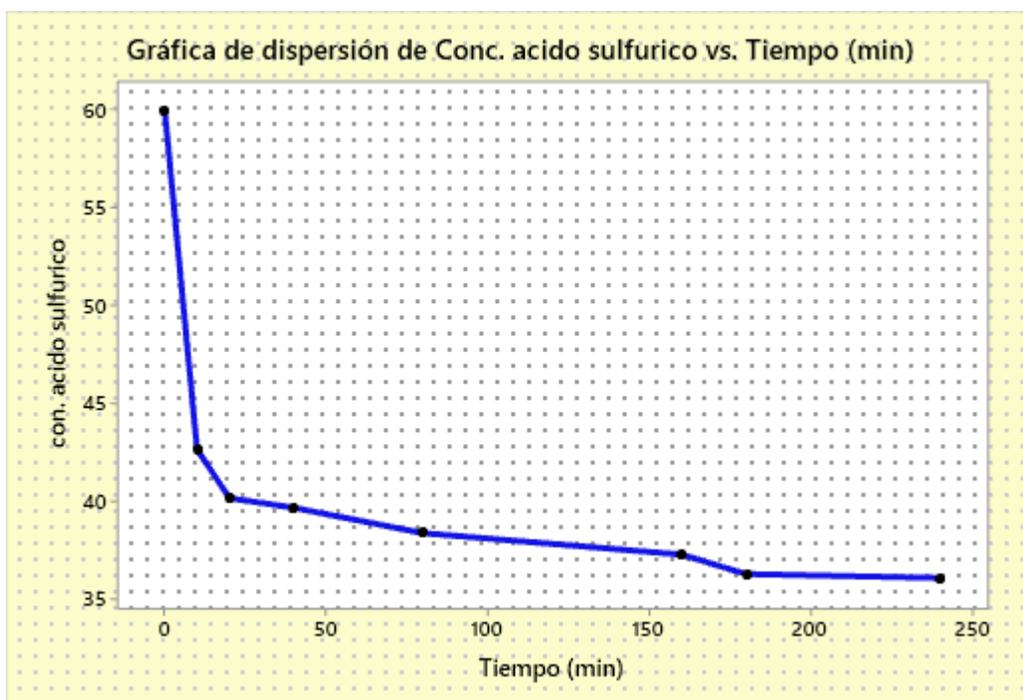
---

*Nota:* Elaboración propia

la figura N° 10 se muestra la curva de cinética de consumo de ácido sulfúrico, donde se observa que en los primeros 10 min la concentración de ácido baja de 60 a 40 g/l aproximadamente, Esto por tener al cobre en su granulometría fina y a los 180 min aproximadamente la concentración de ácido se mantiene casi invariable.

### Figura 10

*Curva de cinético de consumo de ácido sulfúrico*



Fuente: Elaboración propia (uso de Minitab 2020)

### 5.11. Matriz del diseño

Las pruebas de lixiviación con ácido sulfúrico se realizarán mediante un diseño factorial completo de 2 niveles y 3 factores  $2^3$  teniendo como mínimo de 8 pruebas, con un solo bloque sin repetición y 2 puntos centrales. Las variables a tomar en este proceso se muestran en la tabla N° 26. Antes de realizar las pruebas vamos a elegir las variables que más influirán en estas pruebas:

**Tabla 26***Variables y su codificación*

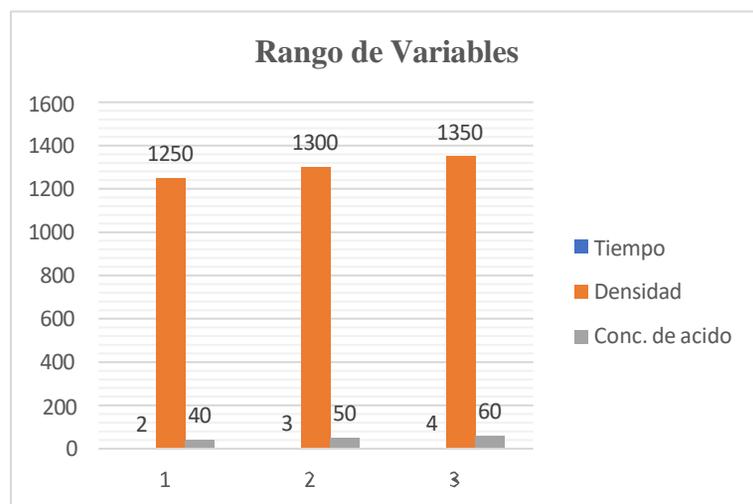
FACTOR	NOMBRE	BAJO	ALTO
A	Tiempo	-1	1
B	Densidad	-1	1
C	Conc. de acido	-1	1

*Nota:* En la tabla se muestra el Factor y variable con valores codificados.

**Tabla 27***Variables reales*

FACTOR	NOMBRE	BAJO	MEDIO	ALTO
A	Tiempo	2	3	4
B	Densidad	1250	1300	1350
C	Con. de acido	40	50	60

*Nota:* En la tabla se muestra el Factor y variable con valores reales.

**Figura 11***Rango de variables*

*Nota:* Elaboración propia

De la figura 11, se obtuvo un gráfico que nos muestra con cada una de ellas de las variables para la prueba experimental de lixiviación acida con densidad de pulpa, concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y el tiempo de lixiviación que se va a manipular.

**Tabla 28**

*Condiciones para cada prueba*

Orden Est	Orden Corrida	tiempo de lixiviación	Densidad de pulpa	Conc. acido
1	1	2	1250	40
2	2	4	1250	40
3	3	2	1350	40
4	4	4	1350	40
5	5	2	1250	60
6	6	4	1250	60
7	7	2	1350	60
8	8	4	1350	60
9	9	3	1300	50
10	10	3	1300	50

*Nota:* En la tabla se muestra se muestra el orden de las corridas y las condiciones para cada prueba.

### 5.12. Pruebas de lixiviación acida en botellas

- Prueba de lixiviación acida N°1

**Tabla 29**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°1*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	403.74
Gravedad especifica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	2
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1250
% de solidos	%	32.27
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de acido		
Concentración de ácido	g/l	40
Volumen del solvente	ml	886.6

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 30**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°1*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100
PLS	886.6	17.96	15.93	90.68
Relave	396.54	0.37	1.64	9.32

*Nota:* Elaboración propia

- Prueba de lixiviación acida N°2

**Tabla 31**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°2*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	403.74
Gravedad especifica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	4
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1250
% de solidos	%	32.27
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de acido		
Concentración de ácido	g/l	40
Volumen del solvente	ml	886.6

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 32**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°2*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.21	16.15	91.94
Relave	398.56	0.36	1.42	8.06

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°3

**Tabla 33**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°3*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	564.72
Gravedad específica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	2
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1350
% de sólidos	%	41.83
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de ácido		
Concentración de ácido	g/l	40
Volumen del solvente	ml	785.27

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 34**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°3*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	17.98	15.94	90.76
Relave	399.74	0.37	1.62	9.24

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°4

**Tabla 35**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°4*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	564.72
Gravedad específica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	4
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1350
% de sólidos	%	41.83
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de ácido		
Concentración de ácido	g/l	40
Volumen del solvente	ml	785.27

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 36**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°4*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.19	16.13	91.84
Relave	400.12	0.37	1.43	8.16

*Nota:* Elaboración propia

- Prueba de lixiviación acida N°5

**Tabla 37**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°5*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	403.74
Gravedad específica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	2
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1250
% de sólidos	%	32.27
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de ácido		
Concentración de ácido	g/l	60
Volumen del solvente	ml	886.6

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 38**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°5*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.34	16.26	92.56
Relave	396.57	0.34	1.31	7.44

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°6

**Tabla 39**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°6*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	403.74
Gravedad específica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	4
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1250
% de sólidos	%	32.27
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de ácido		
Concentración de ácido	g/l	60
Volumen del solvente	ml	886.6

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 40**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°6*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.46	16.37	93.21
Relave	387.74	0.34	1.19	6.79

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°7

**Tabla 41**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°7*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	564.72
Gravedad especifica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	2
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1350
% de solidos	%	41.83
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de acido		
Concentración de ácido	g/l	60
Volumen del solvente	ml	785.27

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 42**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°7*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.29	16.22	92.35
Relave	395.08	0.34	1.34	7.65

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°8

**Tabla 43**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°8*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	564.72
Gravedad específica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	4
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1350
% de sólidos	%	41.83
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de ácido		
Concentración de ácido	g/l	60
Volumen del solvente	ml	785.27

*Nota:* Elaboración propia

**Tabla 44**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°8*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.43	16.34	93.06
Relave	399.79	0.33	1.22	6.94

*Nota:* Elaboración propia

- Prueba de lixiviación acida N°9

**Tabla 45**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°9*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	484.04
Gravedad especifica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	3
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1300
% de solidos	%	37.23
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de acido		
Concentración de ácido	g/l	50
Volumen del solvente	ml	856.0

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 46**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°9*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.25	16.18	92.15
Relave	397.26	0.35	1.38	7.85

*Nota: Elaboración propia*

- Prueba de lixiviación acida N°10

**Tabla 47**

*Esta prueba se realizó con las siguientes condiciones N°10*

	Unidad	Cantidad
molienda		
Tiempo de molienda	min	13 min 56 seg
Granulometría malla 200	%	65
Peso de mineral	gr	484.04
Gravedad especifica		2.63
Lixiviación		
Tiempo de Lixiviación	minutos	3
Densidad de pulpa gr/lt	gr/lt	1300
% de solidos	%	37.23
Volumen del reactor	l	1.040
Velocidad de agitación	rpm	1740
pH		<2
dosificación de acido		
Concentración de ácido	g/l	50
Volumen del solvente	ml	856.0

*Nota: Elaboración propia*

**Tabla 48**

*Balance metalúrgico prueba de lixiviación N°10*

Producto	Peso g	Ley Cu (%)	Cobre fino (g)	% Extra. Cu
Cabeza	403.74	4.35	17.56	100.00
PLS	886.60	18.25	16.18	92.11
Relave	398.74	0.34	1.39	7.89

*Nota: Elaboración propia*

## CAPITULO VI

### 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1. Evaluación estadística

A continuación, se llevó a cabo un análisis de los resultados obtenidos durante el tiempo destinado a la fase experimental. Es importante mencionar que el estudio estadístico consideró los objetivos que incluían: tiempo de lixiviación, densidad de pulpa y la concentración de ácido, se creó una matriz de diseño correspondiente a las pruebas que se llevaron a cabo, utilizando el software Minitab 20.

**Tabla 49**

*Resultados obtenidos para cada prueba*

Orden Est.	tiempo de lixiviación	Densidad de pulpa	Conc. acido	% Extra. Cu
1	2	1250	40	90.68
2	4	1250	40	91.94
3	2	1350	40	90.76
4	4	1350	40	91.84
5	2	1250	60	92.56
6	4	1250	60	93.21
7	2	1350	60	92.35
8	4	1350	60	93.06
9	3	1300	50	92.15
10	3	1300	50	92.11

*Nota:* Elaboración Propia

## 6.2. Análisis de Datos

Mediante los resultados obtenidos realizamos el análisis estadístico para hallar las significancias de las variables involucradas, usaremos la regresión factorial en Minitab 20:  
Regresión factorial: % Rec. de cobre vs. Tiempo de lixiviación; densidad de pulpa y concentración de ácido.

**Tabla 50**

*Coefficientes codificados*

<b>Término</b>	<b>Efecto</b>	<b>Coef</b>	<b>EE del coef.</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor p</b>	<b>FIV</b>
Constante		92.0660	0.0235	3918.59	0.000	
tiempo de lixiviación	0.9250	0.4625	0.0263	17.61	0.003	1.00
Densidad de pulpa	-0.0950	-0.0475	0.0263	-1.81	0.212	1.00
Conc. acido	1.4900	0.7450	0.0263	28.36	0.001	1.00
tiempo de lixiviación*Densidad de pulpa	-0.0300	-0.0150	0.0263	-0.57	0.626	1.00
tiempo de lixiviación*Conc. acido	-0.2450	-0.1225	0.0263	-4.66	0.043	1.00
Densidad de pulpa*Conc. acido	-0.0850	-0.0425	0.0263	-1.62	0.247	1.00
tiempo de lixiviación*Densidad de pulpa*Conc. acido	0.0600	0.0300	0.0263	1.14	0.372	1.00

*Nota.* (EE: Error estándar del coeficiente, FIV: Factor de inflación varianza). Data del Software

MiniTAB

Donde:

**Término:** El nombre de la variable o interacción en el modelo.

**Efecto:** El valor del coeficiente de regresión para ese término.

**Coef:** El coeficiente estimado de la variable o interacción.

EE del coef.: Error estándar del coeficiente estimado.

Valor T: El valor t del coeficiente, que se utiliza para probar si el coeficiente es significativamente diferente de cero.

Valor p: El valor p asociado al valor t, que indica si el coeficiente es estadísticamente significativo. Si el valor p es bajo (generalmente menor que 0.05), el coeficiente se considera significativo.

FIV (Factor de Inflación de la Varianza): Un valor que mide la multicolinealidad, es decir, cuán correlacionadas están las variables predictoras entre sí. Si el FIV es mayor a 10, puede indicar que hay multicolinealidad.

#### ✓ **Variables independientes**

- Tiempo de lixiviación: El coeficiente es 0.9250, con un valor p de 0.003, lo que indica que es una variable estadísticamente significativa. El signo positivo sugiere que un aumento en el tiempo de lixiviación incrementa el valor de la variable dependiente.

- Densidad de pulpa: El coeficiente es -0.0950, pero el valor p es 0.212, lo que indica que no es estadísticamente significativo a un nivel de significancia común (como 0.05). El signo negativo indica que un aumento en la densidad de pulpa tiende a reducir la variable dependiente, aunque no es significativo.

- Concentración de ácido: El coeficiente es 1.4900, con un valor p de 0.001, lo que sugiere que es estadísticamente significativa. Un aumento en la concentración de ácido aumenta significativamente la variable dependiente.

#### ✓ **Interacciones de variables:**

Tiempo de lixiviación \* Densidad de pulpa: El coeficiente es -0.0300, con un valor p de 0.626, lo que indica que la interacción no es estadísticamente significativa.

Tiempo de lixiviación \* Concentración de ácido: El coeficiente es -0.2450, con un valor p de 0.043, lo que indica que la interacción es significativa. Un aumento en ambas variables podría tener un efecto ligeramente positivo en la variable dependiente.

Densidad de pulpa \* Concentración de ácido: El coeficiente es -0.0850, pero el valor p es 0.247, lo que sugiere que no es significativo.

Tiempo de lixiviación \* Densidad de pulpa \* Concentración de ácido: El coeficiente es 0.0600, pero el valor p es 0.372, lo que indica que esta interacción tampoco es significativa.

- FIV (Factor de Inflación de Varianza): Todos los valores de FIV son 1.00, lo que indica que no hay multicolinealidad significativa entre las variables en el modelo.

**Tabla 51***Análisis de varianza*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	6.31300	0.90186	163.38	0.006
Lineal	3	6.16950	2.05650	372.55	0.003
tiempo de lixiviacion	1	1.71125	1.71125	310.01	0.003
Densidad de pulpa	1	0.01805	0.01805	3.27	0.212
Conc. acido	1	4.44020	4.44020	804.38	0.001
Interacciones de 2 términos	3	0.13630	0.04543	8.23	0.110
tiempo de lixiviacion*Densidad de pulpa	1	0.00180	0.00180	0.33	0.626
tiempo de lixiviacion*Conc. acido	1	0.12005	0.12005	21.75	0.043
Densidad de pulpa*Conc. acido	1	0.01445	0.01445	2.62	0.247
Interacciones de 3 términos	1	0.00720	0.00720	1.30	0.372
tiempo de lixiviacion*Densidad de pulpa*Conc. acido	1	0.00720	0.00720	1.30	0.372
Error	2	0.01104	0.00552		
Curvatura	1	0.01024	0.01024	12.80	0.174
Error puro	1	0.00080	0.00080		
Total	9	6.32404			

*Nota:* (GL: Grados Libertad, SC Ajust: Suma cuadrados, MC Ajust: Cuadrado medio, F:

Distribución de probabilidad p: probabilidad). Dato del Software MiniTAB 20

– En la investigación se planteó la siguiente hipótesis:

Hipótesis General: Tiempo de lixiviación, densidad de pulpa y concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, influyen en la recuperación de cobre por lixiviación acida.

Con el objeto de probar esta hipótesis se usará diferentes pruebas estadísticas de probabilidad y de inferencia, por lo que se plantea las siguientes hipótesis estadísticas específicas a cada una de las variables:

- Hipótesis nula ( $H_0$ ): Es la hipótesis que se supone cierta hasta que se demuestre lo contrario. Generalmente, afirma que no existe efecto o diferencia.

- Para la variable de Tiempo de lixiviación:

Hipótesis nula ( $H_{01}$ ): Tiempo de lixiviación dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida no influye y no es significativamente dentro del modelo.

- Para la variable de densidad de pulpa:

Hipótesis nula ( $H_{02}$ ): densidad de pulpa dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida no influye y no es significativamente dentro del modelo.

- Para la variable de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

Hipótesis nula ( $H_{03}$ ): concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida no influye y no es significativamente dentro del modelo.

- Hipótesis alternativa ( $H_1$  o  $H_a$ ): Es la hipótesis que se prueba para demostrar que existe un efecto o diferencia.

- Para la variable de Tiempo de lixiviación:

Hipótesis nula ( $H_{A1}$ ): Tiempo de lixiviación dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida influye y es significativamente dentro del modelo.

- Para la variable de densidad de pulpa:

Hipótesis nula ( $H_{A2}$ ): densidad de pulpa dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida influye y es significativamente dentro del modelo.

➤ Para la variable de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

Hipótesis nula ( $H_{A3}$ ): concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dentro del proceso de recuperación de cobre por lixiviación acida influye y es significativamente dentro del modelo.

Interpretación de los resultados

✓ **Modelo Completo:**

-Grados de libertad (GL): 7

-Suma de cuadrados ajustada (SC Ajust.): 6.31300

-Media cuadrática ajustada (MC Ajust.): 0.90186

-Valor F: 163.38

-Valor p: 0.006

El modelo en su conjunto es estadísticamente significativo, ya que el valor p es mucho menor que 0.05 (valor p = 0.006). Esto sugiere que al menos una de las variables o interacciones tiene un efecto significativo sobre la variable dependiente.

✓ **Efectos Lineales:**

Las variables individuales y sus efectos sobre la variable dependiente:

### 1. **Tiempo de lixiviación**

El tiempo de lixiviación tiene un efecto significativo en la variable dependiente, dado que el valor p es menor que 0.05.

### 6.2.1. Grafica de efecto de Variables Individuales para el tiempo de lixiviación

**Tabla 52**

*Análisis de varianza de tiempo de lixiviación*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
tiempo de lixiviación	2	1.721	0.8607	1.31	0.329
Error	7	4.603	0.6575		
Total	9	6.324			

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

**Tabla 53**

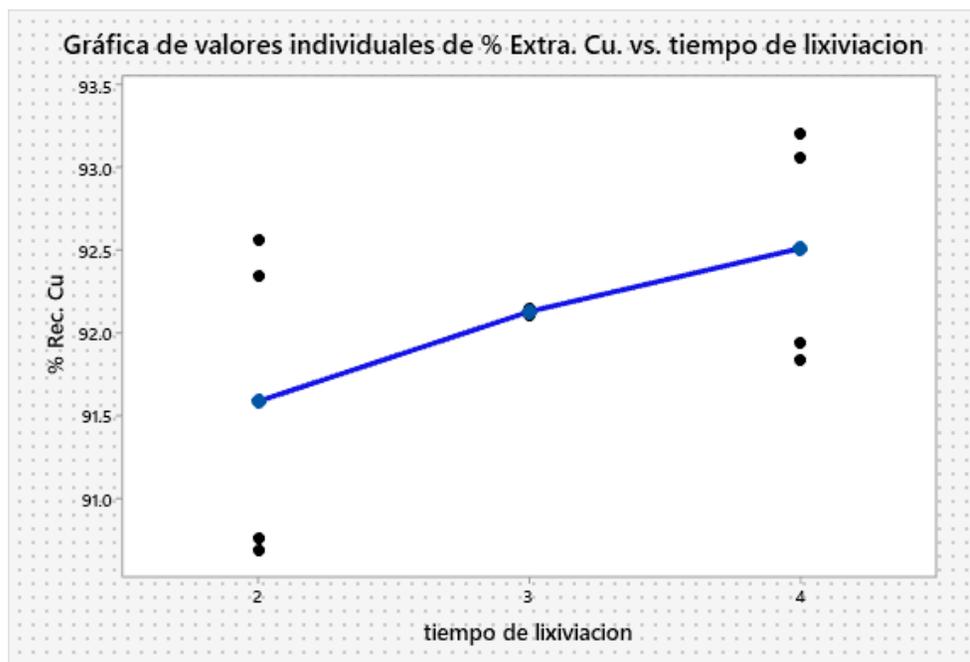
*Resumen del modelo de tiempo de lixiviación*

tiempo de lixiviación	N	Media	Desv. Est.	IC de 95%
2	4	91.588	1.006	(90.629; 92.546)
3	2	92.1300	0.0283	(90.7742; 93.4858)
4	4	92.513	0.723	(91.554; 93.471)

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20 (Desv. Est. agrupada = 0.810868)

**Figura 12**

*Valores individuales de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación*



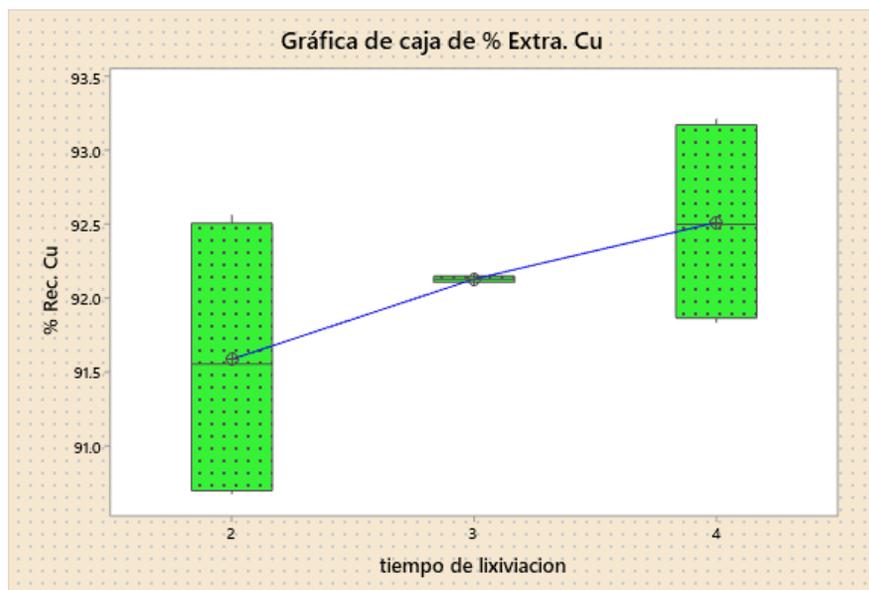
*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

La gráfica presenta puntos individuales de recuperación de cobre, lo que indica la variabilidad de los datos en cada tiempo de lixiviación. La línea azul representa la tendencia de la extracción de cobre con el tiempo lixiviación.

Además, presenta una tendencia positiva donde la recuperación de cobre aumenta a medida que el tiempo de lixiviación se incrementa. A 2 horas, los datos están dispersos, con valores más bajos y algunos más altos. A 3 y 4 horas, los datos tienden a agruparse más cerca de la línea de tendencia. Más tiempo de lixiviación mejora la recuperación de cobre, pero con cierta variabilidad en los resultados.

**Figura 13**

*Gráfica de cajas de extracción de cobre vs tiempo de lixiviación*



*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

## 2. Densidad de pulpa

La densidad de pulpa no tiene un efecto significativo en la variable dependiente, ya que el valor p es mayor que 0.05 (0.212)

### 6.2.2. Gráfica de efecto de Variables Individuales para la densidad de pulpa

**Tabla 54**

*Análisis de varianza de densidad de pulpa*

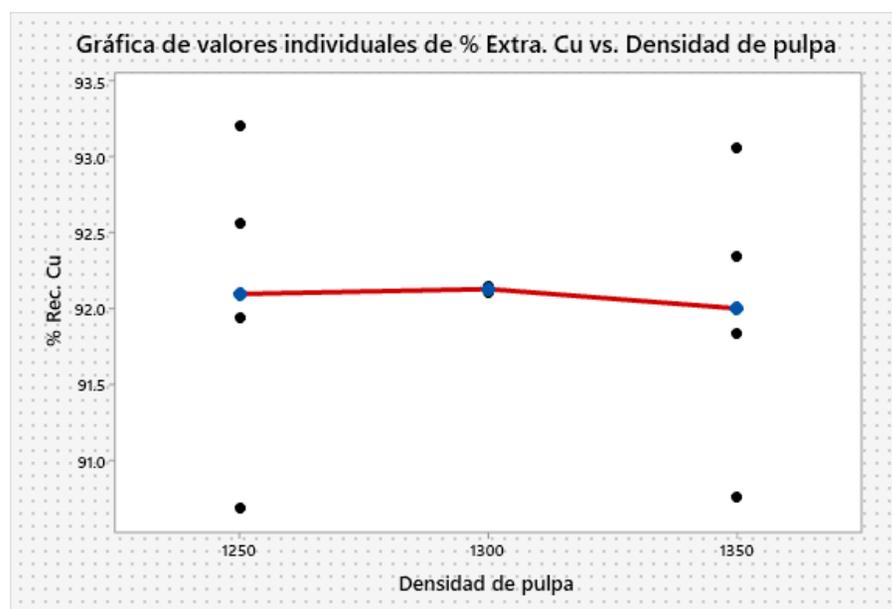
Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Densidad de pulpa	2	0.02829	0.01415	0.02	0.984
Error	7	6.29575	0.89939		
Total	9	6.32404			

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

**Tabla 55***Resumen del modelo de densidad de pulpa*

Densidad de pulpa	N	Media	Desv. Est.	IC de 95%
1250	4	92.097	1.078	(90.976; 93.219)
1300	2	92.1300	0.0283	(90.5443; 93.7157)
1350	4	92.003	0.968	(90.881; 93.124)

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20 (Desv. Est. agrupada =0.948363)

**Figura 14***Valores individuales de extracción de cobre vs densidad de pulpa*

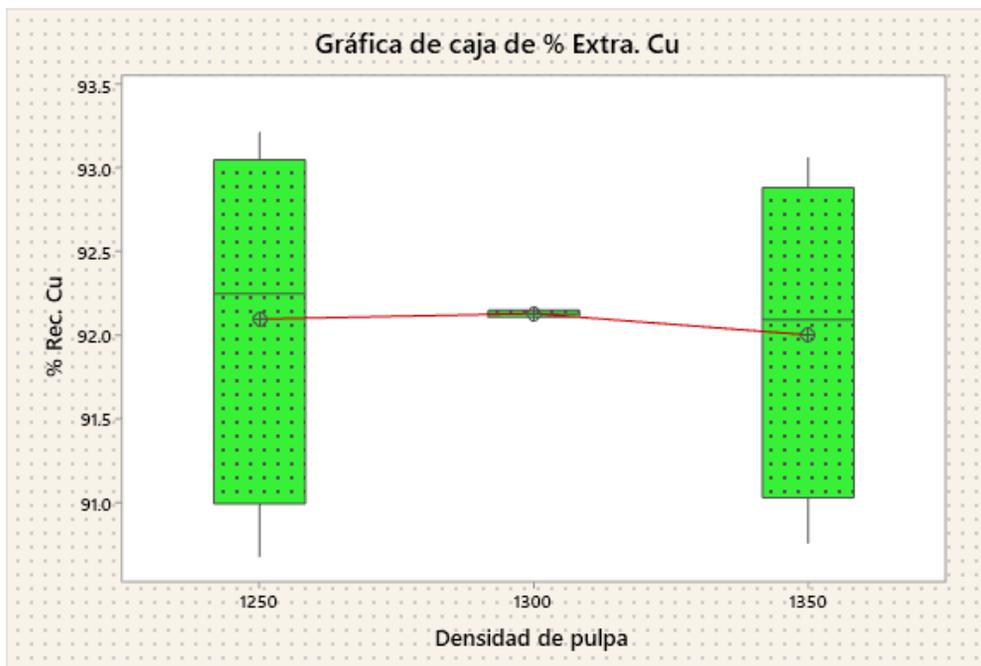
*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

La densidad de pulpa no parece tener un impacto significativo en la recuperación de cobre, ya que los valores se mantienen relativamente constantes con pequeñas variaciones. La tendencia es estable en la recuperación de cobre muestra poca variación con el cambio en la densidad de pulpa. La línea de tendencia indica una leve caída en la extracción de cobre a mayor

densidad de pulpa, pero la variación es mínima. Existe la dispersión en cada nivel de densidad, con valores extremos en los tres niveles analizados.

### Figura 15

*Gráfica de cajas de extracción de cobre vs densidad de pulpa*



*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

### 3. Concentración de ácido

La concentración de ácido tiene un efecto significativo en la variable dependiente, ya que el valor p es menor que 0.05.

### 6.2.3. Grafica de efecto de Variables Individuales para la concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

**Tabla 56**

*Análisis de varianza de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Conc. Ácido H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2	4.450	2.2252	8.31	0.014
Error	7	1.874	0.2677		
Total	9	6.324			

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

**Tabla 57**

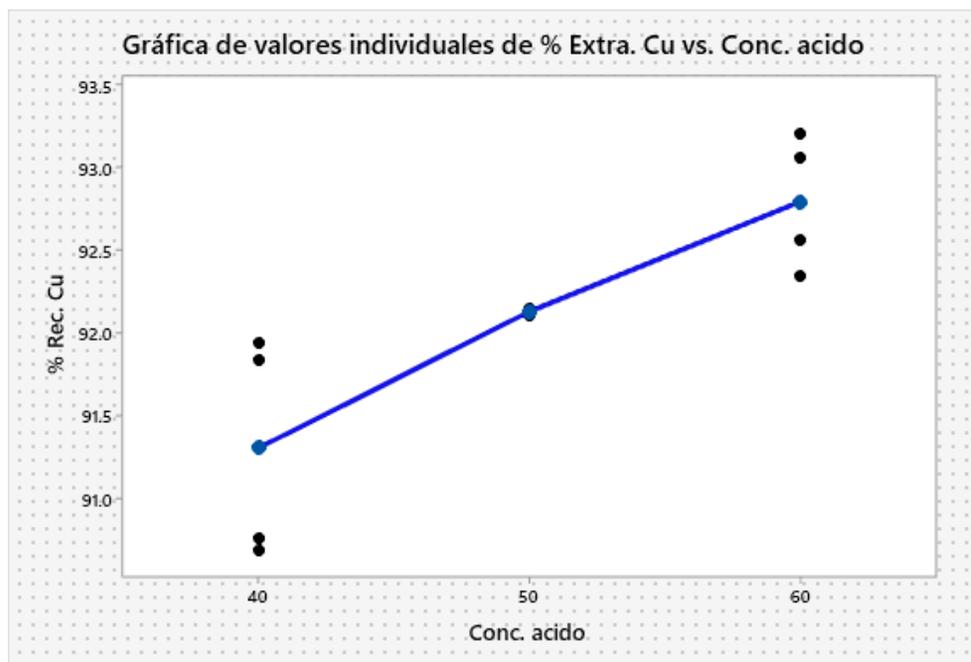
*Resumen del modelo de concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*

Conc. Ácido H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	N	Media	Desv. Est.	IC de 95%
40	4	91.305	0.678	(90.693; 91.917)
50	2	92.1300	0.0283	(91.2650; 92.9950)
60	4	92.795	0.406	(92.183; 93.407)

*Nota.* Data del Software MiniTAB 20 (Desv. Est. agrupada =0.517356)

## Figura 16

Valores individuales de extracción de cobre vs concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>



Nota. Data del Software MiniTAB 20

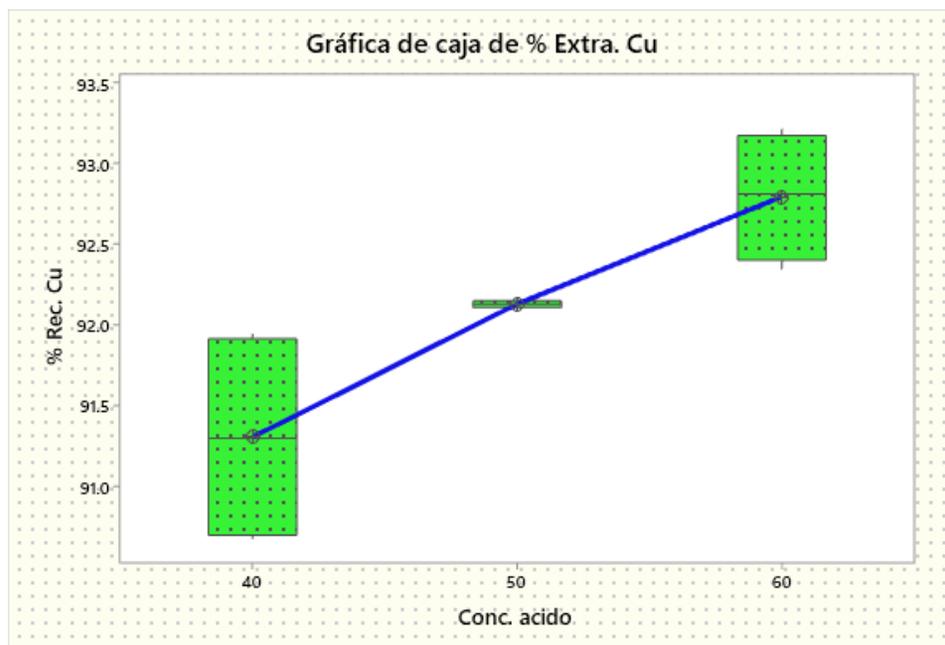
La tendencia es positiva en la extracción de cobre aumenta a medida que la concentración de ácido se incrementa.

La variabilidad en los datos a 40 g/l de concentración, hay una mayor dispersión en los valores mientras que en 50 g/l y 60 g/l, los datos tienden a agruparse más en torno a la media.

La pendiente de la línea sugiere que una mayor concentración de ácido favorece la recuperación de cobre. Al aumentar la concentración de ácido mejora la extracción de cobre, mostrando una tendencia clara y consistente. Sin embargo, es importante evaluar si un incremento en la concentración.

**Figura 17**

*Gráfica de cajas de extracción de cobre vs concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>*



*Nota.* Data del Software MiniTAB 20

✓ **Interacciones de 2 términos:**

Estas interacciones examinan cómo las combinaciones de dos variables afectan la variable dependiente.

- Tiempo de lixiviación \* Densidad de pulpa: Esta interacción no es significativa (valor  $p > 0.05$ ), lo que sugiere que no hay un efecto conjunto importante de estas dos variables sobre la variable dependiente.
- Tiempo de lixiviación \* Concentración de ácido: Esta interacción es significativa (valor  $p < 0.05$ ), lo que indica que el tiempo de lixiviación y la concentración de ácido tienen un efecto conjunto importante sobre la variable dependiente.

- Densidad de pulpa \* Concentración de ácido: Esta interacción no es significativa (valor  $p > 0.05$ ), lo que sugiere que la combinación de estas dos variables no tiene un efecto conjunto importante sobre la variable dependiente.

✓ **Interacción de 3 términos:**

la combinación de las tres variables (tiempo de lixiviación, densidad de pulpa y concentración de ácido)

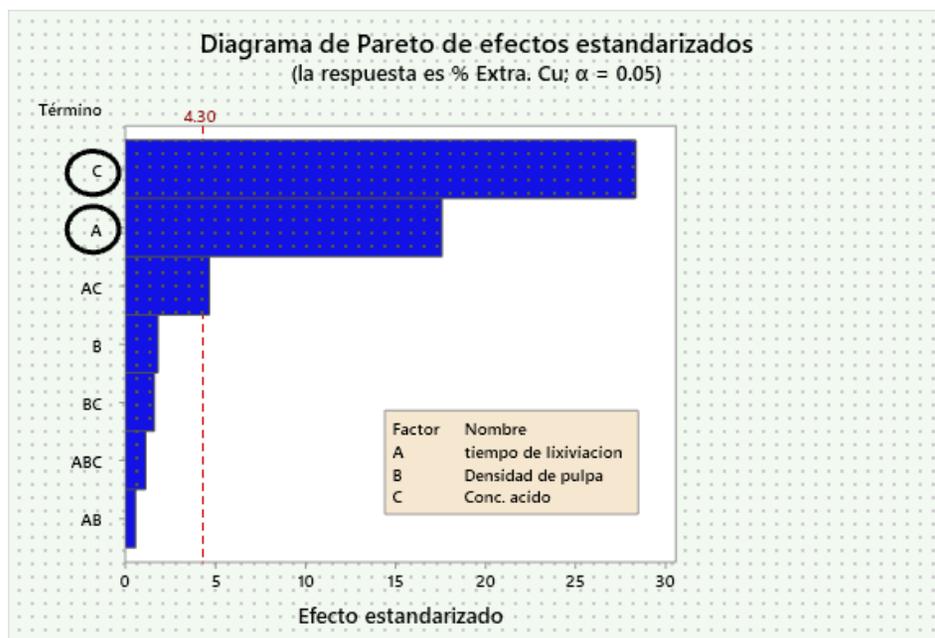
- Tiempo de lixiviación \* Densidad de pulpa \* Concentración de ácido: Esta interacción no es significativa (valor  $p > 0.05$ ), lo que sugiere que la combinación de las tres variables no tiene un efecto importante en la variable dependiente.

Las variables significativas son tiempo de lixiviación y concentración de ácido. La interacción significativa es entre tiempo de lixiviación y concentración de ácido.

### 6.2.4. Diagrama de Pareto

**Figura 18**

*Diagrama de Pareto de los efectos*



*Nota:* (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Elaborado en Minitab 20

Este diagrama muestra la magnitud absoluta de los efectos y ayuda a identificar cuáles son estadísticamente significativos.

- La línea vertical representa el umbral de significancia estadística.
- Los efectos que sobrepasan esta línea son estadísticamente significativos.
- A (Tiempo de lixiviación) variable que pasa el umbral, por consiguiente, es una de las variables significativas

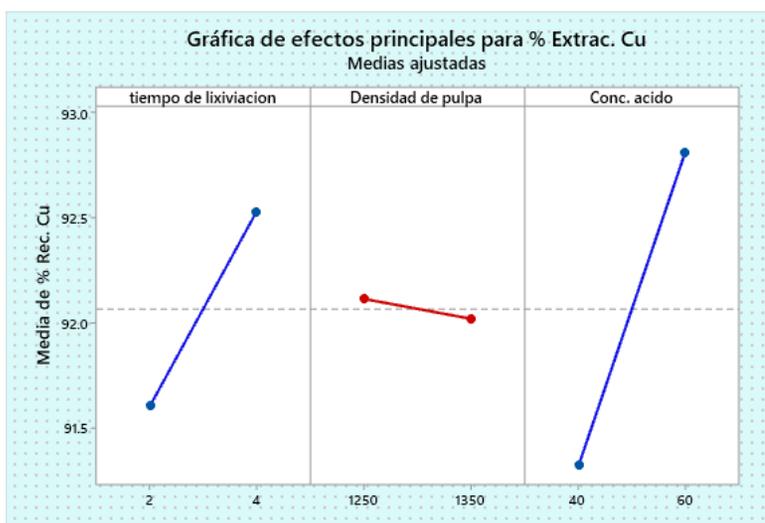
- B (Densidad de pulpa) no alcanza el umbral de significancia lo que implica no ser significativo para el proceso de extracción de cobre por lixiviación acida.
- C (concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) pasa el umbral de significancia lo que implica ser más significativo para el proceso de extracción de cobre.
- AB (la interacción entre el tiempo de lixiviación y la concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) son significativamente para el proceso de extracción de cobre por lixiviación acida.

### 6.2.5. Análisis de los Efectos Principales de cada Variable en la extracción de cobre

En la figura 19 indican la importancia de ciertos factores dentro del modelo. Si estas líneas no presentan una inclinación marcada, quedarán excluidas del mismo. En este contexto, las variables de la interacción entre el tiempo de lixiviación y la concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> resultan ser más significativas. En la Figura 19, se observan líneas con pendientes pronunciadas.

#### Figura 19

*Grafica de efectos principales para extracción de Cobre*



*Nota:* (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Elaborado en Minitab 20

Esta gráfica muestra cómo cada factor individual afecta la recuperación de cobre:

➤ Factor A: Tiempo de lixiviación tiene una pendiente positiva, lo que indica el mayor efecto. Al aumentar su nivel de bajo a alto, la recuperación de Cu aumenta aproximadamente de 91.58% a 92.09%. Este es el factor más influyente.

➤ Factor B: Densidad de pulpa tiene el pendiente ligeramente negativo, indicando el menor efecto. Al disminuir la densidad de pulpa, la extracción sube ligeramente de 92.003% a unos 92.09%.

➤ Factor C: la concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, muestra una pendiente positiva pronunciada. Al incrementar C, la extracción aumenta de aproximadamente 91.305% a 92.795%.

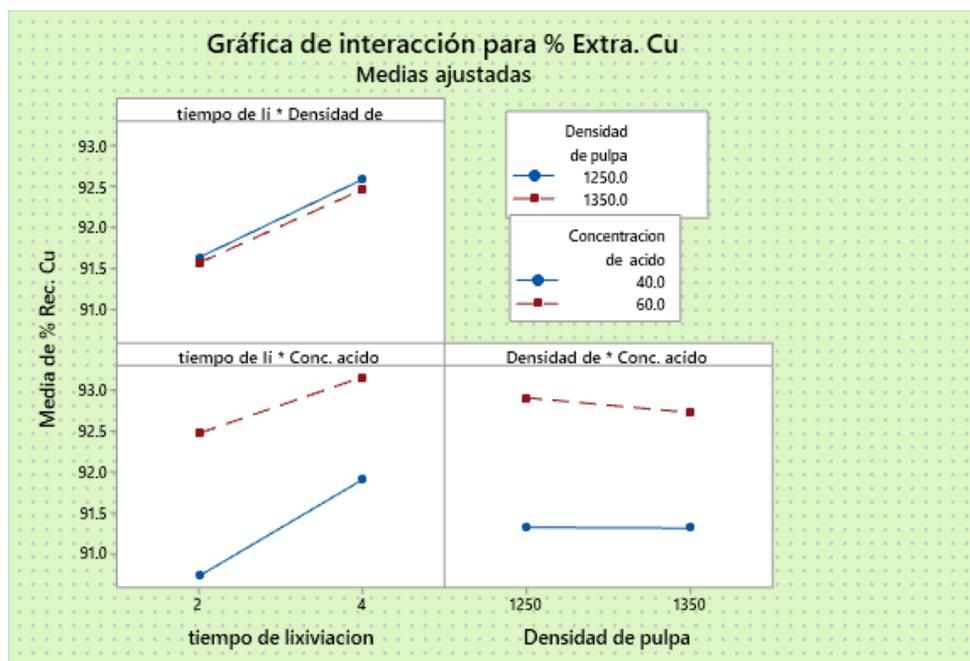
La grafica de efectos principales nos da a conocer el tipo y grado de incidencia de nuestros factores en el fenómeno para cual podemos ver que la variable: Tiempo de lixiviación y la concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, tienen una pendiente positiva pronunciada, lo cual nos dice que este interviene de forma directamente proporcional a nuestro factor de respuesta, el factor B densidad de pulpa es evidentemente negativa menos pronunciada por lo que esta variable no es significativa en el proceso de obtención de cobre por el proceso de lixiviación acida.

### 6.2.6. Análisis de los efectos de las interacciones en la extracción

La Figura 19 nos muestra el impacto de cada variable de forma independiente. Sin embargo, no se mostraron efectos de las interacciones entre las variables presentes. Estos efectos lo visualizamos en la figura 20.

#### Figura 20

Gráfica de residuos para porcentaje de recuperación de cobre



Nota: (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Elaborado en Minitab 20

Esta gráfica muestra las interacciones entre los factores analizados y su efecto en la recuperación de cobre (% Etrac. Cu).

1. Interacción entre tiempo de lixiviación y densidad de pulpa (gráfico superior izquierdo)

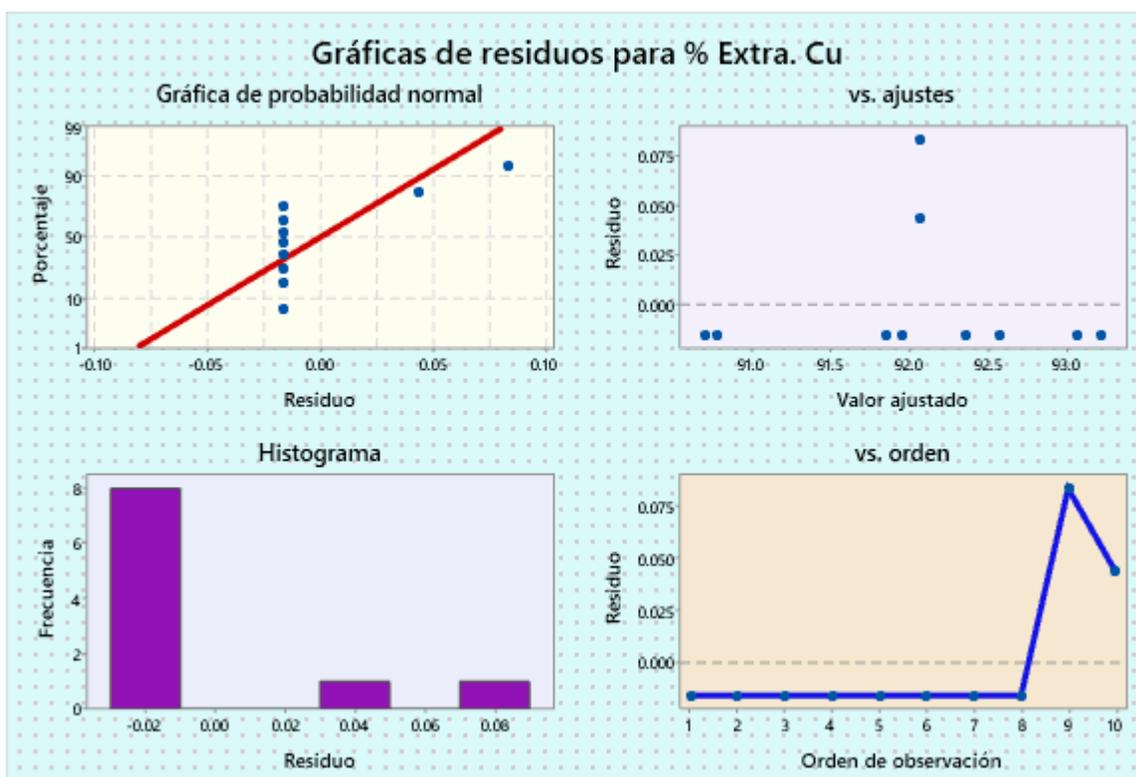
Ambas líneas muestran un aumento en el % Rec. Cu a medida que el tiempo de lixiviación aumenta. La densidad de pulpa (1250 vs. 1350) no genera una diferencia significativa en la tendencia.

2. Interacción entre tiempo de lixiviación y concentración de ácido (gráfico inferior izquierdo), la concentración de ácido de 60.0 (línea roja discontinua) da valores más altos de recuperación en comparación con 40.0, ambas líneas muestran un incremento con el tiempo de lixiviación, pero la pendiente es más pronunciada para la concentración de ácido de 40.0. Existe una interacción moderada, donde el impacto del tiempo de lixiviación es mayor a menor concentración de ácido.

3. Interacción entre densidad de pulpa y concentración de ácido (gráfico inferior derecho), las líneas son casi paralelas y no muestran un cambio significativo con la densidad de pulpa.

### Figura 21

*Gráfica de residuos para porcentaje de extracción*



*Nota:* (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Elaborado en Minitab 20

Estas gráficas de residuos nos permiten verificar la aleatoriedad de la data en nuestro fenómeno, ayudan a verificar los supuestos del modelo de regresión, según las gráficas vistas como la gráfica de probabilidad podemos ver como:

a) Gráfica de probabilidad normal:

➤ Los puntos mantienen alrededor de una línea recta, lo que sugiere que los residuos están normalmente distribuidos.

➤ Esto indica que el modelo cumple con el supuesto de normalidad.

b) Residuos vs. Ajustes:

➤ No se observa un patrón claro, lo que sugiere que la varianza de los residuos es invariable (homocedasticidad).

➤ Esto apoya el supuesto de variación constante en el modelo.

c) Histograma de residuos:

➤ La forma es aproximadamente simétrica y se asemeja a una distribución normal.

➤ Esto respalda el supuesto de normalidad de los residuos.

d) Residuos vs. Orden:

➤ No se observe un patrón claro en la secuencia de los residuos.

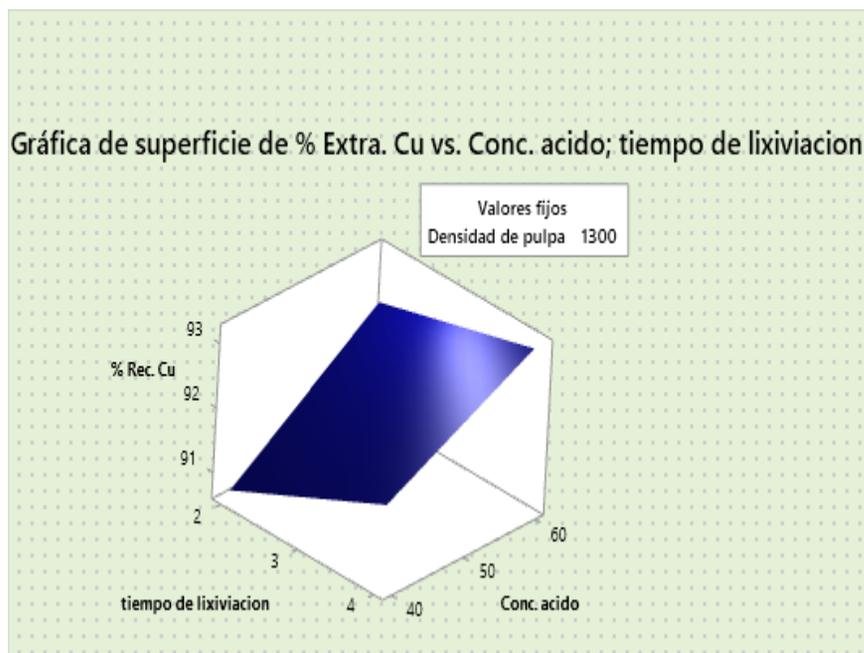
➤ Esto sugiere que no hay autocorrelación significativa en los residuos.

Las gráficas de residuos indican que el modelo cumple razonablemente bien con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los residuos. Esto aumenta la confianza en la validez del modelo y sus conclusiones.

### 6.2.7. Gráfico de superficie y contornos de respuesta

**Figura 22**

Gráfica de superficie de extracción de cobre vs variables independientes.



Nota: (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

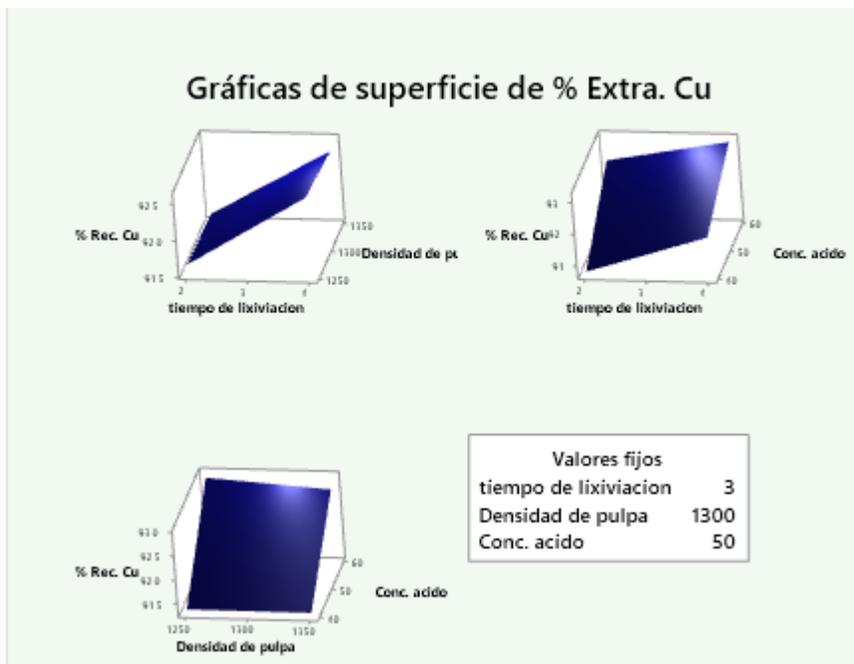
Elaborado en Minitab 20

La Figura 22 se muestra el contorno que tiene como característica principal mostrar la interacción de dos factores de respuesta por medio de áreas coloreadas, siendo el color morado, el área que muestra los valores óptimos para nuestro fenómeno, este nos muestra que bajo las condiciones determinadas como optimas tenemos áreas relativamente grandes lo cual indica que tenemos un buen intervalo de operación para nuestras variables. También muestra un modelo bivariado, como consecuencia de tomar las variables de tiempo de lixiviación y concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, frente a la variable dependiente, observándose la región optima cuando toman

valores de 4 horas y 60 g/l respectivamente por lo que, es conveniente trabajar para obtener una extracción favorable.

### Figura 23

*Gráfica de superficies para la extracción de cobre*



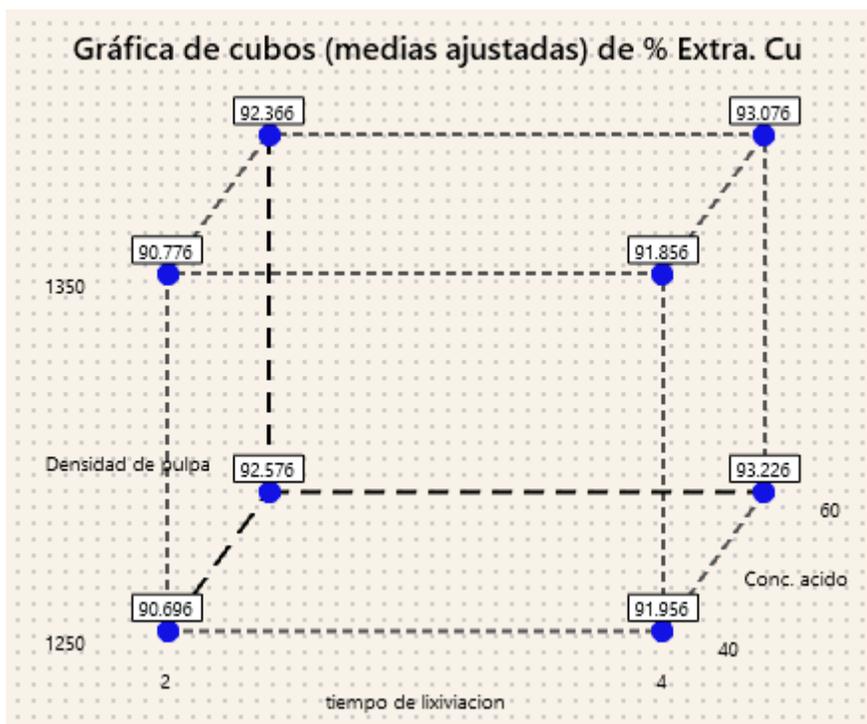
*Nota:* (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

Elaborado en Minitab 20

La figura anterior a diferencia de grafica de contorno esta nos permite ver el comportamiento en conjunto de 3 variables mediante una superficie, aquí podemos ratificar y observar de otra manera que todas las variables independientes tienen una incidencia positiva respecto al porcentaje de recuperación de cobre.

**Figura 24**

Gráfica de cubos (medias ajustadas) de extracción de Cu



Nota: (A: Tiempo de lixiviación, B: Densidad de pulpa, C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)

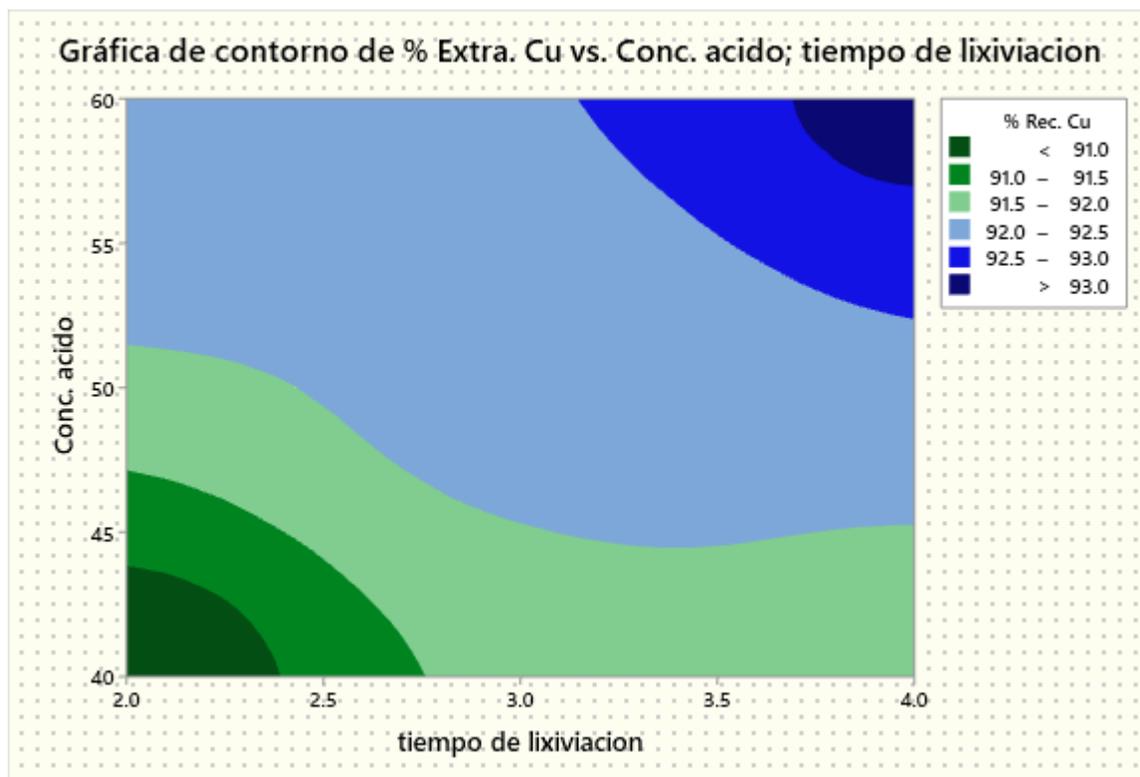
Elaborado en Minitab 20

Esta gráfica muestra la recuperación predicha para cada combinación de factores:

La mayor recuperación (93.226%) se obtiene bajo condiciones de: Tiempo de lixiviación de 4 horas- concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 60 g/l y una densidad de pulpa 1250 g/l:

**Figura 25**

*Gráfica de contorno de extracción vs variable independientes*



*Nota:* (A: Tiempo de lixiviación y C: concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) Elaborado en Minitab 20

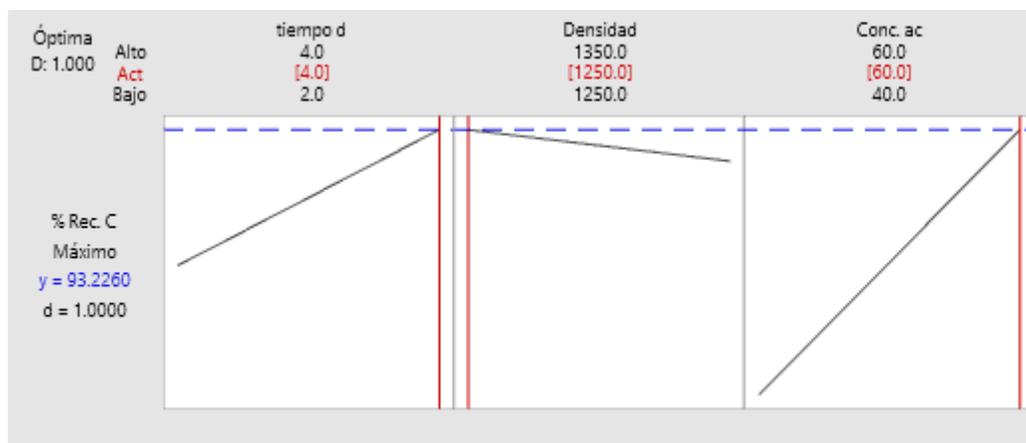
La grafica de contorno tiene como característica principal mostrar la interacción de factores de tiempo de lixiviación y concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> respecto del factor de respuesta recuperación de cobre por medio de áreas coloreadas, siendo el color azul oscuro el área que muestra los valores óptimos para nuestro fenómeno, bajo las condiciones determinadas como optimas tenemos áreas relativamente grandes lo cual indica que tenemos un buen intervalo de operación para nuestras variables.

### 6.2.8. Optimización de Respuesta: % Extrac. de Cu

Sólo se consideran los puntos axiales y centrales al optimizar un modelo que incluye un término de punto central.

**Figura 26**

*Gráfica de optimización de extracción de cobre*



*Nota:* Data de Software MINITAB 20

Se puede notar que con los valores que nos proporcionarán el mejor resultado para nuestro fenómeno, nuestro variable presentan una inclinación ascendente del tiempo de lixiviación y concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, lo que sugiere que este directamente proporcionales al factor de respuesta.

Según el diseño, la mayor recuperación de cobre se logra con las variables de tiempo de lixiviación de 4 horas, con una densidad de pulpa de 1200 g/l y una concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de 60g/l

**6.2.8.1. Modelo matemático de correlación para la optimización de extracción de Cu mediante lixiviación acida.**

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

$$\% \text{ Extrac. Cu} = 68 + 5.37A + 0.01320B + 0.456C - 0.00330A * B - 0.0903A * C - 0.000265B * C + 0.000060A * B * C$$

Donde:

A: Tiempo de lixiviación (horas)

B: Densidad de pulpa (g/l)

C: Concentración de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (g/l)

**Tabla 58**

*Parámetros*

Respuesta	Meta	Inferior	Objetivo	Superior	Ponderación	Importancia
% Extrac. Cu	Máximo	90.68	93.21		1	1

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 59**

*Solución*

Solución	Tiempo de lixiviación	Densidad de pulpa	Conc. acido	% Extrac. Cu Ajuste	Deseabilidad compuesta
1	4	1250	60	93.226	1

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

**Tabla 60***Predicción de respuesta múltiple*

Variable	Valor de configuración			
tiempo de lixiviación	4			
Densidad de pulpa	1250			
Conc. ácido	60			
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
% Extrac. Cu	93.2260	0.0734	(92.9103; 93.5417)	(92.7767; 93.6753)

*Nota:* Data de Software MINITAB 20

- Respuesta: Aquí se indica el valor de la variable de interés, que en este caso es la recuperación de cobre (% Extrac. Cu), que es de 92.2260%.
- Ajuste (0.0734): Este valor puede ser el error o la desviación estándar del modelo de ajuste que predice la recuperación de cobre, indicando cuán precisa es la estimación.
- EE de ajuste (92.9103; 93.5417): Este intervalo es el "Error Estándar de Ajuste" y muestra el rango dentro del cual se espera que se encuentre el valor real de la extracción de cobre con un 95% de certeza, es decir, entre 92.9103% y 93.5417%
- IC de 95% (92.7767; 93.6753): Este es el "Intervalo de Confianza" al 95% para la extracción de cobre, el cual indica que hay un 95% de probabilidad de que el valor real de la extracción se encuentre dentro de este rango: entre 92.7767% y 3.6753%.

## CONCLUSIONES

Se consideran que las variables operativas más influyentes en el proceso de lixiviación acida para la extracción de cobre del yacimiento minero artesanal de Qochapata, son el tiempo de lixiviación y la concentración del ácido sulfúrico. El modelo factorial desarrollado explica el 99.07% de la variabilidad en la recuperación de cobre, lo que permite una recuperación efectiva del proceso.

La densidad de pulpa no mostró un efecto significativo ( $p=0.212$ ) y tuvo un efecto negativo (efecto=-0.095). la densidad de pulpa a 1250 g/l produjo la mayor extracción media de 92.09%, pero las diferencias entre los tiempos estudiados no fueron estadísticamente significativas.

Se determina que la concentración de ácido sulfúrico óptima es de 60 g/l, resultando en una recuperación media de cobre de 92.79%. La dosificación de reactivos mostró un efecto más significativo ( $p=0.001$ ) y positivo (efecto=1.49) en la extracción de cobre, siendo la variable más influyente.

El tiempo de lixiviación más adecuado es de 4 horas, el cual produjo la mayor recuperación media de cobre (92.513%). Se demostró tener el efecto significativo ( $p=0.003$ ) y positivo (efecto=0.950) en la extracción de cobre.

## RECOMENDACIONES

- Se aconseja realizar pruebas piloto a mayor escala para validar los resultados obtenidos en este estudio y asegurar su aplicabilidad en condiciones de producción real.
- Se recomienda hacer un estudio más detallado, utilizando el diseño factorial fraccionado para poder evaluar la interacción de las otras variables.
- Se recomienda la implementación de equipos y mejora del laboratorio de hidrometalurgia y Análisis Químico de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, para este tipo de investigación tecnológica.

## Bibliografía

- Aguila, M., & Valencia, R. (2011). *Lixiviación acida de minerales oxidados de cobre del yacimiento de la zona de Tambo – Cocachacra*. Cusco.
- Aviles, Y., & Cutire, H. (2020). *Lixiviación por agitación de minerales oxidados de cobre de la zona de Taypitunga-Layo-Canas-Cusco*. Cusco.
- Bustamante, O., & Gaviria, C. (2007). *Hidrometalurgia aplicada*. Colombia.
- Gonzales, P., & Escobar, c. (2020). *Lixiviación de un mineral mixto de cobre*. Arequipa.
- Guiachetti, D. (2016). *Consumo de ácido sulfúrico y cinética de lixiviación de un mineral oxidado de cobre*. Chile.
- Jordan, H., & Vargas, T. (2020). *Lixiviación de minerales oxidados de cobre con soluciones*. Chile.
- Lombana, L. (2018). *Variables influyentes en el proceso de lixiviación para la recuperación de metales contenidos en lodos galvánicos*. Lima.
- Lynn, n. (1997). *The bioleaching and processing of refractory gold ore*.
- Mamani, E., & ccollque, V. (2019). *Extracción del cobre mediante lixiviación por agitación de*. Peru.
- Martinez, E. (2016). *Estudio y análisis del proceso de obtención del sulfato de cobre (II) pentahidratado a partir del cobre reciclado, considerando los riesgos y medidas de seguridad en el manipuleo del ácido sulfúrico y el producto*. Lima.
- Nuñovero, c. (2018). *Diseño y construcción de Pads de lixiviación en pilas*. Lima.
- Ortiz, A. (2012). *Lixiviación Ácida de Minerales Oxidados de Cobre (Crisocola) con poca disolución de Fe al utilizar KHSO4*. Mexico.

## ANEXO

## Matriz de consistencia

Título de la investigación: “EXTRACCION DEL COBRE MEDIANTE LIXIVIACION ACIDA DE LOS BOTADEROS DE LA MINERIA ARTESANAL DE LA COMUNIDAD QOCHAPATA-COTABAMBAS”

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLE	METODOLOGÍA
<p>Problema General</p> <p>¿En qué medida será la extracción de cobre mediante lixiviación por agitación de los botaderos de la comunidad de</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Determinar el porcentaje de cobre extraído por lixiviación acida de los botaderos de la comunidad de Qochapata?</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>Con el proceso de lixiviación acida se podrá extraer el metal valioso de los botaderos de la comunidad de Qochapata con una eficacia alta.</p>	<p>Variable</p> <p>Recuperación del cobre. (%)</p>	<p><b>Método de investigación</b></p> <p>Análítico y deductivo</p>
<p>Problemas Específicos</p> <p>¿Cuál será densidad de pulpa adecuada para desarrollar el proceso de lixiviación?</p>	<p>Objetivos Específicos</p> <p>Determinar la densidad óptima para la extracción de cobre por el proceso de lixiviación.</p>	<p>Hipótesis Específicas</p> <p>La densidad de pulpa fluctúa entre 1250 a 1350 g/l para la extracción de cobre mediante la lixiviación acida.</p>	<p>Variables Independientes</p> <p>Densidad de pulpa (g/l)</p>	<p><b>Tipo de investigación</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p><b>Alcance de investigación</b></p> <p>Descriptivo</p> <p>Explicativo</p> <p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>Cuantitativo</p> <p>Experimental</p>
<p>¿Cuál será la concentración adecuada del ácido sulfúrico en la lixiviación?</p>	<p>Determinar la concentración en g/l del ácido sulfúrico para la lixiviación.</p>	<p>La concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fluctúa entre 40 a 60g/l para la extracción de cobre en la lixiviación acida.</p>	<p>Concentración del ácido (g/l)</p>	<p><b>Población</b></p> <p>Todos los minerales oxidados de cobre contenidos en el botadero de la comunidad de Qochapata.</p>
<p>¿Cuál será el tiempo adecuado para la lixiviación por agitación y obtener una mejor extracción?</p>	<p>Establecer el tiempo de lixiviación para determinar la cinética de extracción de cobre.</p>	<p>El tiempo fluctúa entre 2-4 horas para la extracción de cobre en la lixiviación ácida.</p>	<p>Tiempo de lixiviación(h)</p>	<p><b>Muestra</b></p> <p>Se seleccionará 50 Kg de mineral por conveniencia.</p> <p><b>Técnicas de muestro</b></p>

Nota: elaboración Propia

### Panel fotográfico

- **Foto 1 y 2: Muestreo de mineral de óxido de cobre en el yacimiento minero artesanal de Qochapata-Cotabambas**



- **Foto 3 y 4: Preparación mecánica de muestras**



- Foto 5 y 6: Determinación de la gravedad específica del mineral



- Foto 7 y 8: pesado y molienda



- **Foto 9 y 10: Preparación de soluciones**



- **Foto 10 y 11: pesado de muestra y preparación de las condiciones para la lixiviación**



- Foto 11 y 12: proceso de lixiviación acida en botellas



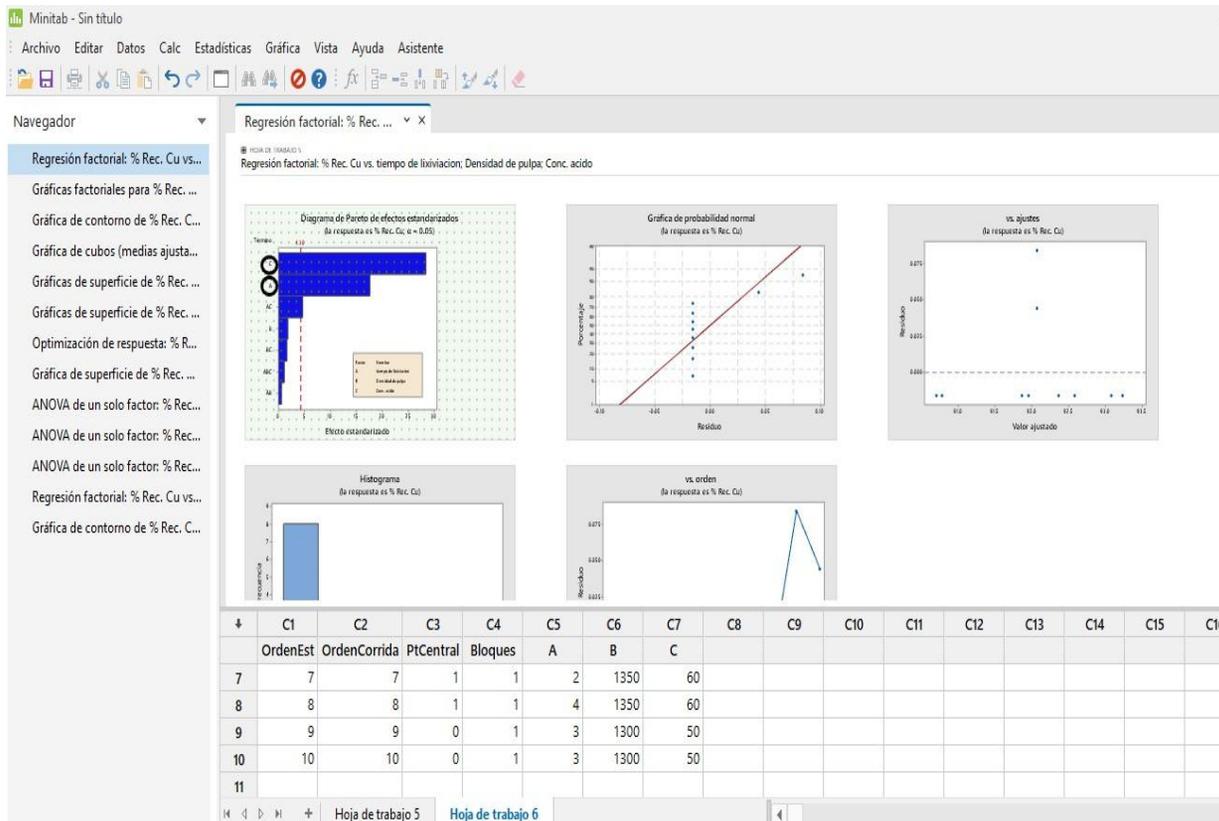
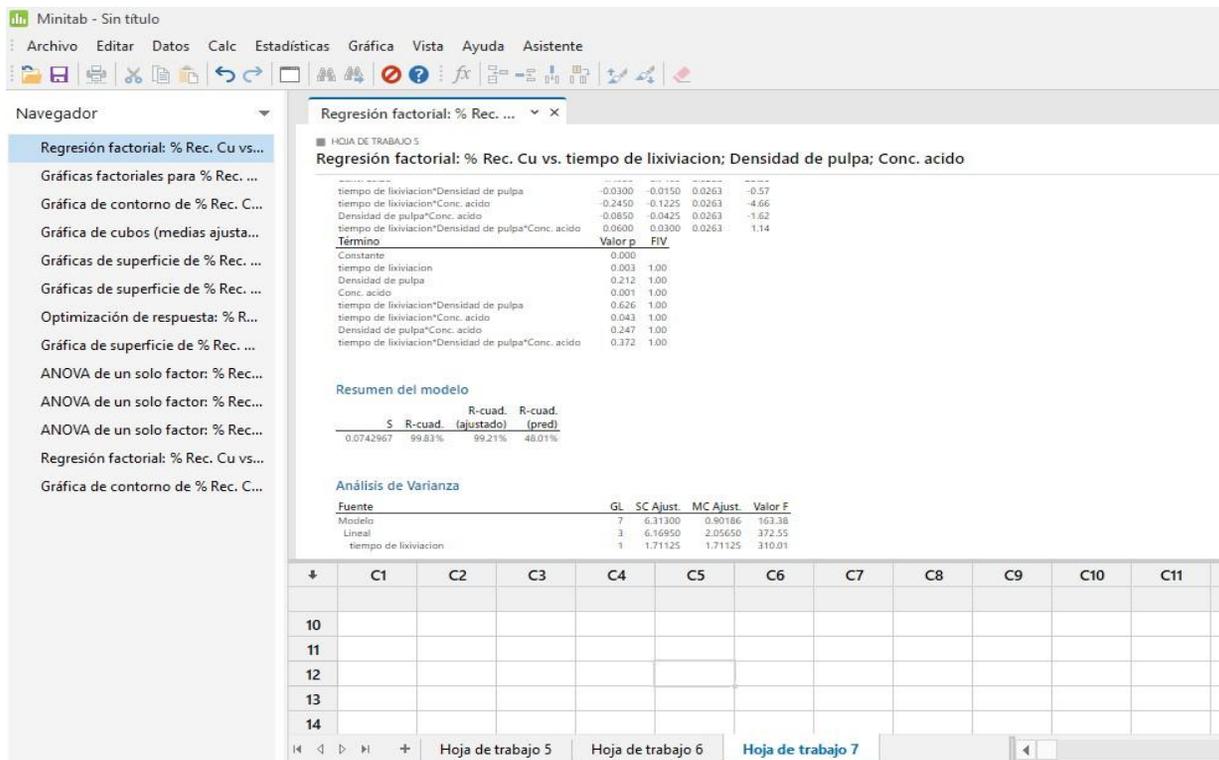
- Foto 13 y 14: cambio de coloración en la titulación con hidróxido de sodio



- Foto 15: extracción del PLS (envió a laboratorio químico LAS.)



• Software estadístico MINITAB 20



- Informe mineralógico por difracción de rayos x (Bizalab)



### INFORME DE ENSAYO PRELIMINAR

*Estudio mineralógico por difracción de rayos X para muestra MMO-101 y MMO-103*

APROBADO POR:

GERENTE GENERAL: Erics Gabriel

Nombre de mineral	Formula general	Resultado aprox. (%) muestra MMO-101 a malla -10	Resultado aprox. (%) muestra MMO-103 a malla -200
Plagioclasa (Oligoclasa)	(Na, Ca) (Al, Si) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	32	35
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	23	26
Malaquita	Cu <sub>2</sub> (CO <sub>3</sub> )(OH) <sub>2</sub>	9	7
Feldespato - K (Ortoclasa)	KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	7	5
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	6	5
Fase indefinida	---	4	4
crisocola	Cu <sub>2</sub> As <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (2H <sub>2</sub> O)	2	1.5
Brochantita	Cu <sub>4</sub> (SO <sub>4</sub> )(OH) <sub>6</sub>	2	1.5
Barita	BaSO <sub>4</sub>	2	2
Enargita	Cu <sub>2</sub> As <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	< Limite Definido	< Limite Definido
Anatasa	TiO <sub>2</sub>	<L.D.	<L.D.

[\*] Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

<sup>1</sup><Valor numérico>=Límite de detección del método, <sup>2</sup><Valor Numérico>=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAB. Cualquier emienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.

• Informe de ensayo por LAS (Laboratorios Analíticos del Sur)



Laboratorios Analíticos del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN  
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



Boleto F12 888

Clave generada : 674E74F1

**INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-24-04050**

Fecha de emisión: 07/11/2024

Página 1 de 1

Señores: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Dirección: CUSCO-SAN SEBASTIÁN  
Atención: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Recepción: 4/11/2024  
Realización: 4/11/2024  
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

**Métodos ensayados**

- 502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Método) - 2013 (METODO DE ENSAYO ACREDITADO)
- \*505 Método de Ensayo para Cobre Soluble en Ácido Sulfúrico por Absorción Atómica

Código Interno L.A.S.	(i) Nombre de Muestra	(ii) Proveniencia de Muestra	(iii) Descripción de Muestra	*502		*505	
				Qualit	Cu	%	%
M000000	PROYECTO CONTAMINADA	Se proporcionó por el cliente	Muestra Sólida	+	4,245	+	4,35

Fin del Informe

  
Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.  
César A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114405

Este informe es válido solo para el número de muestra que aparece en el encabezado. No se permite la reproducción o el uso de este informe sin el consentimiento escrito de LAS.

\*Este informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentra dentro del ámbito de reconocimiento multilateral/multinacional de los miembros firmantes de (IAAC o ILAC).

(\*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"<Valor numérico>"<Límite de detección del método, "<Valor Numérico>"<Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados aquí están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier error en la información en el contenido del presente documento lo anula.

(i) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió





Laboratorio Analítico del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN  
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



REGISTRO N° LE-050

Clave generada : 674E74F2  
Página 1 de 1

### INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-24-04280

Fecha de emisión: 27/03/2025

Señores: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Dirección: CUSCO-SAN SEBASTIÁN  
Atención: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Recepción: 27/03/2025  
Realización: 27/03/2025  
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

#### Métodos ensayados

502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)

505 Método de Ensayo para Cobre Soluble en Ácido Sulfúrico por Absorción Atómica

Código Interno L.A.S.	N° Nombre de Muestra	N° Procedencia de Muestra	N° Designación de Muestra	SNC	
				Cu	%
MN24028028	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	8.59	
MN24028027	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	10.30	
MN24028029	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	10.95	
MN24028028	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	11.86	
MN24028030	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	12.35	
MN24028031	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	12.96	
MN24028032	PROYECTO CORTANABASA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	13.6	

Fin del informe

Laboratorio Analítico del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Soto  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114-026

\*Este Informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento mutuo/instituto de los miembros firmantes de IAAC o IAC\*

[\*] Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"=Valor numérico"=Límite de detección del método, "=Valor Numérico"=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier emienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

[\*] : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió.





Laboratorio Analítico del Sur

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
POR LA DIRECCIÓN DE ACREDITACIÓN  
DEL INACAL CON REGISTRO N° LE-050



INACAL

INACAL  
DA - Perú  
Laboratorio de Calidad  
Acreditado

Clave generada : 674E74F2

Página 1 de 1

### INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-AC-24-04281

Fecha de emisión: 27/03/2025

Señores: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Dirección: CUSCO-SAN SEBASTIÁN  
Atención: JHENRRY QUISPE SONCCO  
Recepción: 27/03/2025  
Realización: 27/03/2025  
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

#### Métodos ensayados

502 Método de Ensayo para Cobre por Absorción Atómica, Método Desarrollado (Validado) - 2013 (MÉTODO DE ENSAYO ACREDITADO)

\*505 Método de Ensayo para Cobre Soluble en Ácido Sulfúrico por Absorción Atómica

Código Interno L.A.S.	N° Nombre de Muestra	N° Procedimiento de Muestra	N° Descripción de Muestra	502	
				Cu	%
MN02026724	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	17.36	
MN02026725	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.21	
MN02026726	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	17.36	
MN02026727	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.19	
MN02026728	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.34	
MN02026729	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.46	
MN02026730	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.38	
MN02026731	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.43	
MN02026732	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.25	
MN02026733	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra en solución	18.25	
MN02026734	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.025	
MN02026735	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.024	
MN02026736	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.021	
MN02026737	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.025	
MN02026738	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.040	
MN02026739	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.030	
MN02026740	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.040	
MN02026741	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.030	
MN02026742	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.020	
MN02026743	PROYECTO CORTAMARCA	No proporcionado por el cliente	Muestra gruesa	0.040	

----- Fin del Informe -----

Laboratorio Analítico del Sur E.I.R.L.  
Omar A. Juárez Solo  
Gerente de Operaciones  
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

\*Este Informe de ensayo, al estar en el marco de la acreditación del INACAL - DA, se encuentran dentro del ámbito de reconocimiento multilateral de los miembros firmantes de IAAC e ILAC\*

(\*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos que no han sido acreditados por el INACAL - DA.

"<math>V</math>"=Valor numérico">=Límite de detección del método, "<math>L</math>"=Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier errata o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

