

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE CLORURO DE SODIO Y PIRITA EN
LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE
CONCENTRADO CALCOPIRÍTICO TACNA – 2024**

TESIS

Presentada por:

Bach. Juan Manuel Ramiro Martínez Jiménez

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO QUÍMICO

TACNA – PERÚ

2026

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

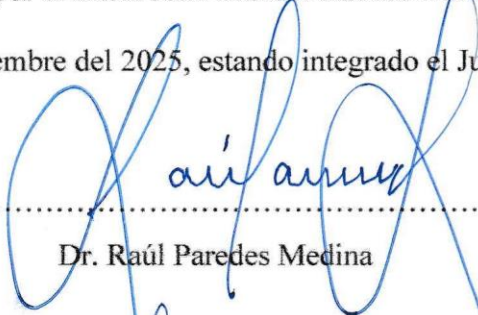
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Química

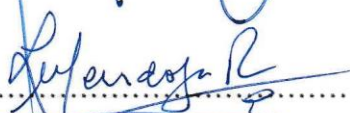
**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE CLORURO
DE SODIO Y PIRITA EN LA RECUPERACIÓN
DE COBRE EN LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE
CONCENTRADO CALCOPIRÍTICO
TACNA – 2024**

Tesis sustentada por el Bach. Juan Manuel Ramiro Martínez Jiménez y aprobada
el día 07 de noviembre del 2025, estando integrado el Jurado Calificador por:

Presidente:


.....
Dr. Raúl Paredes Medina

Secretario:


.....
Dra. Zoila Luz Mendoza Rodas

Vocal:


.....
Mgr. Alberto Carmelo Condori Gamarra

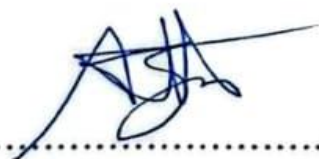
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Mgr. Alberto Carmelo Condori Gamarra en condición de asesor acreditado por la Resolución de Facultad N° 8787-2024-FAIN/UNJBG de la tesis titulada: "EVALUACIÓN DEL EFECTO DE CLORURO DE SODIO Y PIRITA EN LA RECUPERACIÓN DE COBRE EN LIXIVIACIÓN ÁCIDA DE CONCENTRADO DE CALCOPIRÍTICO TACNA-2024"

Presentado por el bachiller, Juan Manuel Ramiro Martínez Jiménez para optar el título de Ingeniero Químico.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual Turnitin cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 4 (cuatro). Por lo que **CERTIFICO QUE LA SIMILARIDAD** de la tesis está de acuerdo al nivel **PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del título.



.....
Mgr. Alberto Carmelo Condori Gamarra
Asesor



.....
Juan Manuel Ramiro Martínez Jiménez
Bachiller



DEDICATORIA

Dedicado a mis queridos padres, Juan y Olga, este logro es un testimonio de su intenso amor y dedicación, a mi amada hija Rebeca, cada día que paso a su lado es un regalo que atesoro en mi corazón y a mi compañera de vida Jennifer quien, en los días turbulentos, ha sido mi ancla y en los buenos momentos, mi razón de sonrisas. Mi gratitud hacia ustedes es imposible de expresar completamente.

.

AGRADECIMIENTO

Un profundo agradecimiento a Dios, por siempre guiarme en cada etapa de mi vida, tanto en momentos buenos y malos.

A mis padres y hermana, por su amor, paciencia y confianza siempre en mí y en mis proyectos de vida.

A mi hija Rebeca y pareja Jennifer por su amor, comprensión y apoyo constante en cada momento.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del problema	2
1.1.1. Antecedentes del problema	2
1.1.2. Problemática de la investigación	3
1.2. Formulación del problema	4
1.3. Justificación e importancia	4
1.4. Alcances y limitaciones	6
1.5. Objetivos	7
1.5.1. Objetivo general	7
1.5.2. Objetivos específicos	7
1.6. Hipótesis	8
1.6.1. Hipótesis general	8
1.6.2. Hipótesis específicas	8
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO	9

2.1.	Antecedentes	9
2.2.	Bases teóricas	13
2.2.1.	Fundamentos de la lixiviación	13
2.2.2.	Operaciones industriales para lixiviación	15
2.2.3.	Tipos de lixiviación	16
2.2.4.	Descripción de la calcopirita (CuFeS_2)	22
2.2.5.	Descripción de la pirita	23
2.2.6.	Cloruro de sodio en procesos de lixiviación	24
2.2.7.	pH	25
2.2.8.	Concentración por flotación	26
2.2.9.	Aplicaciones de la lixiviación en la industria minera	27
2.2.10.	Agentes lixiviantes	27
2.2.11.	PLS (Pregnant Leaching Solution)	28
2.2.12.	Concentración de metales	28
2.2.13.	Reactores y equipos para lixiviación de concentrados	28
2.2.14.	Capa de pasivación en lixiviación	29
2.2.15.	Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS)	30
2.2.16.	Diseño factorial	31
2.3.	Definición de términos	33
CAPÍTULO III_MARCO METODOLÓGICO		35
3.1.	Tipo y diseño de la investigación	35
3.2.	Población y muestra	36
3.3.	Operacionalización de las variables	36
3.3.1.	Identificación de las variables	37
3.3.2.	Caracterización de las variables	37
3.4.	Metodología experimental	37
3.4.1.	Matriz de pruebas	37
3.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	39
3.5.1.	Acciones y actividades para la ejecución del proyecto	39

3.5.2.	Materiales e instrumentos	40
3.5.3.	Técnicas de análisis	40
3.5.4.	Preparación de reactivos y equipos	50
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN		58
4.1.	Resultados	58
4.1.1.	Lixiviación sin pirita y sin cloruro de sodio	58
4.1.2.	Recuperación de cobre con pirita y cloruro de sodio	60
4.1.3.	Análisis estadístico	65
4.2.	Resumen de resultados	76
4.3.	Discusión de resultados	76
4.3.1.	Prueba preliminar	76
4.3.2.	Efecto de la adición de pirita y cloruro de sodio	77
4.3.3.	Disolución de hierro	78
4.3.4.	Influencia del pH y potencial ORP	79
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83
ANEXOS		86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Producción mundial de cobre mediante fundición</i>	2
Tabla 2 <i>Operacionalización de variables</i>	36
Tabla 3 <i>Matriz de pruebas</i>	38
Tabla 4 <i>Cuadro de actividades</i>	39
Tabla 5 <i>Análisis de cabeza</i>	46
Tabla 6 <i>Cálculo del volumen de PLS</i>	58
Tabla 7 <i>Recuperación de Cu sin pirita ni cloururo</i>	60
Tabla 8 <i>Masa de sólidos</i>	60
Tabla 9 <i>Masa de cobre en la cabeza</i>	61
Tabla 10 <i>Leyes de cobre obtenidos</i>	62
Tabla 11 <i>Porcentaje de recuperación de cobre</i>	64
Tabla 12 <i>Análisis de varianza</i>	65
Tabla 13 <i>Resumen de regresión</i>	67
Tabla 14 <i>Ingreso de masa de hierro</i>	69
Tabla 15 <i>Recuperación de hierro</i>	70
Tabla 16 <i>Cálculo de ion férrico</i>	70
Tabla 17 <i>Correlación Pearson</i>	72
Tabla 18 <i>Resultados de pH y potencial ORP</i>	72
Tabla 19 <i>ANOVA pH-ORP en recuperación de cobre</i>	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de fases simplificado de disolución de cobre</i>	15
Figura 2 <i>Esquema típico de lixiviación en botadero</i>	20
Figura 3 <i>Tipos de pilas de lixiviación</i>	21
Figura 4 <i>Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS)</i>	31
Figura 5 <i>Preparación de muestras para cobre por volumetría</i>	43
Figura 6 <i>Reactivos utilizados en cobre por volumetría</i>	43
Figura 7 <i>Agitación de fiolas enrasadas postdigestión</i>	45
Figura 8 <i>Elaboración de curvas de calibración</i>	46
Figura 9 <i>Análisis de ion ferroso</i>	48
Figura 10 <i>Equipos de medición de pH y ORP</i>	49
Figura 11 <i>Pirita y concentrado de cobre</i>	50
Figura 12 <i>Pesado de reactivos sólidos</i>	51
Figura 13 <i>Preparación de solución lixivante</i>	52
Figura 14 <i>Equipos utilizados en la lixiviación de concentrado</i>	52
Figura 15 <i>Prueba preliminar</i>	53
Figura 16 <i>PLS de prueba preliminar</i>	54
Figura 17 <i>Condiciones desfavorables</i>	55
Figura 18 <i>Reactor de acero inoxidable</i>	56
Figura 19 <i>Sistema de transferencia de calor</i>	57
Figura 20 <i>PLS sin pirita y sin cloruro de sodio</i>	59
Figura 21 <i>Muestras de PLS</i>	62
Figura 22 <i>Dilución de muestras de PLS</i>	63
Figura 23 <i>Análisis de cobre por absorción atómica AA</i>	63
Figura 24 <i>Diagrama de Pareto</i>	66
Figura 25 <i>Efectos principales de las variables</i>	67
Figura 26 <i>Gráfica de contorno</i>	68
Figura 27 <i>Superficie de respuesta</i>	68

Figura 28 <i>Correlación recuperación de cobre - ion férrico</i>	71
Figura 29 <i>Análisis de pH</i>	73
Figura 30 <i>Influencia del pH sobre % de recuperación de cobre</i>	73
Figura 31 <i>Análisis ORP</i>	74
Figura 32 <i>Influencia del potencial ORP sobre % rec. de cobre</i>	74
Figura 33 <i>Influencia de pH y ORP en la recuperación de cobre</i>	75
Figura 34 <i>Corrosión en agitador</i>	78

RESUMEN

La investigación se centró en evaluar la eficacia de agregar cloruro de sodio (sal común) y pirita (un mineral de hierro sulfurado) al proceso de extracción de cobre a partir de un concentrado mineral de calcopirita, lixiviación ácida. El objetivo principal era determinar si estas sustancias podían mejorar significativamente la cantidad de cobre recuperado.

Los resultados obtenidos mostraron que tanto el cloruro de sodio como la pirita, individualmente, tienen un efecto positivo en la extracción de cobre. Además, el efecto más notable se observó cuando ambos compuestos se combinaron. Esta sinergia entre el cloruro de sodio y la pirita resultó en un aumento significativo en la recuperación de cobre, en un 28,80 % mientras los resultados obtenidos sin la adición de estos reactivos alcanzaron un valor de 1,35 %; es decir, presentan una diferencia de más de 27 %. Además, el estudio reveló que la relación entre la cantidad de pirita y concentrado, así como la concentración de cloruro de sodio, influye de manera compleja en la eficiencia del proceso. Para comprender mejor esta relación, se desarrolló un modelo matemático que describe cómo estas variables afectan la recuperación de cobre. Este modelo sugiere que la relación no es lineal y que existen condiciones óptimas para maximizar la extracción de cobre. Las gráficas generadas a partir del modelo indican que la recuperación máxima se alcanza con concentraciones intermedias de cloruro de sodio y una proporción específica de pirita en relación con el concentrado. La investigación proporciona evidencia sólida de que la adición de cloruro de sodio y pirita puede mejorar significativamente la eficiencia de la extracción de cobre en procesos hidrometalúrgicos.

ABSTRACT

The research focused on evaluating the effectiveness of adding sodium chloride (common salt) and pyrite (an iron sulfide mineral) to the copper extraction process from a chalcopyrite mineral concentrate through acid leaching. The main objective was to determine whether these substances could significantly improve the amount of copper recovered.

The results showed that both sodium chloride and pyrite, individually, have a positive effect on copper extraction. Moreover, the most notable effect was observed when both compounds were combined. This synergy between sodium chloride and pyrite resulted in a significant increase in recovery by 28,80 %, compared to results without the addition of these reagents, which reached a value of 1,35 %; that is, a difference of more than 27 %. Furthermore, the study revealed that the ratio between the amount of pyrite and concentrate, as well as the concentration of sodium chloride, influences the efficiency of the process in a complex manner. To better understand this relationship, a mathematical model was developed that describes how these variables affect copper recovery. This model suggests that the relationship is not linear and that there are optimal conditions to maximize copper extraction. The graphs generated from the model indicate that maximum recovery is achieved with intermediate concentrations of sodium chloride and a specific proportion of pyrite relative to the concentrate. The research provides strong evidence that adding sodium chloride and pyrite can significantly improve the efficiency of copper extraction in hydrometallurgical processes.

INTRODUCCIÓN

La lixiviación de minerales es un proceso crucial en la extracción de metales valiosos, específicamente en la recuperación de cobre de concentrados que contienen sulfuros, como la calcopirita y la pirita. En este contexto, la adición de reactivos químicos ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar la eficiencia de la disolución de cobre. Entre estos reactivos, el cloruro de sodio (NaCl) ha emergido como un factor significativo que influye directamente en la recuperación del cobre. Este estudio investiga cómo las concentraciones de NaCl afectan la eficacia del proceso de lixiviación, encontrando que dicha concentración tiene un impacto notable en la recuperación, evidenciado por un valor de significancia ($p=0,000$).

Además del cloruro de sodio, la interacción entre la razón de pirita y concentrado también se ha identificado como un elemento significativo en el proceso de extracción. Los resultados indican que esta interacción, observada a través de un p-valor de 0,021, resalta la importancia del balance adecuado de estos materiales para optimizar la recuperación del metal. Los experimentos realizados han demostrado que, con la adición de cloruro de sodio y pirita, se alcanza una recuperación máxima de 28,80 %, lo que representa un incremento notable en comparación con solo el 1,35 % de recuperación observada sin la inclusión de estos elementos.

Este trabajo, por lo tanto, no solo busca entender la dinámica de la lixiviación de cobre en presencia de cloruro de sodio y pirita, sino también establecer una base para la optimización de procesos en la industria minera, contribuyendo a prácticas más eficientes y sostenibles en la recuperación de recursos metálicos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

1.1.1. Antecedentes del problema

Actualmente existen dos métodos principales para la obtención de cobre refinado:

- Pirometalurgia: Comprende los procesos de fundición y refinación para la obtención de cobre catódico a partir del procesamiento de concentrado obtenido previamente.
- Hidrometalurgia: Proceso considerado por su naturaleza como más ambientalmente sostenible para la extracción de cobre a partir de soluciones acuosas de cobre, comprende a la lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención para la obtención de cobre de alta pureza.

Tabla 1

Producción mundial de cobre mediante fundición

país	millones de toneladas	% producción mundial
China	12,0	44,0
Chile	2,0	7,0
Japón	1,5	5,4
Rusia	0,9	3,2
Estados Unidos	0,8	2,9

Nota: Se referencia solo los principales países productores de cobre en el año 2024, adaptado de <https://www.nasdaq.com/articles/top-10-copper-producers-country>, por Nasdaq, 2024.

La fundición representa actualmente el proceso industrial más usado por la mayoría de las empresas a nivel mundial para la obtención de cobre de alta calidad.

1.1.2. Problemática de la investigación

La generación de gases sulfurosos durante el proceso de fundición representa desafíos principalmente ambientales, especialmente en países como China donde la escasa y nula fiscalización de la emisión de estos gases genera contaminación atmosférica impactando en la calidad del aire, suelos y agua.

El alto consumo energético necesario para el desarrollo de este proceso implica el uso de combustibles fósiles para el calentamiento del mineral enriquecido de cobre hasta alcanzar la separación de las impurezas del cobre, este consumo contribuye de manera significativa en el cambio climático, además que representa un factor importante por el costo relacionado.

A pesar de existir tecnologías alternativas a la fundición para la obtención de cobre como es el caso de los procesos hidrometalúrgicos, el menor tiempo de procesamiento a través de la fundición permite procesar mayores cantidades de mineral, los procesos hidrometalúrgicos presentan menores cinéticas de extracción en comparación a los procesos pirometalúrgicos.

El uso de tecnologías que pueden competir con la pirometalurgia de cobre es aún muy incipiente; sin embargo, existen plantas que a través de procesos como la lixiviación química y biolixiviación procesan minerales de cobre principalmente minerales oxidados, la cantidad de mineral procesado es inmensamente inferior en comparación al procesado mediante vía clásica, al respecto Lagos et al. (2020) indican que el método tradicional (concentración y fundición) representa el 80 % de la producción mundial de cobre refinado en tanto que el proceso

hidrometalúrgico alcanza el 20 %, una de las razones que justifica esta diferencia es explicada en el mismo artículo por la tendencia mundial de disminución de yacimientos de óxidos pronosticando que la producción futura de cobre estará basada principalmente en el procesamiento de sulfuros de cobre donde el concentrado de cobre obtenido será tratado mediante fundición y posterior refinación.

1.2. Formulación del problema

La escasa cantidad de estudios relacionados a la lixiviación de concentrados de cobre están direccionados al uso de autoclaves, temperaturas elevadas y alto consumo de ácido sulfúrico, por lo que la demanda de recursos energéticos y de reactivos que involucra lixiviar bajo esas condiciones representa un escollo en el intento de desarrollar tecnologías que permitan procesar de forma alternativa el concentrado de cobre.

Con la finalidad de evaluar la viabilidad de procesar hidrometalúrgicamente concentrados de cobre mediante la generación del par galvánico pirita-calcopirita en un medio ácido clorurado altamente corrosivo que permita procesar alternativamente y obtener cobre disuelto en medio acuoso, se plantea el siguiente cuestionamiento:

¿En qué medida influye la adición conjunta de pirita y cloruro de sodio en la recuperación de cobre durante la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico?

1.3. Justificación e importancia

Las investigaciones desarrolladas sobre la lixiviación de concentrados aún no evidencian la posibilidad de desplazar a la fundición para el procesamiento de cobre, principalmente debido a que las cinéticas de disolución de cobre mediante

lixiviación siguen siendo más bajas con respecto a la fundición, las eficiencias alcanzadas con la lixiviación de concentrados todavía no logran la recuperación total del cobre presente en el concentrado.

La presente investigación está enfocada en desarrollar una alternativa ambientalmente más sostenible y económica que la fundición para la obtención de cobre. Su desarrollo puede mejorar o complementar investigaciones preliminares y/o direccionar futuras investigaciones con los que se intenta crear un impacto significativo en la industria del cobre.

La importancia del estudio contrapesa algunos desafíos involucrados en el procesamiento hidrometalúrgico de los concentrados de cobre como el manejo de soluciones altamente ácidas, principalmente porque mediante la lixiviación de concentrados se mejoraría la sostenibilidad ambiental en la obtención de cobre al disminuir de manera significativa la cantidad de combustible fósil utilizado así como la eliminación de gases sulfurados generados en la fundición, la menor dependencia de combustible coloca a la lixiviación de concentrados como una alternativa más económica.

Finalmente, el presente trabajo pretende aportar a la industria minera del procesamiento de cobre en el desarrollo y mejoramiento de la lixiviación de concentrados, evaluando la adición de pirita y cloruro de sodio para mejorar la cinética de disolución del cobre, desde una perspectiva de ingeniería química, aplicando principios de cinética y diseño de procesos para optimizar las condiciones y escalabilidad del proceso hidrometalúrgico.

1.4. Alcances y limitaciones

El estudio se limitó al desarrollo de pruebas a nivel de laboratorio sin escalamiento a procesos industriales. Se concentrará únicamente en el análisis de la disolución de cobre y hierro.

La presente investigación, como toda investigación de corte cuantitativo que se basa en la experimentación para la obtención de resultados, tiene como finalidad el estudio y evaluación de los aspectos relacionados con el proceso de lixiviación de concentrados usando una mezcla de piritita y cloruro de sodio. Se desarrolló un modelo matemático que permite describir el mecanismo de disolución de cobre con la adición de los elementos mencionados, para la conformación y desarrollo de este modelo fue necesario la utilización de técnicas estadísticas para el análisis de los datos obtenidos.

Asimismo, la presente investigación tuvo como limitantes a los siguientes aspectos:

- **Infraestructura y equipos:** Se utilizó y adecuó el desarrollo de las evaluaciones al equipamiento existente en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la universidad nacional Jorge Basadre.
- **Permisos y normativas:** Se gestionó los permisos respectivos de las autoridades pertinentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Química de la universidad nacional Jorge Basadre para el uso de reactivos considerados IQBF como es el caso del ácido sulfúrico.
- **Riesgos a la salud:** El proceso de lixiviación de concentrados involucra riesgos que pueden tener consecuencias sobre la salud de

las personas involucradas en el desarrollo de las pruebas, en ese sentido se tomó las medidas de seguridad adecuadas como el uso adecuado de EPP's para la manipulación de reactivos químicos y material de vidrio adecuado.

- Si bien se mencionó mantener como variable fija el nivel de agitación en 1200 RPM, según lo reportado por Dixon et al. (2012), la velocidad angular utilizado en las 11 pruebas y la prueba adicional sin la adición de pirita y NaCl fue de 300 RPM debido al estado operativo del agitador cedido para las evaluaciones.
- Asimismo, el tiempo de lixiviación desarrollado en todas las evaluaciones fue de solo 6 horas, esto por disposición del responsable del laboratorio debido a que no se puede dejar equipos energizados sin supervisión.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

- Determinar si existe una relación significativa en la adición de pirita y cloruro de sodio para la recuperación de cobre mediante la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de la pirita en la recuperación de cobre a partir de la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.
- Determinar el efecto del cloruro de sodio en la recuperación de cobre a partir de la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.

1.6. Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

- Existe una relación significativa positiva en la adición de pirita y cloruro de sodio para la recuperación de cobre mediante la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.

1.6.2. Hipótesis específicas

- La adición de pirita tendrá un efecto sinérgico positivo en la recuperación de cobre en la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.
- La adición de cloruro de sodio tendrá un efecto sinérgico positivo en la recuperación de cobre en la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El trabajo desarrollado por Dixon et al. (2012) en la University of British Columbia, Vancouver, Canadá, presenta una tecnología innovadora en la lixiviación de concentrados de cobre primario (calcopirítico), la investigación es del tipo aplicativo debido a que intenta crear y probar una nueva tecnología para la recuperación de cobre mediante el proceso denominado Galvanox, para ello realizan numerosos experimentos con el objetivo de maximizar las recuperaciones, el proceso mencionado se fundamenta en el aprovechamiento del par galvánico formado entre la pirita adicionada y la calcopirita presente en el mineral concentrado (se evalúa relaciones de 2 a 4 veces la cantidad de pirita sobre calcopirita), este par galvánico formado facilita la oxidación relativamente rápida de la calcopirita mediante la lixiviación atmosférica a 80 °C diferenciándolo de esta forma de procesos en autoclaves a alta presión por lo que la demanda de energía es sustancialmente menor, esta nueva manera de lixiviar concentrados prescinde de biooxidación al ser un proceso estrictamente químico, la velocidad de agitación utilizada es de 1200 rpm, en cuanto al consumo de ácido se utilizó un rango de exploración entre 45 a 90 gramos de ácido por cada 50 gramos de concentrado.

En cuanto a los porcentajes de extracción, mediante las condiciones de operación antes mencionadas se alcanzó tasas de recuperación superiores a 90 % en 24 horas, una característica sobresaliente de este método es la alta compatibilidad del licor de cobre obtenido conocido como PLS (pregnant leach solution) con los procesos de extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW) principalmente porque no requiere la adición de ningún tipo de aditivo especializado para promover la oxidación de la calcopirita.

La investigación presentada en el artículo científico por Herreros et al. (2005) detalla la evaluación mediante lixiviación ácida por agitación en medio clorurante de dos tipos de concentrados de cobre de operaciones chilenas que tienen la particularidad de poseer un alto contenido de cobre soluble en ácido siendo estos valores de 10,2 % y 10,3 % de un total de 26,9 % y 26,8 % de cobre total respectivamente. Las condiciones de evaluación fueron la adición de cloruro entre 10 y 25 g/l a la pulpa de lixiviación, concentración de cobre soluble aportado por los mismos concentrados, motivo por el cual se decidió variar el porcentaje de sólidos de 10 a 30 % que proporcionara la diferencia de cobre disponible, el efecto de la temperatura fue medido variando desde 20 a 85 °C.

Se obtuvo concentraciones de cobre entre 15 y 30 g/l con 2 a 5 g/l de ácido libre y 10 a 12 g/l de cloruro, se hace especial mención a estos valores debido a que son rangos en los que es posible tratar el PLS obtenido mediante el proceso de concentración y purificación por solventes (SX), sin embargo los análisis realizados con difracción de rayos x (XRD) y SEM (microscopio de barrido electrónico) muestran que las disoluciones obtenidas son principalmente por la disolución de las especies brochantita, atacamita, roxbyita y djurleita, especies que poseen altas tasas

de disolución en medio ácido, caso contrario presentan las especies de calcopirita y covelita donde el ataque fue nulo y parcial, respectivamente.

Se determinó el efecto positivo del cloruro en la lixiviación, asimismo la relación $\text{CuCl}^+/\text{C}_{\text{Cu}}$ incrementa el grado de ataque del cobre presente en los sulfuros, finalmente la temperatura favorece la formación del complejo lixivante CuCl^+ .

El trabajo de tesis desarrollado por Machaca (2018) en la Universidad Nacional de San Agustín tiene como objetivo la recuperación de cobre presente en un concentrado proveniente de la minera Tintaya con el uso de agentes oxidantes fuertes como el cloruro férrico FeCl_3 , el cloruro de sodio NaCl y nitrato de sodio NaNO_3 . El diseño de investigación está sustentado en el desarrollo de experimentos mediante un diseño experimental factorial 2^3 con tres puntos centrales haciendo un total de 11 pruebas donde se evaluaron el efecto de las concentraciones en g/l de las variables FeCl_3 , NaCl y NaNO_3 bajo los siguientes niveles, respectivamente 100 a 170; 200 a 295; 40 a 90. Las condiciones de operación fueron: pH de lixiviación = 1,0; porcentajes de sólidos = 20 %, tiempo de lixiviación = 8 horas.

Los resultados demostraron que las combinaciones con los niveles altos de cloruro férrico y cloruro de sodio conjuntamente con cualquiera de los niveles de nitrato de sodio (según el experimento, número de combinaciones 4 y 8) alcanzaron recuperaciones más altas, siendo estas 72,21 % y 71,31 %, respectivamente de acuerdo con los valores de significancia dados en el ANOVA mostrado se determina que todas las variables tienen significancia para la disolución de cobre, de esta forma se da cumplimiento al objetivo al demostrar que es posible la recuperación de cobre mediante el uso de estos agentes oxidantes. Se obtuvo el siguiente modelo matemático, donde $x = \text{FeCl}_3$; $y = \text{NaCl}$:

$$\% \text{ REC} = 68.146 + 1.308x + 1.563y + 0.741xy - 0.253x^2 - 0.398y^2 + 0.163xy$$

En base a los resultados obtenidos del diseño experimental, se aplicó la técnica de análisis de superficie a fin de optimizar la recuperación de cobre, los valores de los reactivos obtenidos son: el $\text{FeCl}_3 = 170 \text{ g/l}$; $\text{NaCl} = 293,75 \text{ g/l}$; $\text{NaNO}_3 = 40 \text{ g/l}$.

Mamani (2018) desarrolló el trabajo de tesis en la universidad nacional Jorge Basadre Grohmann, la problemática planteada gira en torno de la necesidad de crear un proceso alternativo a los convencionales para la lixiviación de cobre principalmente por el agotamiento de especies de fácil lixiviación como los minerales oxidados de cobre y sulfuros secundarios, frente a ello propone el uso de lixiviación a presión de concentrados mediante el uso de un reactor autoclave para alcanzar concentraciones de sulfato de cobre superiores a 30 g/l a fin de que el producto de esta lixiviación pueda ser usado directamente en electro-obtención por el alto contenido de cobre.

La tesis desarrollada tiene características de investigación exploratoria experimental por la complejidad asociada al desarrollo del proceso y a la poca cantidad de trabajos de referencia, se utilizó el planteamiento de un diseño exploratorio manteniendo como variables constantes el porcentaje de sólidos, concentración de ácido sulfúrico, presión de trabajo, granulometría del concentrado, tiempo de operación siendo 15% , 45 g/l , 1034 Kpa , 80 micras , 60 minutos los valores respectivos mientras que la variable temperatura fue evaluada en un rango de 90°C a 150°C en seis evaluaciones.

De la evaluación realizada se logra obtener una extracción máxima de 50 % alcanzando una concentración de cobre de 22,12 g/l en la solución lixiviada con una temperatura de trabajo de 90°C; se hace referencia a la limitación de haber trabajado con una granulometría de 80 micras siendo el ideal menor a 30 micras según refiere el autor en base a los resultados en una planta en Zambia donde se aplica este proceso de manera industrial.

Por otro lado, actualmente, existen investigaciones sobre la aplicación de lixiviación de pulpas de cobre a presión. El autor menciona que se propuso realizar una evaluación de la influencia de la cinética de lixiviación a presión en las pulpas de minerales de cobre a temperatura ambiente. Para lograr esto, se realizaron cuatro pruebas en duplicado a diferentes tiempos a presión constante de 45 psi como pretratamiento para continuar con la lixiviación agitada. Los resultados experimentales destacan que el tiempo de humectación de grietas es de 20 minutos, proporcionado por los valores de la constante cinética y la recuperación infinita del modelo de Klimpel y primer orden, proporciona la mejor condición. Los resultados mostraron una producción de 1,6 toneladas de cobre fino por equipo al año (Hu. Lagos, 2017).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Fundamentos de la lixiviación

En la industria metalúrgica extractiva se define como lixiviación al proceso que permite la recuperación de especies útiles a partir de menas (óxidos, carbonatos, sulfuros, silicatos) permitiendo convertir los metales presentes en los minerales en sales solubles en un medio acuoso.

CODELCO (2018) define en términos operativos a la lixiviación como el proceso mediante el cual se recupera los metales presentes en el mineral mediante la aplicación de la mezcla agua y ácido.

La lixiviación es un proceso químico usada en la minería para la extracción de minerales valiosos contenido en una matriz sólida para ello es necesario que el solvente líquido entre en contacto con esta matriz, después de ocurrida la lixiviación, la concentración del mineral inicial disminuye (Uzun et al., 2016).

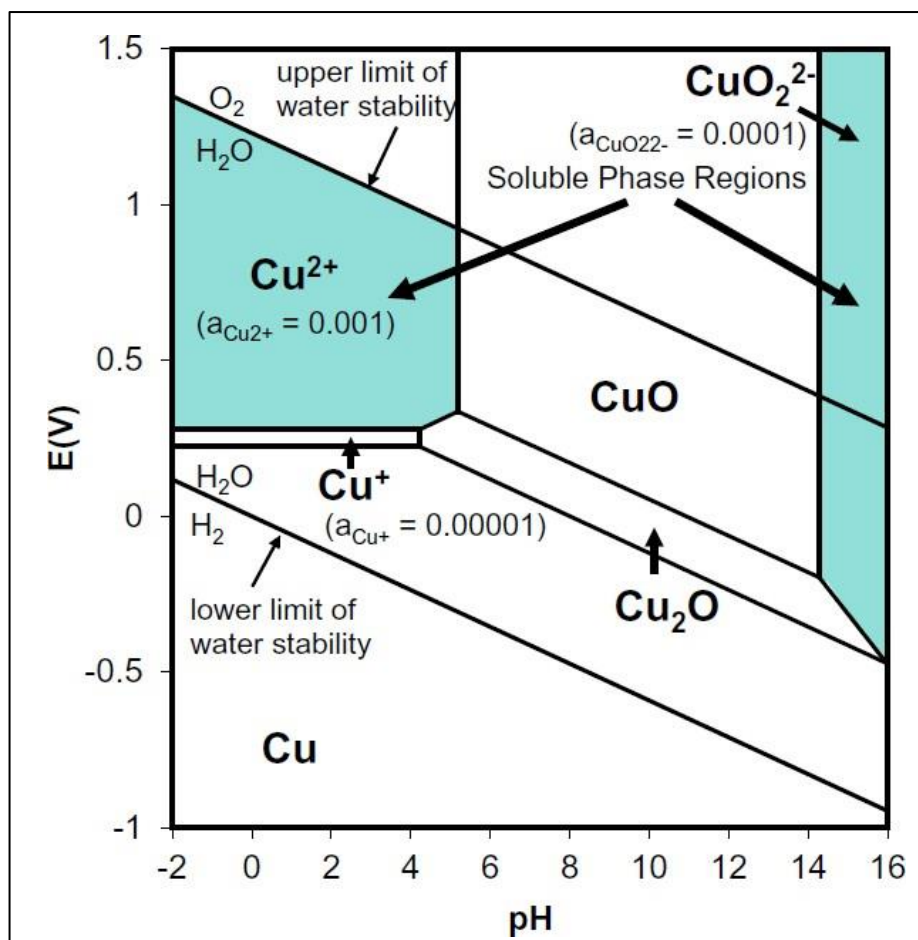
La ocurrencia de lixiviación es posible bajo ciertas condiciones de pH y potencial electroquímico, estas condiciones son determinadas mediante el uso e interpretación de diagramas termodinámicos, para el caso específico de la disolución de las especies de cobre es favorable condiciones de pH bajos y potenciales altos, así como pH altos con potenciales relativamente altos, esto de acuerdo con la interpretación de la Figura 1, donde se aprecia que es posible la disolución del cobre cuando el potencial de oxidación permanece debajo y sobre las líneas de descomposición del agua, respectivamente. Por lo tanto, el rango de operación para la disolución de cobre es muy estrecho (Free, 2022).

En lo que respecta a la hidrometalurgia, la lixiviación de cobre, a partir de calcopirita, se estudió ampliamente en la década de 1970 y se ha demostrado que los procesos propuestos son técnicamente factibles, aunque no económicamente viables (Cháidez et al., 2019). Actualmente, tanto el aumento de los precios de los metales básicos como las regulaciones ambientales más estrictas han llevado a un renovado interés en la hidrometalurgia del cobre. Como resultado, se han propuesto y puesto a prueba una serie de nuevos e innovadores procesos hidrometalúrgicos del cobre. Estos procesos han sido ampliamente analizados (Cháidez et al., 2019) y

pueden agruparse de la siguiente manera: (i) procesos con sulfato; (ii) procesos con sulfato/cloruro; (iii) procesos con cloruro (y bromuro).

Figura 1

Diagrama de fases simplificado de disolución de cobre



Nota. Las regiones en verde indican la ocurrencia de cobre en estado iónico. Adaptada de “Hydrometallurgy”, por Free, 2022

2.2.2. Operaciones industriales para lixiviación

Para la lixiviación del cobre, se siguen las siguientes actividades:

- (a) Construcción de pilas: el mineral aglomerado se acomoda en pilas para ser regados con una solución, con superficie y altura preestablecidas y con pendiente de inclinación lateral y sentido longitudinal.

- (b) Selección de agentes lixiviantes: se refiere a la selección de agentes lixiviantes que se utiliza para disolver el metal de interés, el éxito del proceso de lixiviación depende de la elección del agente lixiviante adecuado. Los agentes lixiviantes más ordinarios son ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, entre otros.
- (c) Riego de soluciones: es la fase en la que el metal de interés se disuelve mediante la aplicación de una solución lixiviante al mineral. La solución está compuesto por un agente químico reacciona con el metal, lo que lo hace soluble. El riego puede darse por goteo y aspersión.
- (d) Recolección de soluciones: es la fase en la que la solución lixiviante que ha pasado por el mineral se recupera. El metal de interés disuelto se debe extraer de esta solución para su posterior procesamiento.
- (e) Extracción por solventes (SX): la extracción por solventes (SX), también conocida como intercambio iónico líquido, es un tipo de separación que extrae y/o concentra metales valiosos de soluciones acuosas. Los iones metálicos pasan de la fase acuosa a una fase orgánica con un extractante en este proceso.
- (f) Pérdidas del extractante: el proceso de extracción implica pérdidas del extractante. Un líquido conocido como extractante se utiliza para disolver el soluto de interés de una mezcla.

2.2.3. Tipos de lixiviación

- **Lixiviación ácida**

La lixiviación ácida es un método ampliamente utilizado para extraer cobre de diversas fuentes, incluidos minerales, materiales de desecho y residuos

industriales. Es un proceso hidrometalúrgico utilizado para extraer los metales disolviéndolos en una solución ácida y se usa comúnmente en minerales de baja ley, presentando las siguientes características generales:

Descripción del proceso:

- (a) Trituración y apilamiento: El mineral se tritura primero y luego se apila en una plataforma impermeable.
- (b) Aplicación de lixiviación: Un lixiviado, como el ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4), se rocía sobre el mineral.
- (c) Reacción química: El ácido reacciona con el mineral, disolviendo los metales deseados en una solución conocida como solución rica.
- (d) Eficiencia de lixiviación: Los niveles de pH. Los niveles óptimos de pH pueden mejorar significativamente las tasas de recuperación de metales. Por otro lado, la composición del mineral debido a que la presencia de minerales de ganga como CaO y SiO_2 puede interferir con el proceso de lixiviación. Además, parámetros como la temperatura y tasa de riego también influyen en la eficiencia de la lixiviación. La eficiencia de la lixiviación de cobre puede verse influenciada además por factores, como la concentración de ácido, la temperatura, el tiempo de lixiviación y la relación sólido-líquido; por ejemplo, en la investigación sobre la obtención de cobre a partir de alambres finos de desecho utilizaron ácido sulfúrico a una concentración de 2,7 mol/L, una temperatura de 85 °C y una relación líquido-sólido de 5:1, se logró una eficiencia de lixiviación del 97,65 % para el cobre mientras el empleo de ácido nítrico a 3,5 mol/L

con peróxido de hidrógeno como oxidante dio lugar a una tasa de lixiviación del 73,1 % (Wang et al., 2017).

- (e) Técnicas híbridas y mejoradas: La combinación de la lixiviación ácida con otros métodos podrían mejorar las tasas de recuperación. En una investigación sobre procesos híbridos que involucra lixiviación ácida seguida de flotación aumentó la recuperación de cobre en un 3,5 % en aplicaciones industriales y la lixiviación con ácido oxidativo mediante carbón activado logró una tasa de lixiviación del 99 % para el cobre de la escoria (Luszczkiewicz et al., 2012).

Técnicas de lixiviación ácida:

- (a) Lixiviación ácida a presión: Utiliza altas temperaturas y presiones para mejorar la tasa de lixiviación. Por ejemplo, en el estudio de la lixiviación ácida a presión de la calcopirita empleando un electrodo de disco giratorio, en un autoclave dual a 150 °C, con una solución de hierro (III) de 0,1 M, da como resultado una lixiviación rápida, mientras que el uso de una presión parcial de oxígeno de 120 psi conduce a una lixiviación más lenta (Lázaro & Jeffrey, 2006).
- (b) Lixiviación con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno: El comportamiento de lixiviación del ácido sulfúrico de la calcopirita en presencia de peróxido de hidrógeno aumenta la disolución del cobre mediante técnicas electroquímicas. Por ejemplo, en el estudio de la lixiviación ácida mostró que el aumento de la concentración de peróxido de hidrógeno hasta 3M a una temperatura de 25 °C acelera significativamente la disolución del cobre y el hierro de la calcopirita.

Este método reduce el tamaño de las partículas y aumenta la porosidad, lo que ayuda a una mayor disolución (Olubambi & Potgieter, 2009).

(c) Lixiviación ácida atmosférica: La lixiviación directa a presión atmosférica a menudo resulta en bajas recuperaciones de cobre debido a la formación de una capa de pasivación. El precalentamiento de la calcopirita a 500 °C transforma los sulfuros en sulfatos, logrando una extracción de cobre de hasta el 99,82 % (Uzun et al., 2016).

- **Lixiviación in-situ**

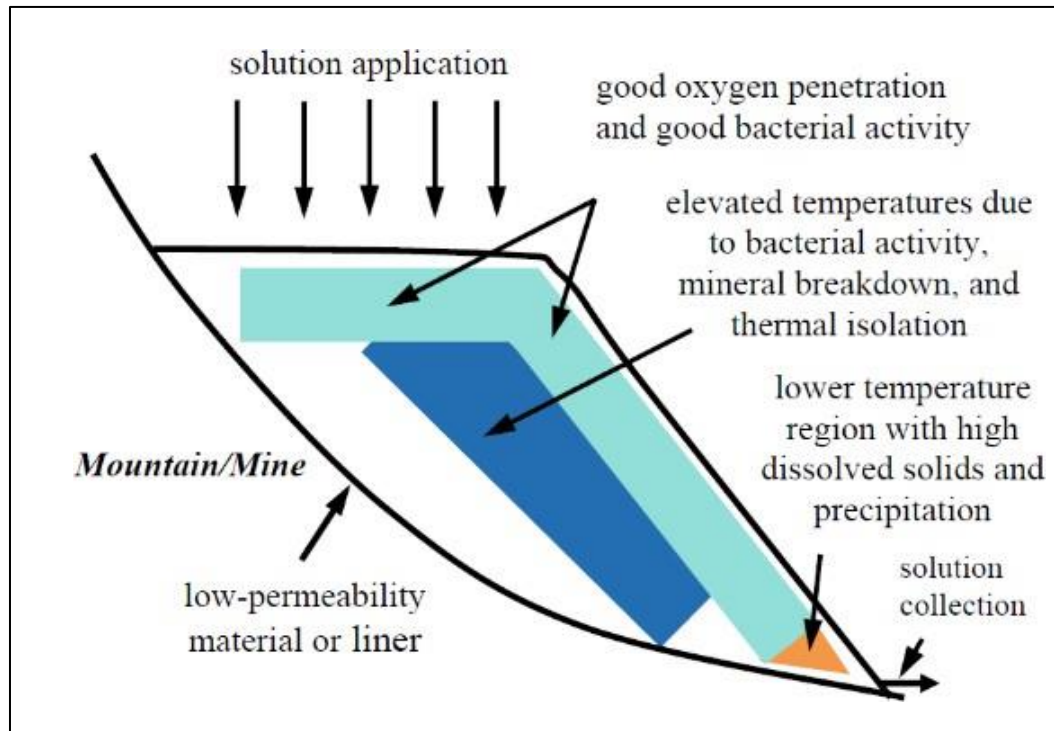
Se aplica la oxidación del mineral sin remover el material, para que la solución lixivante entre en contacto con el elemento valioso es necesario que el mineral tenga cierto grado de porosidad la cual puede ser parte de las características del mineral o puede ser inducido a través del uso de explosivos, para que este proceso sea viable tiene que existir condiciones favorables de formaciones geológicas y niveles freáticos para asegurar la operación, está es la razón por la que este método no es industrialmente utilizado, se aplica generalmente a proyectos a baja escala, comúnmente utilizado en la extracción de sal soluble (Free, 2022).

- **Lixiviación en botaderos**

Este tipo de lixiviación es ideal para procesar mineral con bajas leyes, lo que significa que no es necesario una reducción significativa del tamaño de mineral, generalmente se procesa mineral RUN (run-of-mine) que es arrojado y aplicado sobre un terreno el cual fue impermeabilizado previamente formando cientos de metros sobre el cual se instala líneas de riego de la solución lixivante.

Figura 2

Esquema típico de lixiviación en botadero



Nota. Adaptada de “*Hydrometallurgy*”, por Free, 2022.

En algunas operaciones especialmente en donde se procesa minerales de cobre que contienen sulfuros como la pirita, la lixiviación es asistida por la actividad bacteriana presente en el lecho del mineral (Free, 2022).

- **Lixiviación en pilas**

Duque (2014) menciona que después de la conminución de los minerales a través del chancado y molienda, pasan por el proceso de lixiviación en pilas que se basa en la percolación de una solución lixivante de minerales apilados en una pendiente. Esta solución disuelve los metales presentes en los minerales. La solución rica obtenida es recolectada en la base de las pilas y se transporta a una planta para su recuperación del metal de interés.

Figura 3

Tipos de pilas de lixiviación



Nota. Adaptada de “*Lixiviación de Minerales Sulfurados de Cobre de Baja Ley en Columnas Unitarias Utilizando la Tecnología Cuprochlor*”, por Duque, 2014, Universidad de Chile.

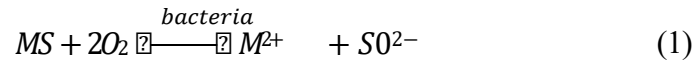
Por lo general, se riega a razón de 5 a 40 l/h/m², en los minerales sulfurados, empleando un riego intermitente para poder lograr una concentración más alta de cobre y para una menor cantidad de solución en el riego. Por el modo de operación se clasifica en dos tipos de pilas: (a) dinámicas se caracteriza por emplear materiales que se encuentran en distintas etapas de tratamiento. (b) estáticas: los minerales son sometidos a diferentes etapas en forma simultánea (curado, lixiviación, reposo y lavado).

- **Bioliixiviación**

El proceso de bioliixiviación se refiere a la catalización, por parte de microorganismos, de soluciones de minerales sulfurados para obtener el metal de interés. Se emplean dos procesos de disolución de mineral: (a) mecanismo de contacto y (b) mecanismo indirecto (Bravo, 2016).

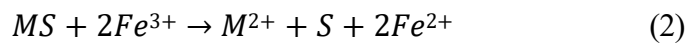
- (a) Mecanismo de contacto: el mineral a tratar es oxidado por la acción de la adherencia bacteriana al sulfuro metálico empleando sustancias poliméricas extracelulares (EPS) y forman un biofilm. Los sulfuros son

oxidados a sulfatos y cationes metálicos. Este mecanismo utiliza la siguiente reacción:

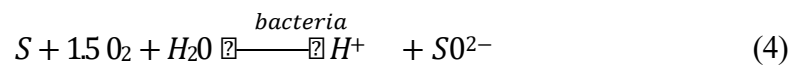
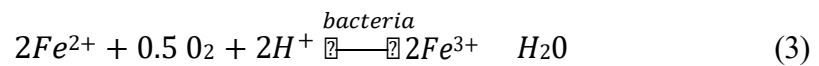


4

(b) Mecanismo de contacto: este mecanismo utiliza básicamente la acción oxidante de iones férricos sobre minerales sulfurados utilizando la siguiente reacción química:



Paralelamente se realiza dos reacciones por la acción bacteriana que cataliza la oxidación del ion ferroso y azufre elemental.



4

2.2.4. Descripción de la calcopirita (CuFeS₂)

Toro et al. (2020) refiere que la calcopirita (CuFeS₂) es un mineral formado por sulfuros de cobre-hierro brindándole características cristalinas ternarias lo que lo convierte en un buen semiconductor ampliamente abundante con importantes aplicaciones y propiedades. Además, la calcopirita representa la mayor producción mundial de concentrados de cobre y la pirometalurgia es la principal vía para producir cobre a partir de estas concentraciones. Por el contrario, el mineral es en su mayoría refractario a los procesos hidrometalúrgicos ordinarios debido a su alta estabilidad química en sistemas acuosos.

- **Aplicaciones industriales de la calcopirita:**

- (a) La calcopirita es el principal mineral de cobre en varios tipos diferentes de depósitos de mineral, los más importantes de los cuales son los depósitos de pórfido.
- (b) La calcopirita es un recurso con la mayor cantidad de contenido de cobre, representando alrededor del 70-80 % de las reservas conocidas en el mundo.
- (c) La calcopirita se utiliza en la producción de cobre, que es un componente metálico en prácticamente todos los equipos eléctricos.

- **Impactos ambientales de la minería de calcopirita:**

- (a) La calcopirita es inestable en la superficie, por lo que se desgasta a partir de afloramientos de sulfuro y pilas de desechos mineros, aportando ácido y cobre disuelto a lo que se conoce como drenaje ácido de rocas.
- (b) Las actividades de explotación de calcopirita se han asociado con problemas ambientales dado las características fisicoquímicas de sus lixiviados, lo que ha provocado la degradación de suelos y aguas.

2.2.5. Descripción de la pirita

La pirita es un sulfuro de hierro (FeS_2), es el mineral de sulfuro más abundante que se encuentra en la naturaleza. Comúnmente se le conoce como "oro de los tontos" debido a su brillo metálico y su tono amarillo latón pálido, que puede parecerse al oro. La pirita se encuentra en varios entornos geológicos, incluidos depósitos minerales metálicos, rocas sedimentarias, rocas metamórficas y rocas magmáticas. Puede formarse a través de procesos detríticos y autógenos, a menudo se encuentra en conglomerados de guijarros de cuarzo auríferos y otras unidades

sedimentarias. La pirita tiene un sistema cristalino cúbico y es conocida por sus formas cristalinas euédricas. Además, los estudios han detallado sus propiedades termodinámicas bajo alta presión y temperatura, que son cruciales para comprender los procesos geológicos (Arrouvel & Eon, 2018).

Aplicaciones Industriales

- (a) Catalizador: La pirita se utiliza como catalizador en los procesos de biolixiviación y biooxidación para mejorar la disolución de otros minerales.
- (b) Tratamiento de aguas residuales: Ayuda en la precipitación, adsorción y degradación de contaminantes.
- (c) Electrónica: La pirita se utiliza en la fabricación de electrodos para detectores, supercondensadores, células solares y baterías.
- (d) Flotación y separación: El comportamiento de flotación de la pirita varía con el pH y la presencia de activadores como los iones de cobre, que pueden mejorar su flotabilidad en condiciones neutras y básicas y su eficiencia en la separación de minerales está influenciada por su textura, variedades estructurales y la presencia de aditivos (Ignatkina et al., 2017).

2.2.6. Cloruro de sodio en procesos de lixiviación

El cloruro de sodio (NaCl) desempeña un papel importante en varios procesos de lixiviación, mejorando la eficiencia de extracción de metales de diferentes minerales y residuos dado que el cloruro de sodio actúa como agente complejante, tensioactivo y reactivo que aumenta el área superficial y la porosidad

de las capas de productos insolubles, mejorando así la cinética de lixiviación (Senanayake, 2007). Entre sus aplicaciones se encuentran:

- (a) Lixiviación de calcopirita: El cloruro de sodio mejora la extracción de cobre de la calcopirita al reducir la pasivación mineral y aumentar el área superficial y la porosidad de los productos de reacción. Esto da como resultado mayores extracciones de cobre, hasta un 91 % en comparación con el 45 % sin NaCl (Carneiro & Leão, 2007).
- (b) Lixiviación de plomo y plata: En la lixiviación de plata y plomo de residuos de zinc, el aumento de la concentración de NaCl mejora las tasas de disolución de ambos metales. El proceso sigue un modelo de núcleo de contracción con interdifusión a través de la capa de ganga como paso determinante (Y. Zhang et al., 2012).
- (c) Coextracción de galena y pirolusita: El NaCl afecta significativamente la tasa de lixiviación del plomo de la galena al reducir la resistencia de la película en la superficie mineral, promoviendo así una oxidación más profunda y tasas de reacción más rápidas (Long et al., 2010).

2.2.7. pH

(Otterson, 2015) explica que el pH es una medida de la concentración de iones de hidrógeno en una solución a base de agua, que indica la acidez o alcalinidad de la solución. El término pH significa "pondus hydrogenii" en latín. El pH se define como el logaritmo negativo a la base 10 de la concentración de iones de hidrógeno ($[H^+]$) en una solución. Matemáticamente, $pH = -\log[H^+]$ (5)

- (a) Escala: La escala de pH va de 0 a 14:

- **Ácido:** los valores de pH inferiores a 7 indican acidez.

- **Neutro:** Un pH de 7 es neutro.

- **Alcalina:** los valores de pH superiores a 7 indican alcalinidad.

(b) Medición: El pH se mide normalmente utilizando una sonda con dos electrodos, a menudo combinados en una sola sonda de inserción. Este método es ampliamente utilizado en diversas industrias, incluido el tratamiento de aguas y la neutralización de efluentes.

(c) Interrelación con la acidez y la alcalinidad: Mientras que el pH es un factor de intensidad, la acidez y la alcalinidad son factores de capacidad, que representan la capacidad de una solución para neutralizar bases o ácidos, respectivamente.

(d) Aplicaciones: La medición del pH es crucial en muchos campos, como el control de la calidad, entre otros.

2.2.8. Concentración por flotación

A través de este proceso se separan los minerales valiosos del material estéril (ganga). Se utiliza para separar minerales sulfurados de cobre como calcopirita, bornita, entre otros, de la ganga. El proceso comienza moliendo el mineral hasta que se forman partículas finas. Luego, el pH de la pulpa (mezcla de mineral molido y agua) se ajusta y se agregan reactivos químicos: colectores para hacer que los minerales sulfurados sean hidrofóbicos (repelentes al agua) y espumantes para producir burbujas de aire. Las burbujas de aire se adhieren a las partículas minerales hidrofóbicas en la celda de flotación y ascienden a la superficie mientras que la ganga se hunde. El rebose separa la espuma con partículas minerales (concentrado) de la pulpa (relave). En última instancia, el concentrado se espesa y filtra para producir un producto final con alta ley de cobre (Huaracha, 2021).

2.2.9. Aplicaciones de la lixiviación en la industria minera

La lixiviación es un proceso hidrometalúrgico empleado en la industria minera para extraer metales valiosos de los minerales. Esto se obtiene a partir de la aplicación de disolventes como agua o ácidos inorgánicos como el ácido sulfúrico, ácido clorhídrico. La lixiviación es un proceso fisicoquímico que permite recuperar altos porcentajes del mineral objetivo; sin embargo, presenta desventaja como el requerimiento de grandes cantidades de agua y la generación de residuos contaminantes. Entre sus aplicaciones más importantes tenemos que permiten extraer:

- (a) Metales preciosos: oro, plata, paladio
- (b) Metales básicos: cobre, zinc, molibdeno

2.2.10. Agentes lixiviantes

- (a) Ácido sulfúrico (H_2SO_4): es uno de los lixiviantes más empleados en la producción minera debido a su bajo costo, la gran disposición en los mercados para adquirir este compuesto. Además, disuelve una gran cantidad de minerales que poseen cobre, níquel y molibdeno, se puede emplear en distintos tipos de lixiviación como: pilas, in situ, tanques, entre otros.
- (b) Ácido clorhídrico (HCl): aunque menos utilizado que el ácido sulfúrico, es un agente lixivante importante en la industria minera. Se utiliza principalmente para extraer metales preciosos, óxidos metálicos y algunos metales básicos. Aunque es efectivo, versátil y fácil de manejar, también es más costoso, corrosivo y produce desechos potencialmente contaminantes.

2.2.11. PLS (Pregnant Leaching Solution)

El término **PLS** hace una referencia a una solución líquida que resulta del proceso de lixiviación, donde los metales valiosos se disuelven de sus minerales utilizando soluciones químicas. El PLS se caracteriza típicamente por un pH bajo y altas concentraciones de metales como hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni) y cobalto (Co) (Hedrich et al., 2017).

Los PLS se pueden generar a partir de varios métodos de lixiviación, incluida la biolixiviación y la lixiviación en pilas. Por ejemplo, la biolixiviación del concentrado de cobre de Kupferschiefer da como resultado un PLS rico en Fe, Cu, Zn, Ni y Co. En la lixiviación en pilas, la solución de lixiviación ácida se filtra a través de la pila de mineral, disolviendo metales, y se recoge como PLS (Hedrich et al., 2018).

2.2.12. Concentración de metales

Los metales que tienen valor comercial contenidos PLS generalmente se concentran a través de procesos hidrometalúrgicos como la **extracción con solventes/electroobtención (SX / EW)**, que se usa comúnmente para el cobre y otros metales base. Los métodos de precipitación selectiva también se emplean para eliminar impurezas como el hierro, que se puede precipitar utilizando técnicas como la precipitación de jarosita, goethita o para-goethita (Hedrich et al., 2018).

2.2.13. Reactores y equipos para lixiviación de concentrados

Para la extracción de los metales objetivos, se emplean diversos reactores y equipos los cuales se enumeran:

- (a) Tanques agitadores: son recipientes cilíndricos con un impulsor, también conocido como agitador, que gira a alta velocidad, generando turbulencia en la solución lixiviante. Esta turbulencia mejora la tasa de extracción del metal al aumentar el contacto entre el mineral y el disolvente.
- (b) Columnas de percolación: es utilizado para la lixiviación de minerales son las columnas de percolación. Son recipientes de forma cilíndrica y alta que contienen el mineral a lixiviar. El disolvente se introduce en la parte superior de la columna y percola el mineral, extrayendo el metal.
- (c) Agitadores: las máquinas agitadoras se utilizan para mezclar dos o más materiales. Se pueden encontrar en una amplia gama de campos, como la química, la farmacéutica, la alimentación y la minería.

2.2.14. Capa de pasivación en lixiviación

H. Zhang et al. (2023) refiere que la capa de pasivación es un factor importante que dificulta el proceso de lixiviación de varios minerales, incluidos la calcopirita y la rodocrosita. Esta capa se forma en la superficie del mineral, evitando una mayor disolución y reduciendo la eficiencia de la lixiviación. En lixiviación de la calcopirita presenta las siguientes características:

- (a) Formación: La capa de pasivación en la lixiviación de calcopirita a menudo consta de compuestos de jarosita y azufre, que impiden el proceso de disolución.
- (b) Mitigación: La adición de polivinil pirrolidona (PVP) puede prevenir la formación de la capa de pasivación al inhibir la acumulación de iones de sulfato, mejorando así la eficiencia de la lixiviación. Del mismo

modo, la adición de perlas de vidrio puede debilitar el efecto de pasivación al alterar las condiciones de lixiviación.

- (c) Enfoques alternativos: El uso de pirita (FeS_2) en la solución de lixiviación puede mantener valores de potencial redox más altos, reduciendo la formación de capas de pasivación y mejorando la recuperación de cobre.

2.2.15. Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS)

Un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) es un instrumento analítico ampliamente utilizado para detectar y cuantificar metales traza en diversos componentes. Funciona según el principio de que los átomos gaseosos libres absorben la radiación electromagnética a longitudes de onda específicas, produciendo una señal medible proporcional a la concentración de los átomos en la muestra. AAS se utiliza en varios campos, como el monitoreo ambiental, el análisis farmacéutico y de alimentos, la química clínica y la ciencia forense debido a su alta sensibilidad, precisión y simplicidad (Jaiswal et al., 2010).

- **Componentes:**

- (a) Fuente de luz: Por lo general, una lámpara de cátodo hueco (HCL) que emite longitudes de onda específicas de luz absorbida.
- (b) Célula atómica: Convierte las muestras en átomos gaseosos. Las celdas atómicas comunes incluyen llamas y atomizadores electrotérmicos (ETA).
- (c) Sistema de detección: Aísla y cuantifica las longitudes de onda de interés.
- (d) Sistema informático: Controla el instrumento y procesa los datos.

Figura 4

Espectrofotómetro de absorción atómica (AAS)



Nota. Espectrómetro Absorción Atómica contraAA 800 G, Tomado de [Espectrómetro Absorción Atómica contraAA 800 G](#), por Inycom, 2024.

2.2.16. Diseño factorial

El diseño factorial es un enfoque experimental utilizado para investigar los efectos de dos o más variables independientes (factores) y sus interacciones sobre una variable dependiente. Este diseño es particularmente común en la investigación química, minera, clínica, industrial y agrícola (Ranjan & Spencer, 2013).

- **Características principales**

- (a) Múltiples factores: Los diseños factoriales involucran más de una variable independiente, lo que permite a los investigadores estudiar los principales efectos e interacciones entre factores simultáneamente.
- (b) Eficacia: Este diseño es eficiente en términos de tamaño de muestra y potencia estadística, ya que permite la evaluación de múltiples intervenciones o factores dentro de un mismo experimento.

- (c) Niveles y combinaciones: Los estudios a menudo se describen por el número de niveles de cada factor, como un diseño factorial de 2×2 , que incluye dos factores cada uno con dos niveles.

Entre las ventajas del diseño factorial se encuentra que pueden detectar interacciones entre factores, proporcionando una comprensión más profunda de cómo las combinaciones de factores influyen en el resultado; son rentables, especialmente cuando los participantes son escasos, ya que maximizan la información obtenida de cada participante y los diseños se pueden adaptar a diversos campos, incluidos los ensayos químicos, donde se pueden evaluar múltiples intervenciones simultáneamente (Regti et al., 2017). La fórmula para el diseño factorial no se proporciona explícitamente debido a su complejidad y particularidad, pero se discuten y existen conceptos y métodos claves relacionados con el diseño factorial, que pueden ayudar a comprender su estructura y aplicación:

- (a) Diseño factorial completo: Esto implica estudiar todas las combinaciones posibles de factores y niveles.
- (b) Contrastes ortogonales: Estos se utilizan para construir nuevas fórmulas para estimar coeficientes lineales, cuadráticos y de interacción en diseños factoriales, asegurando que cada coeficiente se pueda estimar de forma independiente.
- (c) Diseño factorial fila-columna: Se trata de una disposición específica de elementos de diseño factorial en una matriz rectangular, donde las filas y columnas actúan como factores de bloqueo.

(d) Efectos de la interacción: Los diseños factoriales pueden incluir efectos de interacción entre factores, que son cruciales para comprender cómo los factores influyen conjuntamente en la variable de respuesta.

2.3. Definición de términos

- Lixiviación: Proceso metalúrgico basado en la disolución de un mineral por acción de un disolvente, siendo el más común el ácido sulfúrico en la industria metalúrgica.
- Concentrado de cobre: Material con alto contenido de un metal de interés como cobre, zinc, plomo, etc.; producido en plantas concentradoras a través de los procesos de chancado, molienda y flotación.
- Ácido sulfúrico: Sustancia química más común utilizado en la mayoría de los procesos de lixiviación, es un subproducto de las plantas de fundición donde se trata concentrados sulfurados. Fórmula química: H_2SO_4 .
- Pirita: Mineral que contiene hierro y azufre, es el responsable de aportar los iones férricos para la oxidación de la calcopirita. Fórmula química: FeS_2 .
- Cloruro de sodio: Tiene la propiedad de aumentar la conductividad de la solución de lixiviación, en disolución forma iones de cloruro los cuales son agentes muy oxidantes. Fórmula química: NaCl
- Recuperación de cobre: Masa de cobre extraído del concentrado después de la lixiviación en relación con la cantidad de concentrado inicial expresado en porcentaje.
- Par galvánico: El contacto directo a través de una solución conductora de dos elementos con diferentes potenciales de oxidación origina la corrosión del elemento con mayor potencial de oxidación, en el caso puntual del par

galvánico pirita/calcopirita, la pirita se oxida formando iones Fe^{3+} que son los responsables de acelerar la oxidación de la calcopirita.

- PLS: Siglas de Pregnant leach solution, es la solución acuosa ácida que contiene solutos en forma de iones, esta solución resulta del proceso de lixiviación.
- SX: Abreviatura que hace referencia al proceso de extracción por solventes donde se utiliza un reactivo selectivo llamado extractante usado para concentrar el metal de interés contenido en el PLS.
- EW: Abreviatura de electrowinning, proceso conocido como electroobtención donde se trata las soluciones concentradas de SX para electrocristalizar el elemento de interés mediante la aplicación de corriente continua a electrodos sumergidos en la solución llamada electrolito rico.
- EPP: Siglas de equipo de protección personal, este término se usa para designar a los elementos de seguridad necesarios para disminuir o atenuar los riesgos asociados a actividades industriales.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo es clasificado como investigación experimental, el desarrollo de experimentos permite demostrar las hipótesis planteadas, sobre el desarrollo de esta premisa se intenta generar nuevos conocimientos sobre el procesamiento de concentrados mediante la lixiviación de concentrados, la manipulación de variables permitió medir el efecto de las variables independientes sobre la variable respuesta, siendo en este caso puntual la recuperación de cobre. El control de las condiciones de cada prueba se desarrolló con el debido cuidado para evitar o minimizar el efecto de las variables no contempladas en este trabajo como las condiciones atmosféricas, finalmente la recolección de datos, a partir de la ejecución de las pruebas, permite generar la información necesaria para el análisis estadístico respectivo a fin de determinar si existe una relación significativa entre la recuperación de cobre y la adición de pirita y cloruro de sodio.

El nivel de la investigación permite identificar si las variables propuestas tienen incidencia en la extracción de cobre, con ello se pretende aportar el conocimiento desprendido de las pruebas que se realizarán para futuras investigaciones principalmente por la escasa investigación en Perú sobre el tema.

3.2. Población y muestra

La población y la muestra en esta investigación quedan supeditadas a la cantidad de 2 kg de concentrado de cobre con granulometría fina donada por una empresa productora de cobre ajena al desarrollo de la presente tesis. En ese sentido se indica como muestreo no probabilístico la obtención de la muestra para el desarrollo de los experimentos.

3.3. Operacionalización de las variables

La Tabla 2 relaciona la definición conceptual de las variables y la forma en la que estas serán medidas:

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI		
Proporción Pirita/concentrado	Relación específica entre masas de pirita y concentrado	Valor numérico sin unidades
Concentración de cloruro de sodio	Cantidad de cloruro de sodio sobre el volumen de lixivante	g/l de NaCl
VD		
Recuperación de cobre	Cantidad de cobre disuelto	%

Fuente: Elaboración propia

Es importante mencionar que se mantuvo fijas las variables de temperatura de trabajo, porcentaje de sólidos, nivel de acidez y agitación debido a que se toma como base la investigación de Dixon et al. (2012), se menciona con más detalle este artículo en los antecedentes del presente estudio.

3.3.1. Identificación de las variables

- Variable dependiente (VD):
 - a. Recuperación de cobre
- Variables independientes (VI):
 - a. Proporción pirita/concentrado
 - b. Ratio de cloruro de sodio

3.3.2. Caracterización de las variables

- Recuperación de cobre: Es definido como el porcentaje de cobre que se extrae del concentrado presente en la solución acuosa de sulfato de cobre conocido como PLS. El valor es calculado en términos de porcentaje mediante la relación de peso/peso entre la cantidad de cobre recuperada en el PLS y la cantidad de cobre presente en el concentrado.
- Proporción pirita/concentrado: Es la relación específica entre la masa de pirita añadida y la masa de concentrado de mineral que se está lixiviando.

$$\text{Proporción pirita/concentrado} = \text{masa de Py} / \text{masa de concentrado}$$

- Ratio de cloruro de sodio: Se refiere a la masa de cloruro de sodio (NaCl) en relación con la cantidad de concentrado de cobre, se expresa en g/t.

$$\text{Ratio de NaCl} = \text{g de [NaCl]} / \text{t de concentrado}$$

3.4. Metodología experimental

3.4.1. Matriz de pruebas

Se utilizó un diseño factorial para el desarrollo de las evaluaciones, se trabajó con un nivel de significancia $\alpha = 0,05$. Dos niveles de evaluación para las variables involucradas con sus respectivas pruebas por duplicado y la adición de tres puntos centrales dieron como consecuencia el desarrollo de 11 pruebas. Lo

mencionado puede describirse con la siguiente formulación: $2^k * 2 + 3$, donde k indica la cantidad de variables, “*2” indica la duplicación de las pruebas y + 3 la adición de tres puntos centrales.

La interpretación estadística necesaria para el desarrollo del modelo matemático que ayude a describir el proceso de disolución de cobre del concentrado, así como la determinación del grado de significancia de las variables estudiadas, fueron realizados mediante los siguientes paquetes estadísticos:

- Microsoft Excel
- Minitab 19

La Tabla 3 muestra la matriz para el desarrollo de las 11 pruebas mencionadas, se aplicó el criterio de aleatoriedad para la conformación de la matriz. Las variables fijas como temperatura, porcentaje de sólidos, nivel de acidez y agitación presentaron los valores de: 80 °C, 20 %, 50 g/l y 300 RPM respectivamente.

Tabla 3

Matriz de pruebas

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	relación Py/conc.	NaCl
4	1	1	1	10	30
1	2	1	1	2	2
10	3	0	1	6	16
7	4	1	1	2	30
3	5	1	1	2	30
11	6	0	1	6	16
6	7	1	1	10	2
8	8	1	1	10	30
5	9	1	1	2	2
9	10	0	1	6	16
2	11	1	1	10	2

Nota: La tabla muestra en la primera columna el orden aleatorio de las pruebas, relación peso/peso para Py/conc.; unidades en g/l para la adición de NaCl

3.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

3.5.1. Acciones y actividades para la ejecución del proyecto

Se desarrolló las siguientes actividades en el presente trabajo de investigación:

Tabla 4

Cuadro de actividades

Nº	Fase 1
1	Búsqueda de información
2	Elaboración del capítulo I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
3	Elaboración del capítulo II MARCO TEÓRICO
4	Elaboración del capítulo III MARCO METODOLÓGICO
6	Planeamiento de pruebas
7	Presentación del plan de tesis
8	Revisión y aprobación del asesor
Fase 2	
9	Ejecución de pruebas preliminares en laboratorio
10	Ejecución de pruebas en laboratorio
Fase 3	
11	Análisis estadístico de resultados
12	Discusión de resultados
13	Elaboración del capítulo IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN
14	Elaboración de CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
Fase 4	
15	Envío de tesis para su revisión
16	Subsanación de observaciones
17	Aprobación del asesor
18	Designación de jurados
19	Revisión y aprobación de tesis por el jurado
Fase 5	
20	Sustentación de tesis
21	Trámites administrativos para la obtención del título profesional

3.5.2. Materiales e instrumentos

- **Materiales**

- (a) Concentrado de cobre
- (b) Agente lixiviante: solución concentrada de ácido sulfúrico
- (c) Agentes oxidantes: pirita y cloruro de sodio
- (d) Material de vidrio para análisis químico

- **Instrumentos**

- (a) Reactor: Recipiente donde se llevó a cabo la lixiviación
- (b) Agitador mecánico: Utilizado para mezclar el concentrado y los agentes lixiviante y oxidantes.
- (c) Instrumentos de análisis: Se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica AAS (Atomic Absorption Spectrometry) para medir la ley de cobre en la solución de lixiviación.
- (d) Campana extractora: Se utilizó para extraer gases nocivos para la salud generados en la digestión ácida del concentrado para la determinación de su ley de cabeza.
- (e) Plancha eléctrica: Permite alcanzar una temperatura adecuada para el ataque químico en la digestión ácida.
- (f) Balanza electrónica

3.5.3. Técnicas de análisis

- **Contenido metálico de cobre en el concentrado**

El análisis es realizado mediante volumetría, para este análisis de cobre en el concentrado, el porcentaje de este elemento debe estar comprendido en el rango

de 20 a 40 %, un peso determinado de concentrado es sometido a digestión ácida, se utiliza tiosulfato de sodio como titulante y almidón como indicador, el método está basado en el análisis cuantitativo de generación de iodo a partir de ioduro que reacciona estequiométricamente con el cobre presente en la muestra, para ello se agrega a la muestra una solución de ioduro de potasio, el consumo de tiosulfato de sodio es proporcional a la cantidad de iodo generado, motivo por el cual es imprescindible acomplejar otros elementos que pueden generar iodo como es el caso de iones férricos, arseniosos y antimoniosos que son elementos comunes en el concentrado de cobre, para evitar esta situación se utiliza bifluoruro de amonio en exceso, este acompleja al hierro presente y además tampona el pH en un rango de 3,5 a 4 evitando que los iones de arsénico y antimonio reaccionen con el ioduro, el uso de ácido acético asegura que el cobre no precipite; a continuación se detalla la secuencia de pasos para el análisis de cobre de manera resumida cuyas actividades y criterios tomados aseguran la calidad en la determinación de las leyes de cobre en el concentrado:

1. Pesar una cantidad de muestra aproximada de concentrado de 0,5 g. ($\pm 0,005$) en una balanza analítica, trasladar la muestra a un matraz para ataque químico.
2. Dentro de la campana extractora adicionar al matraz 5 ml de HCl y 4 ml de HClO₄, disponer la muestra sobre una plancha de calentamiento a 340 °C, digerir hasta notar presencia de humos blancos y continuar hasta sequedad evitando que la muestra se queme, dejar enfriar.
3. Agregar aproximadamente 50 ml de agua de ósmosis (caliente), hervir por 2 minutos y dejar enfriar.

4. Agregar gota a gota ayudado de una bureta digital a la muestra hidróxido de amonio al 25 % hasta coloración azul (primer viraje), evitar adicionar en exceso.
5. Adicionar 8 ml de ácido acético y 8 ml de bifluoruro de amonio, la muestra debe virar a un color celeste muy claro.
6. La valoración de la muestra se realiza con tiosulfato de sodio estandarizado, cuyo factor de titulación es determinado previamente con la titulación de una masa conocida de cobre electrolítico de alta pureza (99,99 %).
7. Colocar el matraz en un agitador magnético regulando la agitación para evitar salpicaduras, adicionar 10 ml de solución de yoduro de potasio al 30 %, agregar el tiosulfato de sodio hasta que la muestra pase de un amarillo intenso a amarillo tenue, en ese punto adicionar 5 ml de indicador almidón al 1 % hasta formar un color azul tenue.
8. Agregar 3 ml de tiocianato de amonio para intensificar el color azul, enjuagar las paredes con agua de ósmosis y titular hasta virar de azul a blanco o crema.
9. Multiplicar el factor de titulación con el volumen de gasto, dividir este producto entre la masa inicial del concentrado para el cálculo del porcentaje de cobre.

Figura 5

Preparación de muestras para cobre por volumetría



Nota: Izquierda: digestión ácida de la muestra por triplicado. Derecha: muestras listas para el análisis de cobre por volumetría mediante yodometría.

Figura 6

Reactivos utilizados en cobre por volumetría



Nota: Reactivos e instrumental utilizado para el análisis de cobre volumétrico.

El factor de titulación del tiosulfato de sodio y el porcentaje cobre son calculados mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{Factor} = \frac{\text{peso de cobre electrolítico} * \text{pureza}}{\text{Volumen de tiosulfato de sodio}} \quad (6)$$

$$\% \text{Cu en la muestra} = \frac{\text{Vol. tiosulfato de sodio} * \text{Factor de titulación}}{100}$$

so de muestra

(7)

- **Contenido metálico de cobre y hierro en la pirita**

Ambos elementos son determinados mediante análisis de cobre y hierro por absorción atómica, debido principalmente al contenido bajo de cobre ($< 5\%$). Un peso determinado de pirita es sometido a digestión ácida sucesiva con ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido perclórico y ácido fluorhídrico, la solución acuosa obtenida es enrasada para su respectivo análisis por AAS; a continuación, se detalla la secuencia de pasos para el análisis de cobre y hierro de manera resumida:

1. Pesar una cantidad de muestra aproximada de muestra de 0,5 g. ($\pm 0,005$) en una balanza analítica, trasladar la muestra a un tubo de digestión, utilizar una campana extractora para realizar la digestión ácida.
2. Añadir al tubo digestor 3 ml de una solución que contiene 60 % de HF y 40 % de HCl, llevar hasta sequedad a temperatura de 180°C (20 min. aprox.) y dejar enfriar.
3. Añadir 5 ml de HNO_3 y 3 ml de HClO_4 , colocar luna de reloj sobre el tubo, la digestión ácida en este punto termina cuando ya no haya generación de gases nitrosos (color pardusco) y la muestra se convierte en un estado pastoso.
4. Adicionar 10 ml de HCl al 2 % y 5 ml de agua de ósmosis lavando las paredes del tubo digestor, hervir la mezcla hasta eliminación de humos con lo que se asegura la eliminación de NO_2 y residuos de HClO_4 , dejar enfriar a temperatura ambiente.
5. Transferir la solución hacia una fiola volumétrica grado “A” de 500 ml, aforar con agua de ósmosis previa adición de 10 ml de ácido clorhídrico.

6. Agitar vigorosamente la fiola, sacar una muestra en tubo de ensayo para centrifugación.
7. Se acondiciona tanto los estándares de calibración, así como las muestras a analizar a temperatura $33\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
8. Elaboración de la curva de calibración para cada elemento, siendo para el cobre estándares de 1, 3 y 5 ppm, mientras que para el hierro se calibra con estándares de 5, 10 y 20 ppm.
9. Para el cálculo del contenido metálico, multiplicar el volumen de dilución (ml) por el valor de lectura (ppm) y dividirlo sobre 10 000 veces el peso de muestra (g).

El contenido de cobre y hierro se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{Contenido metálico} = \frac{\text{Volumen de dilución} * \text{lectura AAS}}{\text{Peso de muestra} * 10\,000} \quad (8)$$

Figura 7

Agitación de fiolas enrasadas postdigestión



Nota: Agitación mecánica mediante shakers por 3 minutos.

Figura 8

Elaboración de curvas de calibración



Nota: La cantidad y concentración de estándares de calibración es independiente para cada elemento analizado.

- **Leyes de cabeza de concentrado y pirita**

Las muestras de concentrado de cobre y pirita fueron homogenizadas, cuarteadas y muestreadas a fin de obtener porciones útiles y representativas para el análisis del contenido metálico de cobre y hierro total mediante marcha analítica de cationes. La Tabla 5 muestra los valores obtenidos del análisis tanto volumétrico, así como mediante absorción atómica de cobre y hierro según lo explicado en la sección 3.5.3 para cada muestra, CuT y FeT indican la cantidad de cobre y hierro total en la muestra, respectivamente expresados en términos de porcentaje.

Tabla 5

Análisis de cabeza

	CuT	FeT
Concentrado	27,217	28,653
Pirita	0,101	45,480

Nota: Valores expresados en términos de porcentaje (%)

- **Contenido metálico de cobre y hierro en los PLS**

Al tratarse de muestras acuosas, la determinación tanto de cobre, así como de hierro, se realiza mediante AAS, se resume el procedimiento mediante la siguiente secuencia de pasos:

1. Sacar una alícuota de 2 ml de cada muestra de PLS, adicionar 2 ml de HCl, enrasar a 100 ml con agua de ósmosis y agitar vigorosamente.
2. Para la segunda dilución, sacar alícuota de 5 ml, enrasar a 100 ml con agua de ósmosis y agitar vigorosamente.
3. Para la lectura de cobre, elaborar la curva de calibración con estándares de 1, 3 y 5 ppm; para la lectura de hierro, utilizar estándares de 5, 10 y 20 ppm.
4. Una vez se hayan elaborado las curvas de calibración respectiva, se procede a analizar cada muestra.
5. Para el cálculo de la ley contenida en el PLS, se multiplica el valor de lectura de AAS y el factor de dilución, siendo en este caso igual a 1.

El factor de dilución, así como el contenido de cobre y hierro en cada muestra de PLS son calculados mediante las siguientes fórmulas:

$$\text{Factor de dilución} = \frac{\frac{100}{\text{alícuota 1}} * \frac{100}{\text{alícuota 2}}}{1000} \quad (9)$$

$$\text{Ley en el PLS} = \text{factor de dilución} * \text{lectura AAS} \quad (10)$$

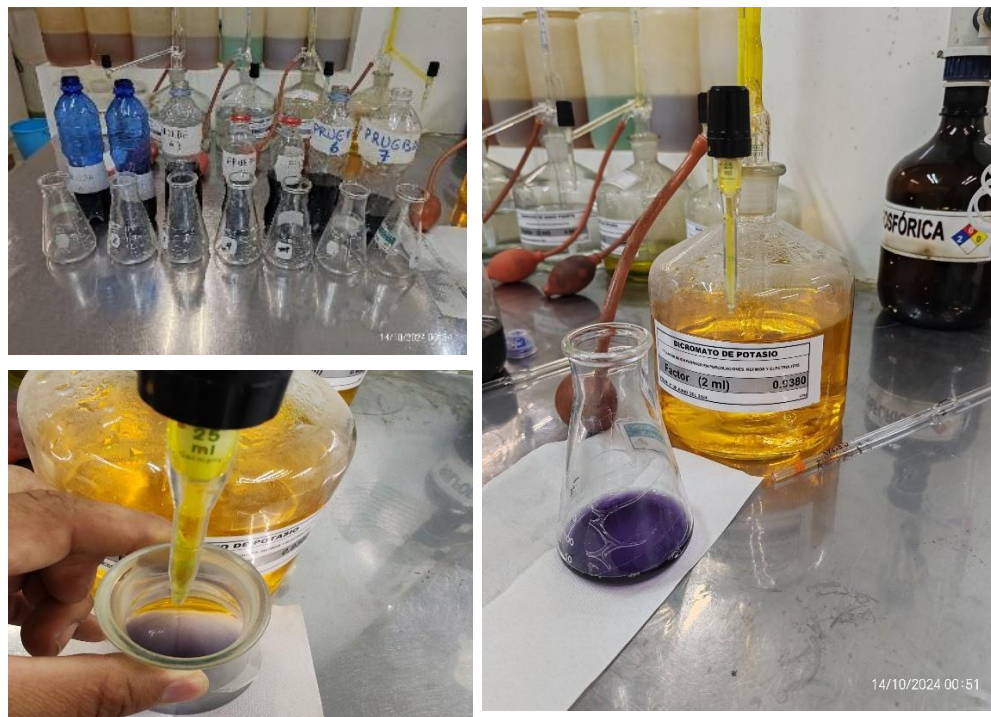
- **Contenido de ion ferroso y ion férrico en los PLS**

El contenido de ion ferroso expresado en g/l es determinado mediante el análisis volumétrico con dicromato de potasio como titulante e indicador a la fenolftaleína, el procedimiento se sintetiza en la siguiente serie de pasos:

1. Tomar alícuota de 2 ml de cada muestra de PLS.
2. Adicionar 10 ml de solución sulfo-fosfórico (50 % de H_2SO_4 y 50 % de H_3PO_4) y 3 a 4 gotas de indicador fenolftaleína.
3. Titular con solución valorada de dicromato de potasio, la solución tinta de verde claro intenso a lila.
4. Para el cálculo de la concentración, multiplicar el volumen de gasto por el factor de titulación del dicromato.

Figura 9

Análisis de ion ferroso



Nota: Izquierda superior: muestras de PLS; izquierda inferior: titulación con dicromato de potasio; derecha: punto de viraje.

El cálculo del contenido de ion férrico se efectúa restando la concentración de hierro total determinada en el análisis por AAS menos la concentración del contenido de ion ferroso, esta concentración es expresada en g/l.

$$\text{Ley de ferroso en el PLS} = \text{factor de titulación} * \text{volumen de gasto} \quad (11)$$

- **Medición de pH y potencial ORP en los PLS**

Para ambas mediciones se utiliza potenciómetros de pH y potencial ORP (óxido – reducción) respectivamente, los cuales deben ser calibrados con sus respectivos estándares antes de efectuar las mediciones, después de cada lectura se debe enjuagar el electrodo con agua destilada y secar cuidadosamente con servilleta para evitar contaminación entre lecturas.

Figura 10

Equipos de medición de pH y ORP



Nota: Izquierda: potenciómetro ORP; derecha: pH-metro

3.5.4. Preparación de reactivos y equipos

El tipo de lixiviación desarrollado requiere de un tamaño de partícula adecuado, el concentrado presenta un tamaño de P80 malla -200, de manera que la primera actividad desarrollada fue el chancado y pulverización de la muestra de pirita para alcanzar la granulometría del concentrado.

Figura 11

Pirita y concentrado de cobre



Nota: Izquierda: muestra de pirita; derecha: muestras pulverizadas de pirita y concentrado respectivamente.

La preparación de los reactivos necesarios para las 11 pruebas implica el desarrollo de los siguientes pasos, cada uno de acuerdo con la matriz de prueba expuesto en la Tabla 3:

1. Pesar los reactivos sólidos (concentrado, pirita y sal), para esta actividad es necesario el uso de lunas de reloj y una balanza analítica.
2. El volumen de solución fue de 500 ml en todas las pruebas, a partir de este valor se pesa el equivalente en gramos de ácido sulfúrico de 98 % de pureza para lograr una concentración de 50 g/l de acidez, para ello pesar en un vaso de precipitado 21,51 g. de H_2SO_4 .
3. Adicionar los reactivos sólidos dentro del reactor juntamente con la solución acidulada de 50 g/l.

4. Insertar el vástago del agitador por el agujero central de la tapa del reactor, asegurar correctamente el vástago a la cabeza del agitador con ayuda de su llave mandril.
5. Cerrar correctamente la tapa del reactor, colocar el reactor en el baño María que ya se encuentra a 80 °C.
6. Conectar la línea de aire y encender el compresor.
7. Se empieza a contabilizar las pruebas desde que se enciende el agitador y este alcance una velocidad angular de 300 RPM.
8. Después de 6 horas de lixiviación, apagar la agitación y el baño María.
9. Dejar enfriar y sedimentar la solución PLS resultante por 24 horas para realizar el muestreo.

Figura 12

Pesado de reactivos sólidos



Nota: Muestras de pirita, concentrado y sal de izquierda a derecha. Se empleó balanza analítica con error estimado de ± 0.0001 .

Figura 13

Preparación de solución lixivante



Nota: Izquierda: trasvase de ácido para preparar la solución ácida de 50 g/l; derecha: mezcla de concentrado, pirita y sal antes de iniciar las pruebas de lixiviación.

Figura 14

Equipos utilizados en la lixiviación de concentrado



Nota: A: mini-compresor, el flujo de aire se mantuvo constante en 25 l/m en todas las pruebas; B: agitador mecánico, se mantuvo constante en 300 RPM; D: reactor sumergido en el baño María (C) a 80 °C.

- **Prueba preliminar**

A fin de determinar posibles inconvenientes durante el desarrollo de las pruebas, se realizó una prueba inicial utilizando materiales de laboratorio como estufa para la fuente de calor, vasos de precipitados, agitador mecánico, inyección de aire de mini compresor de laboratorio.

Al no contar con un reactor especial para poder ejecutar las evaluaciones de manera adecuada, se improvisó el vaso de precipitado de 3 litros como baño María, se utilizó aceite común de lubricación de motor para evitar pérdidas por evaporación debido a que se trabajó a 80 °C, dentro de este baño caliente se sumergió otro vaso de 1 litro donde se realizó el proceso de lixiviación del concentrado.

Figura 15

Prueba preliminar



Nota: Instalación de elementos para prueba preliminar.

Las condiciones operativas fueron: nivel de agitación de 300 RPM, temperatura de 80 °C, 50 g/l de acidez, relación pirita-concentrado de 4 a 1 (160 g de pirita y 40 g de concentrado). Después de 6 horas de agitación, el PLS o solución de lixiviación resultante mostró presencia de cationes disueltos, tal como puede observarse en la Figura 16, donde el color azul verdoso es indicativo de presencia de cobre y principalmente hierro.

Figura 16

PLS de prueba preliminar



Nota: No se realizó un análisis cuantitativo debido a que las condiciones operativas no fueron ideales.

Sin embargo, durante el desarrollo de la prueba se perdió muestra debido a salpicaduras de la solución lixiviante cuando se inyectó aire a la pulpa, esta condición desfavorable se ocasionó principalmente, porque no se contaba con una tapa que evite las proyecciones de la solución fuera del vaso. La imagen de la

derecha en la Figura 17 muestra el estado de las paredes del vaso una vez concluida la prueba, este material es considerado como pérdida debido a que no contribuye en la recuperación de cobre.

Figura 17

Condiciones desfavorables



Nota: Izquierda: la inyección de aire generó turbulencia en la pulpa. Derecha: se evidencia la pérdida de material que no es lixiviado.

Debido a esas circunstancias, se decidió fabricar un pequeño reactor en el que pueda desarrollarse de manera adecuada el proceso de lixiviación, se consideró aspectos como la alta acidez del medio, así como la presencia de iones cloruros para la selección del material del reactor.

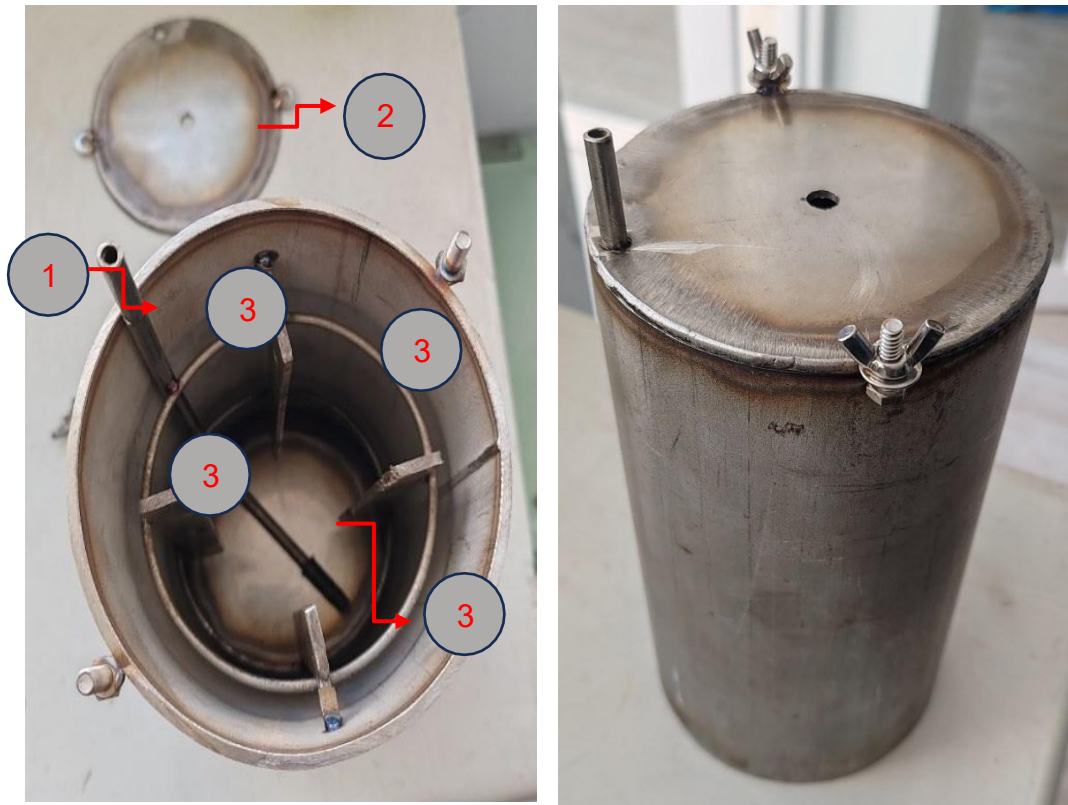
Se utilizó tubería de diámetro de 4 pulgadas de acero inoxidable 304 y 8 pulgadas de altura para la estructura del reactor, así como para la fabricación de los baffles internos, tubo para inyección de aire y de la tapa del reactor donde se hicieron

agujeros para el ingreso del tubo de aire y del vástago del agitador. Para asegurar la tapa a la estructura del reactor durante el desarrollo de las pruebas se soldó dos pernos exteriores los cuales fueron sujetos con armellas (ver Figura 18).

En cuanto al sistema para proporcionar calor a la pulpa se utilizó un baño María de agua configurado para alcanzar la temperatura de 80 °C, el equipo utilizado utilizaba una resistencia eléctrica en forma de serpentín para generar calor, el nivel de agua fue un factor crítico para evitar que la resistencia se queme.

Figura 18

Reactor de acero inoxidable



Nota: 1: tubo de ingreso de aire. 2: tapa del reactor. 3: baffles

Figura 19

Sistema de transferencia de calor



Nota: El baño María fue seteado a 80 °C

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Lixiviación sin pirita y sin cloruro de sodio

Se evaluó la recuperación de cobre sin la adición de pirita y cloruro de sodio, con la intención de contrastar las recuperaciones cuando sean adicionados los elementos mencionados. Al igual que en todas las pruebas ejecutadas con el diseño factorial, se utilizó las siguientes condiciones operativas: Acidez: 50 g/l; Agitación: 300 RPM; Temperatura: 80 °C; Porcentaje de sólidos: 20 %; Tiempo de lixiviación: 6 horas.

Tabla 6

Cálculo del volumen de PLS

Componentes	Unidad	Valor
Porcentaje de sólidos	%	20
Masa de sólidos	g	105
Volumen de agua	ml	500
Densidad del ácido	g/ml	1,84
Peso agua	g	500
Peso ácido	g	25,00
Volumen del ácido	ml	13,587
Peso PLS	g	548,593
Densidad PLS	g/ml	1,022
Volumen de PLS	ml	536,667

Nota: Se utilizó ácido sulfúrico concentrado en todas las pruebas

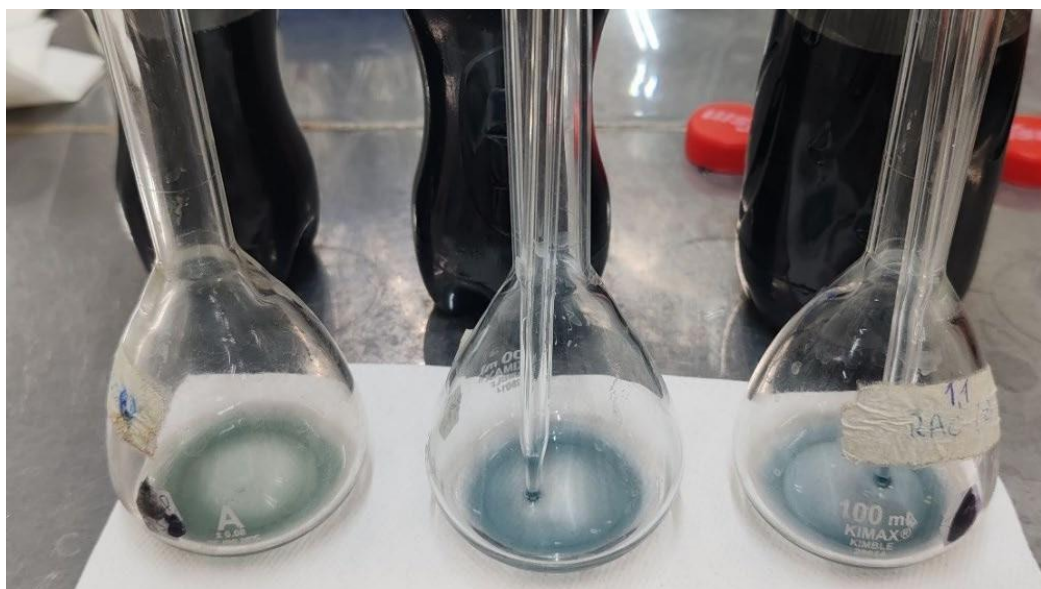
El porcentaje de sólidos corresponde en su totalidad a la masa de concentrado, siendo en este caso 105 gramos. La Tabla 6 muestra los datos para calcular el volumen teórico de la solución, el cual toma en cuenta los volúmenes de agua y ácido, así como sus respectivas densidades:

La solución PLS obtenida es mostrada en la primera fiola en la Figura 20, el color verdoso es indicativo de la presencia de mayor contenido de hierro que cobre. Para calcular el porcentaje de recuperación, es necesario conocer la ley de cabeza (datos de Tabla 5) y la ley del PLS obtenido mediante análisis por absorción.

La masa de cobre en la cabeza se expresa en gramos al multiplicar ley por masa de concentrado utilizado, la masa de cobre en PLS fue obtenido multiplicando ley por volumen de solución calculado (Tabla 6).

Figura 20

PLS sin pirita y sin cloruro de sodio



Nota: El color más verdoso de la primera fiola es indicativo de menor contenido de cobre comparado con las otras muestras donde sí se utilizó NaCl y pirita

Según los datos mostrados en la Tabla 7, se obtuvo una recuperación de 1,352 % de cobre en 6 horas de agitación.

Tabla 7*Recuperación de Cu sin pirita ni cloruro*

	cobre en cabeza	ley Cu en PLS	vol. PLS	masa de Cu extraído	recuperación
unidad	g	g/l	ml	g	%
valor	2,858	0,072	536,667	0,039	1,352

Nota: Después de 6 horas de lixiviación se obtiene una recuperación bastante pobre.

4.1.2. Recuperación de cobre con pirita y cloruro de sodio

Los pesos de pirita, concentrado y sal mostrados en la Tabla 8 fueron adicionados en la evaluación de cada una de las 11 pruebas según el modelo factorial seleccionado. En cuanto a los parámetros de operación, se mantuvo constante los valores de porcentaje de sólidos, agitación, acidez, temperatura e inyección de aire.

Tabla 8*Masa de sólidos*

orden	relación Py/conc.	NaCl	pirita Py	concentrado	sal
		g/l	g	g	g
1	10	30	95,455	9,545	15
2	2	2	70,000	35,000	1
3	6	16	90,000	15,000	8
4	2	30	70,000	35,000	15
5	2	30	70,000	35,000	15
6	6	16	90,000	15,000	8
7	10	2	95,455	9,545	1
8	10	30	95,455	9,545	15
9	2	2	70,000	35,000	1
10	6	16	90,000	15,000	8
11	10	2	95,455	9,545	1

Los valores de la Tabla 6 son aplicables en el desarrollo de las 11 pruebas en cuanto a la cantidad de ácido y agua utilizado debido a que se mantiene constante los valores de acidez y el porcentaje de sólidos (suma de pirita y concentrado) siendo este valor de 105 gramos en todas las condiciones evaluadas; asimismo, para efectos del cálculo de las recuperaciones de cobre se considera el valor calculado del volumen de PLS indicado en la misma tabla, es decir, 536,667 ml.

Tabla 9

Masa de cobre en la cabeza

orden	concentrado	pirita	total
1	2,598	0,096	2,694
2	9,526	0,071	9,597
3	4,083	0,091	4,173
4	9,526	0,071	9,597
5	9,526	0,071	9,597
6	4,083	0,091	4,173
7	2,598	0,096	2,694
8	2,598	0,096	2,694
9	9,526	0,071	9,597
10	4,083	0,091	4,173
11	2,598	0,096	2,694

Nota: Valores expresados en unidades de gramos.

La Tabla 9 muestra el contenido de cobre expresado en gramos en cada una de las cabezas de todas las pruebas, para este cálculo se multiplicó los pesos de concentrado y pirita de Tabla 8 por sus leyes respectivas, valores mostrados en la Tabla 5. Las soluciones de PLS fueron muestreadas después de 24 horas de sedimentación, para el análisis de cobre mediante absorción atómica se realizó dos diluciones sucesivas, en la primera se tomó 2 ml de alícuota diluida en fiola de 100 ml previa adición de 2 ml de ácido clorhídrico al 2 % para mantener en suspensión el contenido metálico, para la segunda dilución se tomó una alícuota de 5 ml diluida

también fiola de 100 ml. Los valores mencionados determinan un factor de dilución de 1, la Tabla 10 muestra el resultado de los análisis de cobre total mediante absorción atómica,

Tabla 10

Leyes de cobre obtenidos

orden	ley
1	0,100
2	1,442
3	1,994
4	0,156
5	0,144
6	2,028
7	0,241
8	0,062
9	1,556
10	2,240
11	0,225

Nota: Valores expresados en unidades de gramos por litro (g/l), ver lista de anexos.

Figura 21

Muestras de PLS



Nota: Muestras de PLS rotuladas.

Figura 22

Dilución de muestras de PLS



Figura 23

Análisis de cobre por absorción atómica AA



Nota: Izquierda: Alícuotas con presencia de contenido catiónico. Derecha: Análisis de cobre con equipo de absorción Perkin Elmer modelo PinAAcle 900F.

Para el cálculo del porcentaje de recuperaciones, dividimos la masa de cobre recuperado en cada prueba sobre la masa de cobre en la cabeza, este valor es expresado en términos porcentuales. La masa de cobre recuperada o disuelta resulta del producto de la ley parcial de cada PLS (Tabla 10) por el volumen de solución (536,667 ml),

Tabla 11

Porcentaje de recuperación de cobre

orden	ley	Cu recuperado	Cu en cabeza	recuperación
	g/l	g	g	%
1	0,100	0,054	2,694	1,992
2	1,442	0,774	9,597	8,064
3	1,994	1,070	4,173	25,641
4	0,156	0,084	9,597	0,872
5	0,144	0,077	9,597	0,805
6	2,028	1,088	4,173	26,078
7	0,241	0,129	2,694	4,800
8	0,062	0,033	2,694	1,235
9	1,556	0,835	9,597	8,702
10	2,240	1,202	4,173	28,804
11	0,225	0,121	2,694	4,482

Nota: Valores de cobre de cabeza fueron tomados de la tabla 9.

Los resultados de recuperación presentados en la tabla anterior fueron analizados en el software Minitab 19 para determinar la significancia de las variables en estudio, relación pirita-concentrado y concentración de cloruro de sodio, esto de acuerdo con el modelo factorial utilizado. Se utilizó un nivel de significancia de $\alpha=0,05$, es decir que, el valor de confiabilidad en el análisis estadístico fue de 95 %.

4.1.3. Análisis estadístico

- **Recuperación de cobre**

El análisis de varianza (ANOVA) mostrado en la Tabla 12 forma parte del análisis de regresión factorial necesario para el desarrollo del modelo matemático, de acuerdo con el nivel de significancia utilizado, aquellos valores p (p value) mayores a 0,05 fueron considerados como irrelevantes o no significativos.

Tabla 12

Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	1221,87	305,47	285,52	0,000
Lineal	2	60,28	30,14	28,17	0,001
relación Py/conc.	1	4,40	4,40	4,12	0,089
NaCl	1	55,88	55,88	52,23	0,000
Interacciones de 2 términos	1	10,20	10,20	9,53	0,021
relación Py/conc.*NaCl	1	10,20	10,20	9,53	0,021
Curvatura	1	1151,39	1151,39	1076,20	0,000
Error	6	6,42	1,07		
Total	10	1228,29			

Nota: La tabla muestra el análisis ANOVA realizado en MINITAB 19.

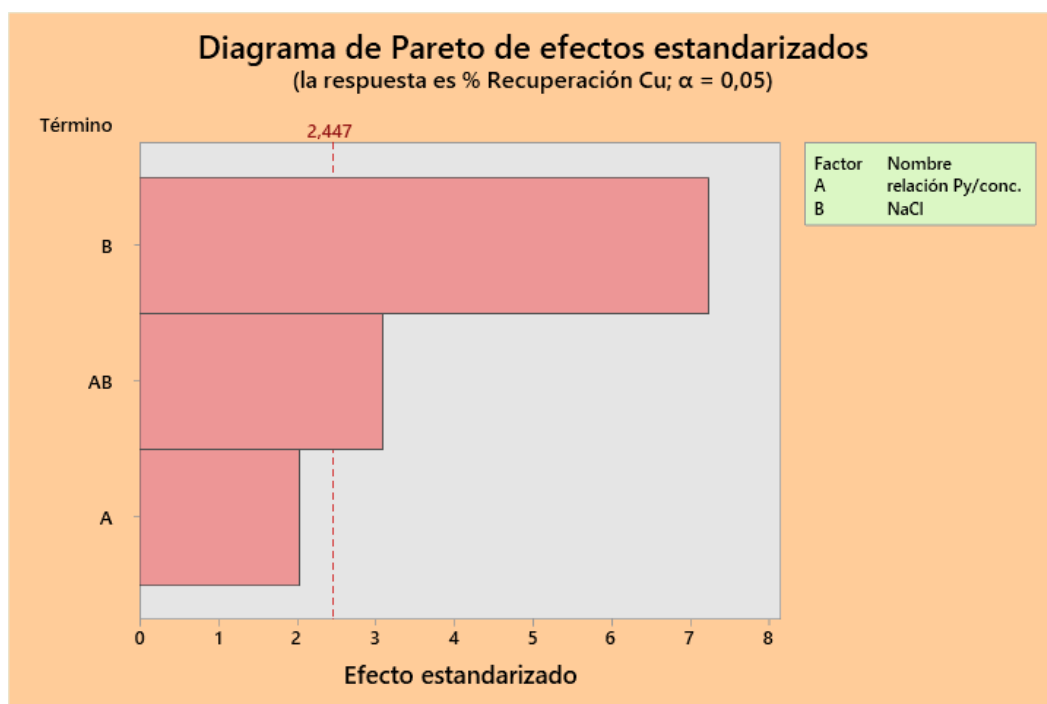
En la tabla anterior, GL indica los grados de libertad utilizados en la generación del modelo matemático mediante la regresión factorial, el modelo de regresión utilizó 4 GL, 1 para cada termino lineal, 1 para la interacción de los términos y 1 para el análisis de curvatura; asimismo, teniendo en cuenta que con el desarrollo de 11 pruebas el total de GL disponibles son 10 ($GL = n^{\circ} \text{ pruebas} - 1$), 6 GL son los disponibles para el análisis del error generado.

De acuerdo con los valores p de Tabla 12, el modelo lineal es considerado como aceptable ($p = 0,001$), de las dos variables evaluadas y que forman parte del modelo de regresión, solo el cloruro de sodio es significativo ($p = 0,000$), también se muestra que la interacción de las variables relación Py/conc. y NaCl es

significativa ($p = 0,021$). Por último, el valor de $p = 0,000$ en la evaluación de existencia de curvatura indica que en el modelo matemático debe considerarse la inclusión de algún término cuadrático. La Figura 24 muestra las variables significativas, es decir a aquellas a las cuales intercepta la línea en rojo.

Figura 24

Diagrama de Pareto



Nota: Variables significativas: B cloruro de sodio; AB interacción de variables.

El modelo matemático lineal obtenido presenta un coeficiente de determinación ajustado de 99,13 %, así como un coeficiente de determinación de predicción 98,75 %, estos valores son mostrados en la Tabla 13, donde además se indica una variación estándar de regresión de 1,0344.

$$\% \text{ Recuperación Cu} = 9,94 - 0,508 \text{ relación Py/conc.} - 0,3098 \text{ NaCl} + 0,02016 \text{ relación Py/conc.} * \text{NaCl} + 22,972 \text{ Pt Ctral.}$$

Tabla 13

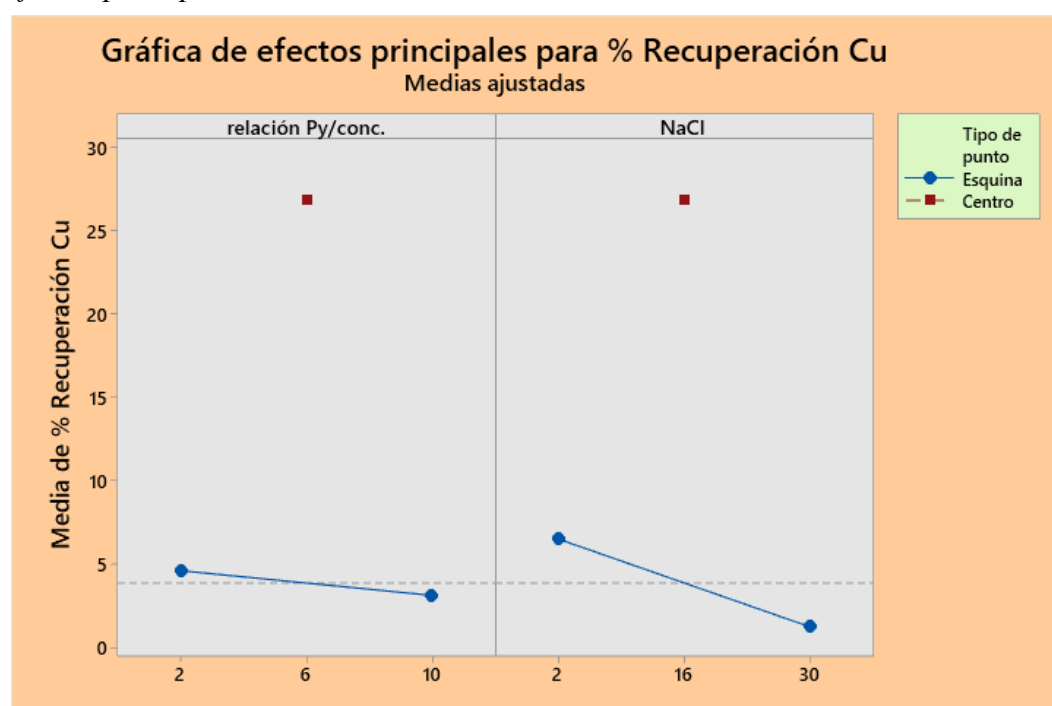
Resumen de regresión

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
103,434	99,48 %	99,13 %	98,75 %

Nota: R-cuad. = R^2 , significa coeficiente de determinación; pred = predicción.

Figura 25

Efectos principales de las variables



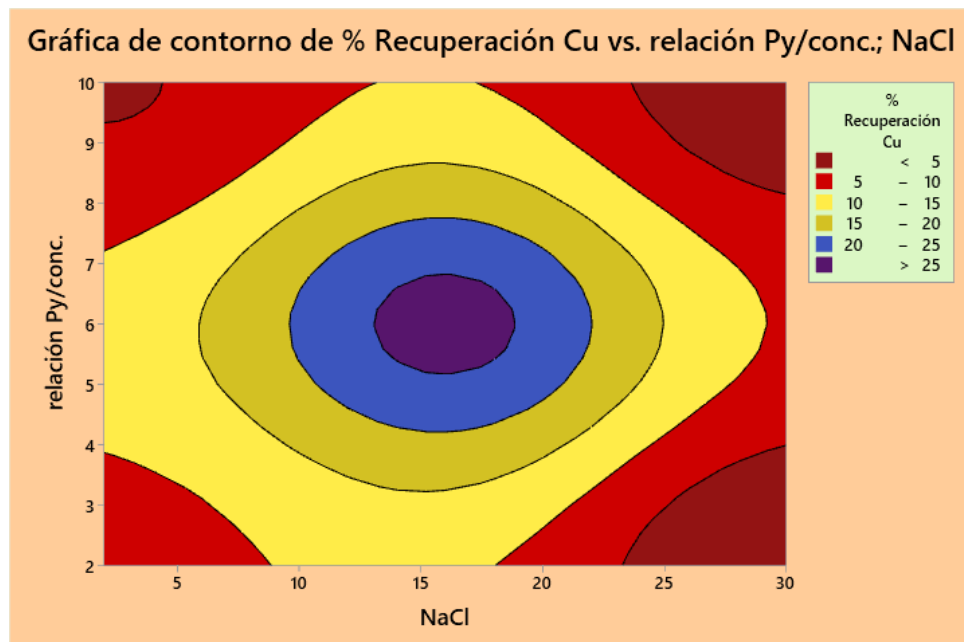
Nota: La recuperación es sustancialmente más elevada con valores intermedios de las variables.

El efecto de las variables independientes sobre la variable respuesta, recuperación de cobre, es mostrada en la Figura 25, existe una relación inversa entre los puntos extremos (niveles bajo y alto) y la recuperación de cobre, es decir que la recuperación disminuye en tanto se incrementan los valores de NaCl y relación pirita-concentrado; sin embargo, se obtiene un mayor nivel de recuperación cuando se utiliza un nivel intermedio (punto central) en ambas variables confirmando la existencia de un modelo cuadrático que explica la relación entre variables

predictoras y variable de salida, esta condición también puede apreciarse en la Figura 26 donde claramente se denota regiones delimitadas por curvas.

Figura 26

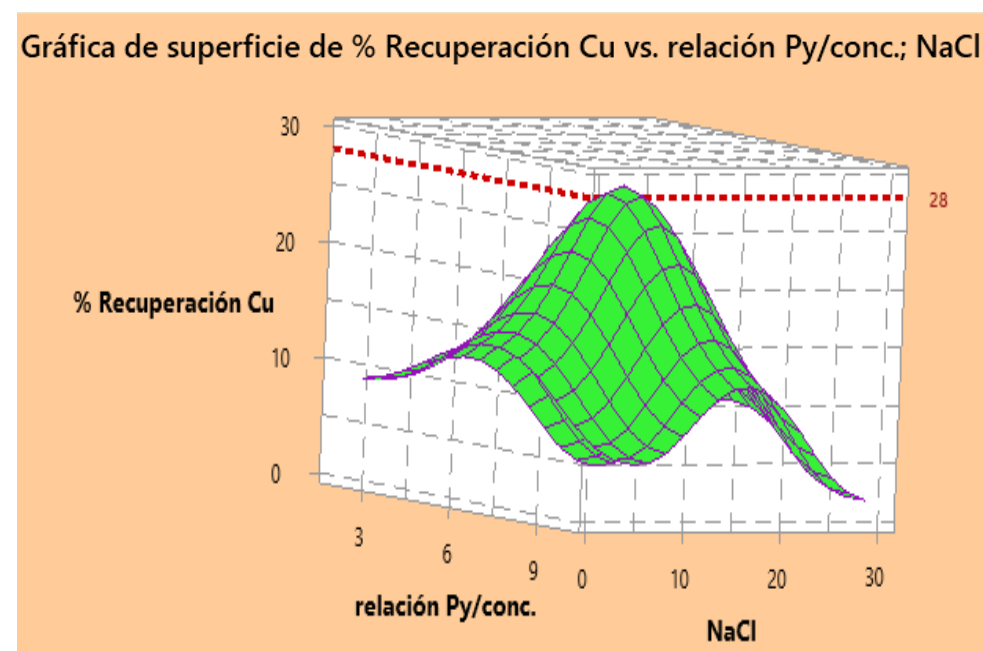
Gráfica de contorno



Nota: El área correspondiente a la mejor recuperación está delimitada con color morado, se confirma la existencia de curvatura en el modelo de regresión.

Figura 27

Superficie de respuesta



Nota: El área correspondiente a la mejor recuperación está ubicado en el domo de la gráfica.

La gráfica de superficie de respuesta, interacción de variables NaCl y relación de pirita y concentrado sobre la recuperación de cobre, muestra mejores valores de recuperación para valores intermedios entre 10 a 20 g/l de cloruro de sodio y valores cercanos a 6 g/l para la relación de pirita y concentrado, en la región señalada se aprecia un pico o domo el cual es indicativo de la existencia de valores cuadráticos que ayuden a maximizar la recuperación de cobre, según el valor máximo obtenido bajo las condiciones de evaluación, se alcanzó valores superiores de 28 % según se muestra en la Figura 27.

- **Disolución de hierro**

La Tabla 14 muestra el ingreso de hierro por la adición de concentrado y pirita según la distribución de cada prueba, el mayor aporte de hierro en la cabeza se da por la adición de pirita (FeS_2) al tener más contenido de hierro en comparación al concentrado que es principalmente calcopirita (CuFeS_2).

Tabla 14

Ingreso de masa de hierro

orden	concentrado	pirita	total
1	2,735	43,413	46,148
2	10,029	31,836	41,865
3	4,298	40,932	45,230
4	10,029	31,836	41,865
5	10,029	31,836	41,865
6	4,298	40,932	45,230
7	2,735	43,413	46,148
8	2,735	43,413	46,148
9	10,029	31,836	41,865
10	4,298	40,932	45,230
11	2,735	43,413	46,148

Nota: Valores expresados en unidades de gramos.

La Tabla 15 muestra los porcentajes de recuperación de acuerdo con cada ley obtenida, al igual que en el cálculo de la recuperación de cobre, los porcentajes de recuperación hierro resultan de la división entre el hierro recuperado o disuelto sobre el hierro de cabeza mostrada en la Tabla 14, los valores son expresados en términos porcentuales.

Tabla 15

Recuperación de hierro

orden	ley	Fe recuperado	Fe en cabeza	recuperación
	g/l	g	g	%
1	19,430	10,427	46,148	22,596
2	21,810	11,705	41,865	27,958
3	19,34	10,379	45,230	22,947
4	23,700	12,719	41,865	30,381
5	19,63	10,535	41,865	25,164
6	19,190	10,299	45,230	22,769
7	16,980	9,113	46,148	19,747
8	17,92	9,617	46,148	20,840
9	16,65	8,936	41,865	21,344
10	16,220	8,705	45,230	19,246
11	18,04	9,681	46,148	20,979

Tabla 16

Cálculo de ion férrico

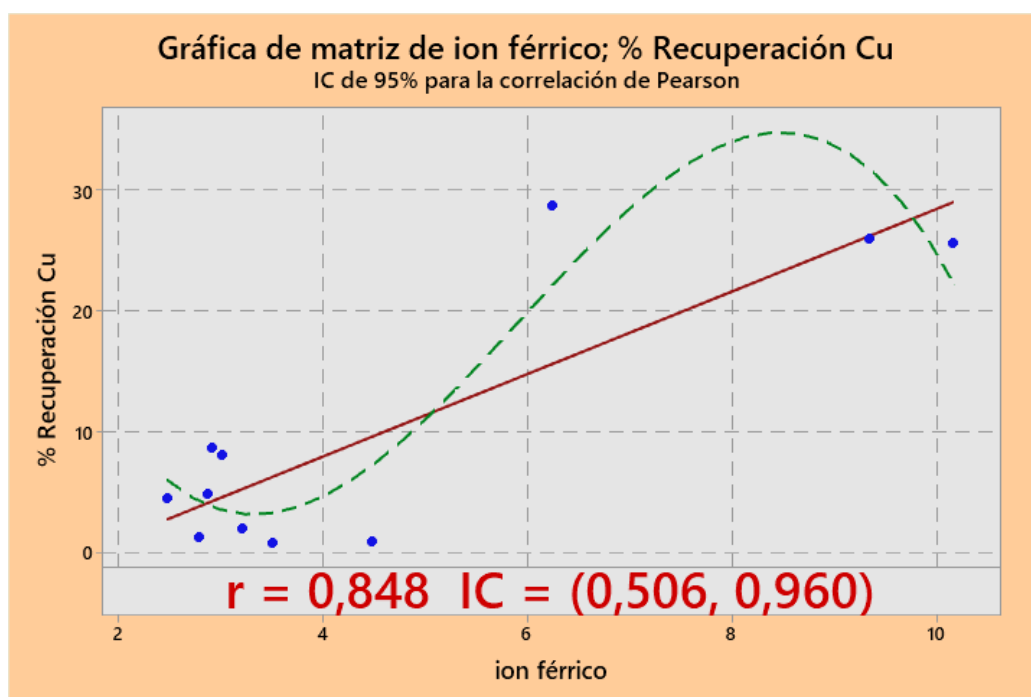
orden	Fe TOT	ion ferroso	ion férrico
1	19,430	16,227	3,203
2	21,810	18,807	3,003
3	19,340	9,181	10,160
4	23,700	19,229	4,471
5	19,630	16,134	3,496
6	19,190	9,852	9,338
7	16,980	14,117	2,863
8	17,920	15,149	2,771
9	16,650	13,742	2,908
10	16,220	9,990	6,230
11	18,040	15,571	2,469

Nota: Valores expresados en unidades de gramos por litro (g/l).

El contenido ion férrico mostrado en la última columna de la Tabla 16, se puede calcular de manera indirecta basándose en el análisis de ion ferroso (volumetría), para ello se debe restar a la ley de hierro total de la Tabla 15 la cantidad de ferroso analizado.

Figura 28

Correlación recuperación de cobre - ion férrico



Nota: Línea en rojo muestra un ajuste lineal; línea en verde muestra un ajuste cúbico.

El coeficiente de correlación Pearson muestra un valor positivo de 0,848, el cual se encuentra dentro del intervalo de confianza mostrado en la Tabla 17 a un 95 % de confianza. La Figura 28 también muestra dos tipos de ajuste, siendo el ajuste cúbico el que mejor se adapta para describir la relación entre % de recuperación de cobre y la presencia de iones férricos presentes en las soluciones de PLS analizados.

Tabla 17*Correlación Pearson*

Muestra 1	Muestra 2	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
% Recuperación Cu	ion férrico	0,848	(0,506; 0,960)	0,001

Nota: Nivel de confianza utilizado = 95% ($\alpha=0,05$).

- **Medición de pH y potencial OPR**

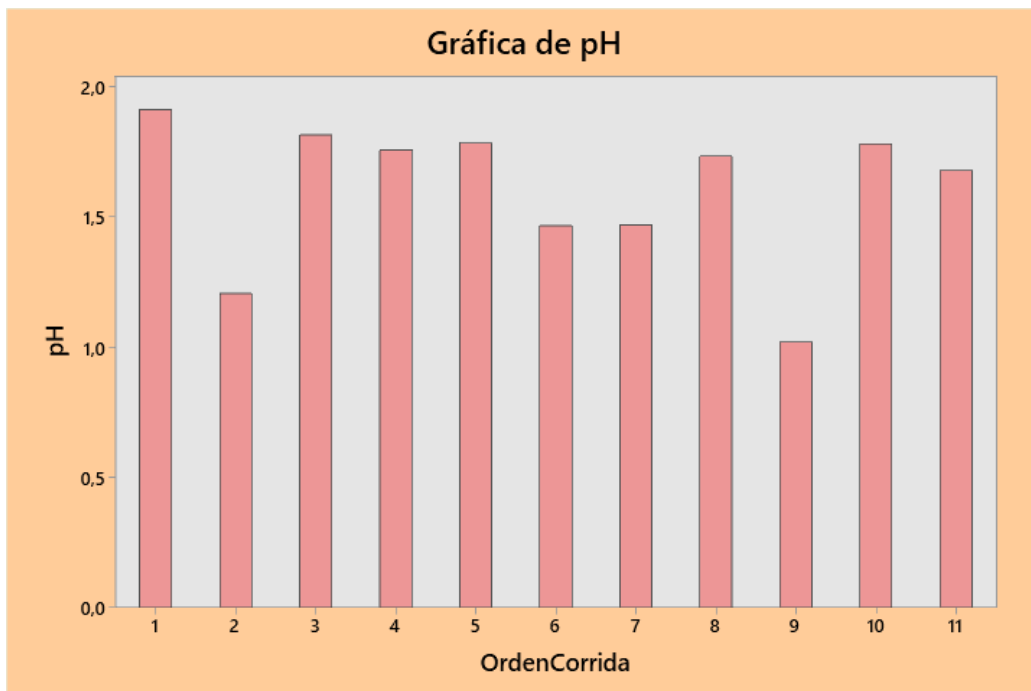
Todos los valores de pH mostrados en la Tabla 18 indican valores inferiores a 2; asimismo, los valores relativamente bajos de potencial óxido-reducción inferiores en todos los casos a 400 mV corroboran los análisis de ferroso presente en la solución (Tabla 16), donde al ser este ion notablemente mayor en comparación al ion férrico, se entiende que la solución PLS tenderá a un potencial menor.

Tabla 18*Resultados de pH y potencial ORP*

orden	pH	mV
1	1,908	364,9
2	1,204	354,6
3	1,812	351,4
4	1,753	330,7
5	1,780	346,5
6	1,464	352,8
7	1,467	345,9
8	1,730	360,3
9	1,018	366,2
10	1,778	355,5
11	1,675	342,6

Figura 29

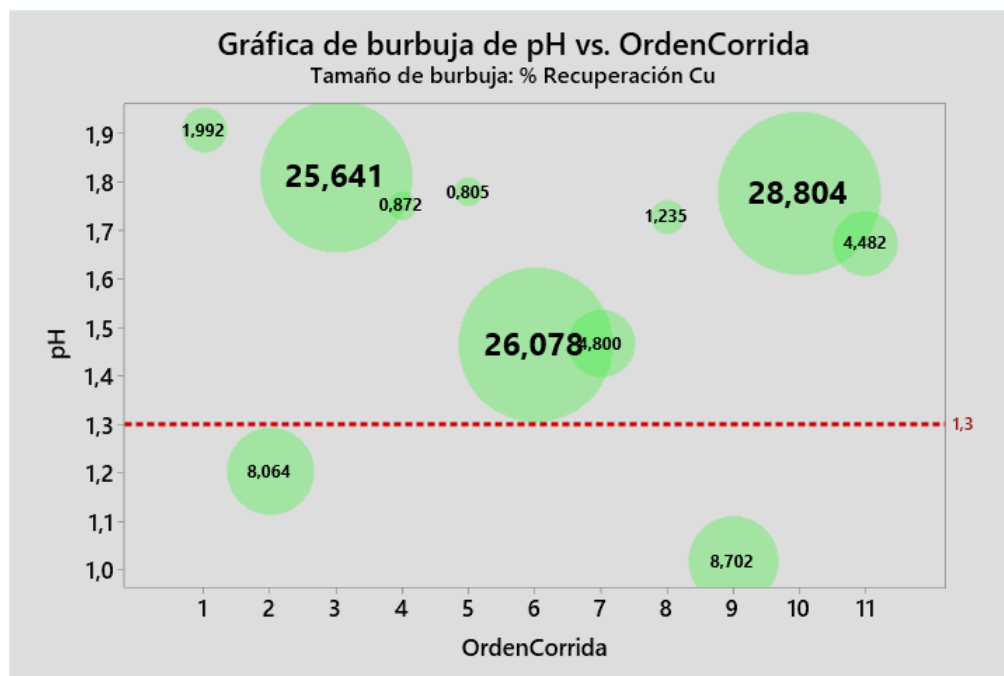
Análisis de pH



Nota: Valores inferiores a 2 denotan condiciones relativamente altas de acidez.

Figura 30

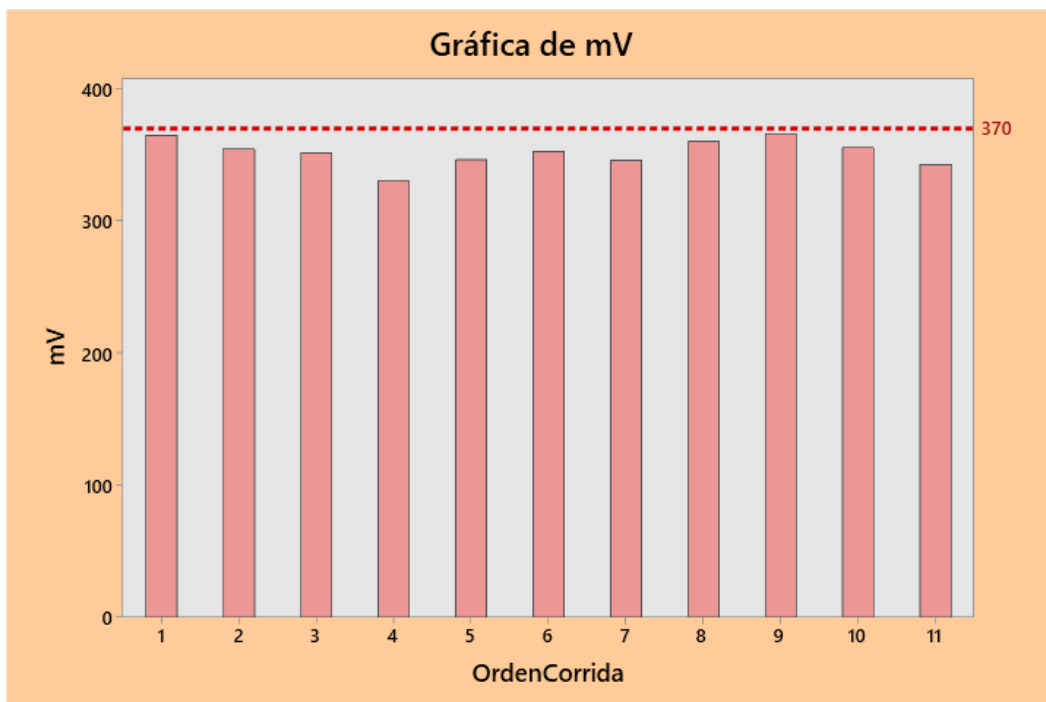
Influencia del pH sobre % de recuperación de cobre



Nota: Mejores recuperaciones de cobre en rango de pH 1,3 a 1.9

Figura 31

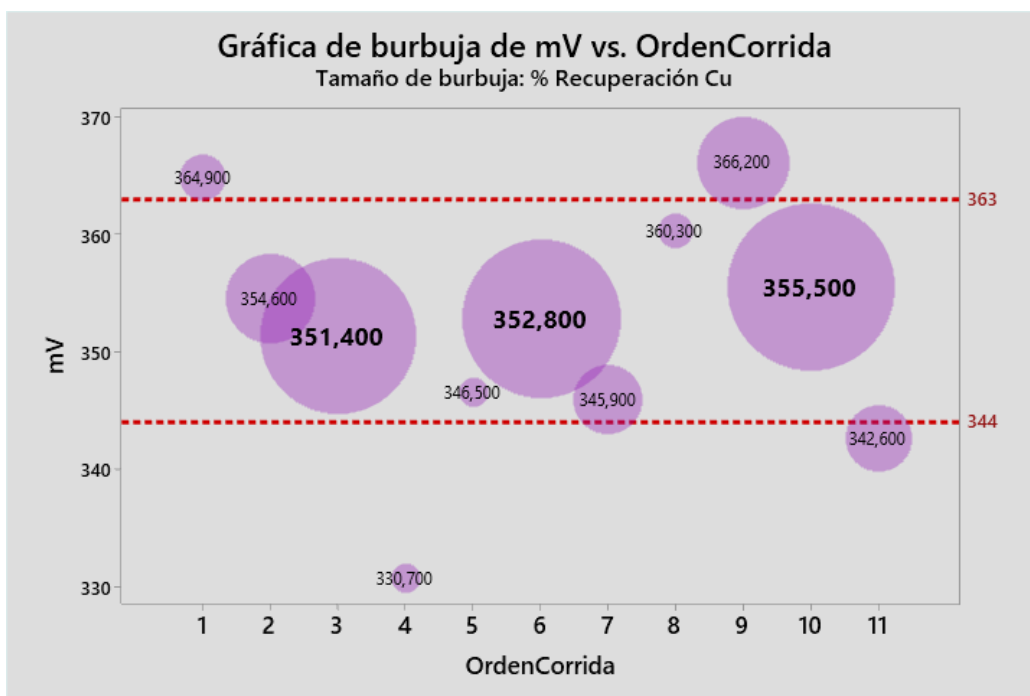
Análisis ORP



Nota: Valores inferiores a 40 mV denotan mayor cantidad de ferrosos en todos los casos.

Figura 32

Influencia del potencial ORP sobre % rec. de cobre



Nota: Mejores recuperaciones de cobre en rango de potencial 344 a 363 mV.

La influencia del pH y ORP sobre recuperación de cobre indicada en la Figura 32 denota que ambas variables no guardan relación significativa con el porcentaje de recuperación del cobre, esto es sustentado con los valores p para cada uno, ambos casos muestran valores muy superiores a 0,05.

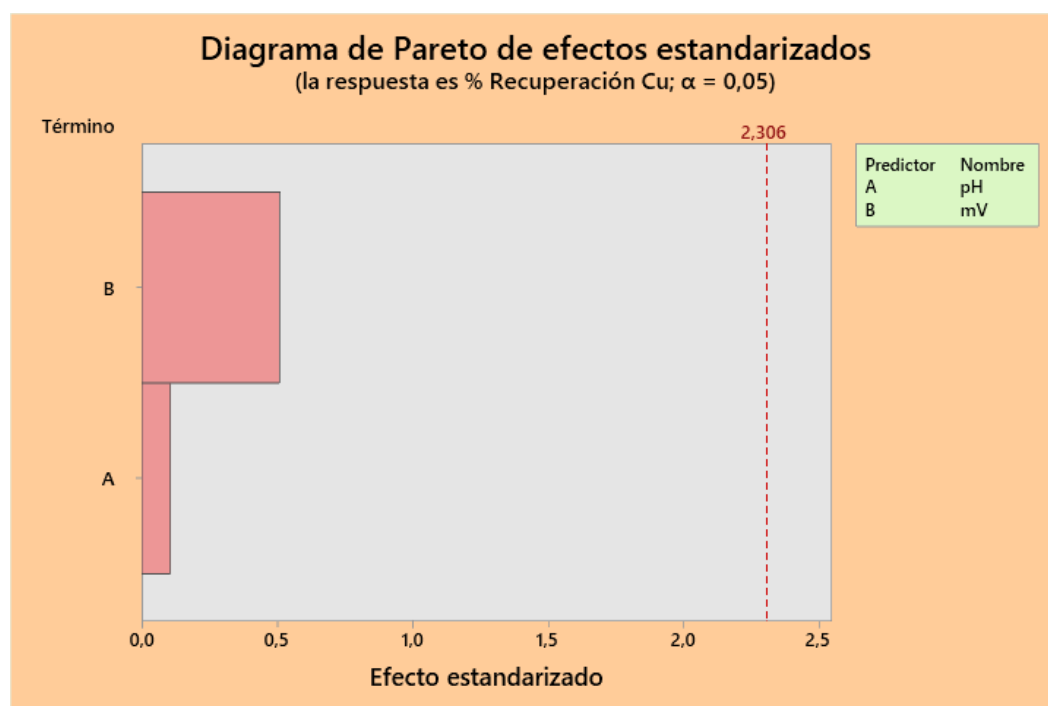
Tabla 19

ANOVA pH-ORP en recuperación de cobre

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	38,62	19,312	0,13	0,880
pH	1	1,70	1,703	0,01	0,917
mV	1	38,44	38,439	0,26	0,625
Error	8	1189,67	148,709		
Total	10	1228,29			

Figura 33

Influencia de pH y ORP en la recuperación de cobre



Nota: Ambas variables no inciden significativamente en la disolución de cobre

4.2. Resumen de resultados

- Lixiviación sin pirita/NaCl: recuperación mínima (1,35%), confirmando la baja solubilidad de calcopirita sin catalizadores.
- Adición de pirita y NaCl: mejora sustancial (hasta 28,8% Cu), con efecto predominante del NaCl y de la interacción pirita-NaCl.
- Ion férrico (Fe^{3+}): mantiene correlación positiva y significativa con la recuperación de Cu ($r=0,848$), confirmando su rol como agente oxidante clave.
- pH y ORP: aunque requieren monitoreo, no muestran incidencia significativa estadística en la recuperación.
- Modelo factorial: evidencia necesidad de incluir términos cuadráticos (efecto de curvatura), con máxima recuperación en valores intermedios de NaCl y pirita.

4.3. Discusión de resultados

Esta sección analiza críticamente los resultados obtenidos, relacionándolos con los objetivos y las limitaciones presentadas en el desarrollo de las pruebas.

4.3.1. Prueba preliminar

La evaluación realizada con materiales de laboratorio improvisados (Figura 15) sirvió para identificar posibles problemas y limitaciones en el procedimiento experimental. La improvisación del baño María con aceite de motor a 80°C y el uso de un vaso de precipitado de 3 litros en lugar de un reactor específico causó la pérdida de muestra por salpicaduras (Figura 17). Este problema se evidenció en la falta de un recipiente sellado y adecuado para la agitación y la inyección de aire.

La solución verdosa obtenida (Figura 16) indicó la presencia de cobre y hierro, pero no se realizó un análisis cuantitativo debido a las deficiencias del método. Estos inconvenientes justificaron el diseño y la construcción del reactor de acero inoxidable (Figura 18) empleado en las pruebas subsecuentes.

4.3.2. Efecto de la adición de pirita y cloruro de sodio

Los resultados del efecto individual y conjunto de la pirita y el cloruro de sodio en la recuperación de cobre son contrastados con el objetivo planteado: *Determinar si existe una relación significativa en la adición de pirita y cloruro de sodio para la recuperación de cobre mediante la lixiviación ácida de concentrado calcopirítico.*

Efecto individual: los resultados de las pruebas con solo pirita y solo cloruro de sodio alcanzaron una recuperación de 1,352 % (Tabla 7).

Efecto conjunto: Los resultados de las 11 pruebas del diseño factorial donde se evalúa la adición combinada de pirita y cloruro de sodio generó un efecto sinérgico en la recuperación de cobre, la recuperación más alta fue de 28,804 % (Tabla 11).

Optimización: Basado en el modelo matemático desarrollado, se identifica que las condiciones óptimas para maximizar la recuperación de cobre son 10 a 20 g/l de cloruro de sodio y valores cercanos a 6 para la relación de pirita y concentrado.

Sin embargo, la viabilidad de estas condiciones en un contexto industrial necesita evaluarse con pruebas complementarias, las condiciones de trabajo expuestas en las limitaciones dejan un margen de incertidumbre al no haber operado con un nivel de agitación más elevado y durante un tiempo más prolongado.

Figura 34

Corrosión en agitador



Nota: El impulsor del agitador alcanzo un nivel de deterioro bastante elevado.

La Figura 34 evidencia que las condiciones de operación son bastante agresivas en un contexto de corrosión, el nivel de deterioro alcanzado estropeó el agitador utilizado en las pruebas de lixiviación, este dato es muy preponderante pues debe ser considerado para pruebas posteriores, debe sopesarse el uso de materiales con propiedades más inertes que el acero inoxidable 316 para la fabricación del vástago y paredes del reactor.

4.3.3. Disolución de hierro

La Tabla 14 muestra que la adición de pirita (FeS_2) contribuye significativamente a la cantidad total de hierro en el PLS en cada prueba, mucho

más que el concentrado de calcopirita (CuFeS_2). Es fundamental aclarar que la cantidad de hierro analizado en el PLS representa el *hierro total* (Tabla 15), el cual incluye las concentraciones de los iones férrico y ferroso. La cantidad de ion férrico disponible para la oxidación del cobre es menor y se determinó indirectamente a partir de la ley de Fe total y ion ferroso en el PLS (Tabla 16).

Análisis de correlación: La Figura 28 muestra un coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0.848$) entre la cantidad de ion férrico y el porcentaje de recuperación de cobre. El intervalo de confianza del 95 % indica una fuerte correlación positiva (Tabla 17), del valor de correlación se desprende, la mayor cantidad de ion férrico es proporcional a una mayor recuperación de cobre.

Ajuste del modelo: La forma de la curva del ajuste cúbico presentada en la Figura 28 sugiere la existencia de un punto óptimo que relaciona directamente la cantidad de ion férrico generado con el porcentaje de cobre obtenido.

4.3.4. Influencia del pH y potencial ORP

Análisis del pH: Todos los valores de la Tabla 18 muestran valores de pH inferiores a 2, lo que indica condiciones altamente ácidas, condición necesaria en la lixiviación de cobre.

Correlación pH-recuperación de cobre: La gráfica de burbuja mostrada en la Figura 30 indica la relación entre el pH y la recuperación de cobre, se denota un rango óptimo para la recuperación de cobre con valores de pH superiores a 1,3 en el PLS resultante.

Análisis del potencial ORP: Todas las mediciones de la Tabla 18 muestran valores de ORP inferiores a 400 mV. En el contexto de la lixiviación de cobre, el significado de ORP bajo en el PLS está relacionado con la presencia de ion ferroso,

una baja lectura de ORP indica la presencia predominante de especies reducidas, como el ion ferroso (Fe^{2+}) que es menos favorable para la oxidación del cobre.

Correlación ORP - recuperación: La Figura 32 ilustra la relación entre el potencial ORP y la recuperación de cobre. La tendencia indica que el rango de potencial ORP óptimo para la recuperación está comprendido entre 344 a 363 mV.

Influencia entre pH y ORP: El análisis de regresión múltiple efectuado indica que el efecto conjunto del pH y el ORP sobre la recuperación de cobre no afecta de forma sinérgica en la disolución de cobre, el análisis de varianza de la Tabla 19 muestra valores muy superiores al valor de significancia (0,05); sin embargo, no se puede desfavorecer el efecto de ambas variables, por el contrario es necesario mantener valores de pH menores a 2 y potenciales ORP superiores a 300 mV para garantizar la disolución del cobre según lo indicado en el diagrama de Pourbaix (Figura 1).

CONCLUSIONES

- La adición de pirita respecto al concentrado tiene una significancia estadística sólida en la recuperación de cobre ($p = 0,021$), al igual que la concentración de cloruro de sodio (NaCl), cuyo efecto también es significativo ($p = 0,000$) lo que confirma la preponderancia de ambos factores en la eficiencia de la recuperación de cobre. La recuperación alcanzada alcanzó un valor de recuperación máximo de 28,804 % mientras que la recuperación obtenida sin la adición de los elementos mencionados alcanzó el valor de 1,352 % obteniéndose un incremento de más de 27 puntos porcentuales. Así, la acción conjunta de la pirita y una concentración controlada de NaCl es fundamental para optimizar la recuperación de cobre en concentrados calcopiríticos, Se determinó el siguiente modelo matemático con un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ (95 % de confianza):

$$\% \text{ Recuperación Cu} = 9,94 - 0,508 \text{ relación Py/conc.} - 0,3098 \text{ NaCl} + 0,02016 \text{ relación Py/conc.} * \text{NaCl} + 22,972 \text{ Pt Ctral.}$$

- La proporción razón pirita-concentrado cercana a 6 contribuye significativamente a mejorar la recuperación de cobre, favoreciendo la disolución del mineral calcopirítico en el proceso de lixiviación ácida. Esto evidencia que la pirita actúa como un agente catalizador o agente reductor que mejora la extracción del cobre al promover la generación de iones Fe^{3+} .
- La concentración óptima de cloruro de sodio (NaCl), en un rango intermedio de 10 a 20 g/l, desempeña un papel crucial en maximizar la recuperación de cobre, mostrando que niveles extremos de NaCl disminuyen la eficacia del proceso.

RECOMENDACIONES

- Realizar más pruebas con la inclusión de más variables, entre ellas variación de la temperatura y niveles más altos de agitación. Esto ayudará a determinar un modelo cuadrático (grado 2) para representar con precisión la relación entre las variables y la recuperación de cobre. La presencia de curvatura significativa ($p = 0.000$) indica que el modelo lineal determinado por sí solo es insuficiente para optimizar la recuperación de cobre.
- Se demostró que la inclusión de pirita y cloruro de sodio incrementa sustancialmente el porcentaje de recuperación de cobre, bajo ese contexto se debe considerar en futuras investigaciones el uso de agua de mar debido al contenido de cloruro de sodio, contenido si se considera que el valor promedio de concentración de cloruro de sodio rodea los 30 g/l en el océano Pacífico (AEDyR, 2020).
- Se demostró las condiciones de extrema corrosión, en ese sentido es muy oportuno utilizar materiales de polipropileno o el PTFE (teflón) para la fabricación del impulsor y para el reactor.
- Se debe resolver la problemática mencionada en las limitaciones del estudio referente a la operatividad de los equipos, esto permitirá evaluar la recuperación con mayor nivel de agitación, idealmente este valor debe alcanzar las 1200 RPM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEDyR. (2020). *Las sales del mar: ¿son todos los mares igual de salados?*
<https://aedyr.com/sales-mar-son-todos-mares-igual-salados/>
- Arrouvel, C., & Eon, J. G. (2018). Understanding the surfaces and crystal growth of pyrite FeS₂. *Materials Research*, 22(1). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-1140>
- Bravo, D. (2016). *Biolixiviación de calcopirita por sulfobacillus acidophilus* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/138434>
- Carneiro, M. F. C., & Leão, V. A. (2007). The role of sodium chloride on surface properties of chalcopyrite leached with ferric sulphate. *Hydrometallurgy*, 87(3–4), 73–82. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2007.01.005>
- Cháidez, J., Parga, J., Valenzuela, J., Carrillo, R., & Almaguer, I. (2019). Leaching chalcopyrite concentrate with oxygen and sulfuric acid using a low-pressure reactor. *Metals*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/met9020189>
- CODELCO. (2018). *LIXIVIACIÓN “El riego.”*
https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf
- Dixon, D., Mayne, D., & Baxter, K. (2012). GALVANOX™ – a novel galvanically-assisted atmospheric leaching technology for copper concentrates. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 47(3), 327–336. <https://doi.org/10.1179/000844308794408317>
- Duque, R. (2014). *Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología.*
- Free, M. (2022). *Hydrometallurgy: Vol. 2nd edition.*
<https://link.springer.com/bookseries/15240>
- Hedrich, S., Kermer, R., Aubel, T., Martin, M., Schippers, A., Barrie Johnson, D., & Janneck, E. (2017). Selective chemical and biological metal recovery from Cu-rich bioleaching solutions. *Solid State Phenomena*, 262 SSP, 107–112. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.262.107>
- Hedrich, S., Kermer, R., Aubel, T., Martin, M., Schippers, A., Johnson, D. B., & Janneck, E. (2018). Implementation of biological and chemical techniques to recover metals from copper-rich leach solutions. *Hydrometallurgy*, 179, 274–281. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.06.012>
- Herreros, O., Bernal, N., Quiroz, R., & Fuentes, G. (2005). Lixiviación de concentrados de cobre utilizando NaCl y el cobre soluble aportado por el propio concentrado. *Revista Metalúrgica de Madrid*.
- Huaracha, J. (2021). *Lixiviación de concentrados flotación de cobre utilizando sales oxidantes férricas y medios clorurantes.*

- Ignatkina, V. A., Bocharov, V. A., Kayumov, A. A., & Aksenova, M. (2017). Flotation activity of pyrite in the separation of massive sulphide ores. *Tsvetnye Metally*, 9, 8–14. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.09.01>
- Jaiswal,), Moharana, A. K., Krishna, & Moon, P. H. R. (2010). Terms and conditions Privacy policy Atomic absorption spectrometry-A review. In *Journal of Forensic Medicine and Toxicology* (Vol. 27, Issue 2). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84455163509&partnerID=40&md5=29dd0c2c4456971d3e8631a62ed118>
- Lagos, G., Joaquín Jara, J., Carlos Salas, J., Alvear, G., Risopatrón, C., Urzúa, O., Reyes, L., Bande, J., Parada, R., & Cariato, J. (2020). *Cobre refinado: Un buen negocio para Chile*.
- Lagos, Hu. (2017). *Lixiviación presurizada a temperatura ambiente de mineral sulfurado de cobre*. <http://hdl.handle.net/11673/22694>
- Lázaro, I., & Jeffrey, M. I. (2006). A rotating disc electrochemical dual autoclave for the study of electrochemistry and leaching at high temperature and pressure. *7º Simposio Internacional Sobre Electroquímica En El Procesamiento de Minerales y Metales*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879908642&partnerID=40&md5=7e18cb92777bffb5b25f394b319df4bb>
- Long, H. zhong, Chai, L. yuan, & Qin, W. qing. (2010). Galena-pyrolusite co-extraction in sodium chloride solution and its electrochemical analysis. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 20(5), 897–902. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(09\)60233-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(09)60233-8)
- Luszczkiewicz, A., Chmielewski, T., & Konieczny, A. (2012). Leaching and flotation of concentrate and middlings in flotation circuits of carbonate - Shale copper ores. *International Mineral Processing Congress*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84879908642&partnerID=40&md5=7e18cb92777bffb5b25f394b319df4bb>
- Machaca, J. (2018). *Lixiviación de concentrados sulfurados de cobre en la planta concentradora Tintaya con oxidantes fuertes FeCl₃ y NaCl*. Universidad Nacional San Agustín.
- Mamani, K. (2018). *Lixiviación de concentrados de cobre en autoclave*. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann.
- Olubambi, P. A., & Potgieter, J. H. (2009). Investigations on the mechanisms of sulfuric acid leaching of chalcopyrite in the presence of hydrogen peroxide. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 30(4), 327–345. <https://doi.org/10.1080/08827500902958191>
- Otterson, D. W. (2015). pH measurement and control basics. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 48(10), 309–312. <https://doi.org/10.1177/0020294015600474>

- Ranjan, P., & Spencer, N. (2013). A unified approach to factorial designs with randomization restrictions. In *Calcutta Statistical Association Bulletin* (Vol. 65).
- Regti, A., Laamari, M. R., Stiriba, S. E., & El Haddad, M. (2017). Use of response factorial design for process optimization of basic dye adsorption onto activated carbon derived from *Persea* species. *Microchemical Journal*, 130, 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.08.012>
- Senanayake, G. (2007). Chloride assisted leaching of chalcocite by oxygenated sulphuric acid via Cu(II)-OH-Cl. *Minerals Engineering*, 20(11), 1075–1088. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.04.002>
- Toro, N., Pérez, K., Saldaña, M., Jeldres, R. I., Jeldres, M., & Cánovas, M. (2020). Dissolution of pure chalcopyrite with manganese nodules and waste water. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(1), 798–805. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.020>
- Uzun, E., Zengin, M., & Atýlgan, Ý. (2016). Improvement of selective copper extraction from a heat-treated chalcopyrite concentrate with atmospheric sulphuric-acid leaching. *Materiali in Tehnologije*, 50(3), 395–401. <https://doi.org/10.17222/mit.2015.091>
- Wang, X. Y., Tian, C., Li, W. C., Ye, L. S., Jin, L. H., & Pan, Y. Z. (2017). Preparation of fine copper powder from waste fine wires via acid leaching-liquid phase reduction. *Xiandai Huagong/Modern Chemical Industry*, 37(11), 132–136. <https://doi.org/10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2017.11.030>
- Zhang, H., Kou, J., Sun, C., Wang, P., Lin, J., Li, J., & Jiang, Y. (2023). Insights into the distribution characteristic changes of leaching solution in the gap between chalcopyrite and passivation layer with polyvinyl pyrrolidone: A molecular view. *Applied Surface Science*, 614. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.156158>
- Zhang, Y., Yu, X., & Li, X. (2012). Kinetics of simultaneous leaching of Ag and Pb from hydrometallurgical zinc residues by chloride. *Rare Metals*, 31(4), 402–409. <https://doi.org/10.1007/s12598-012-0528-1>

ANEXOS

- Análisis de cobre de prueba N°1, CuTot=0,100 g/l

Results						
Sequence No.: 1300				Autosampler Location:		
Sample ID: Sample089				Date Collected: 10/11/20		
Analyst:				Data Type: Original		
Initial Sample Wt:				Initial Sample Vol:		
Analyte Dilution Factor:				Sample Prep Vol:		
Wash Time (before sample): 0				System Dilution Factor:		

Replicate Data: Sample089				Analyte: Cu 324.75		
Repl	SampleConc	StdConc	BlnkCorr	Time	Signal	
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored	
1	0.009	0.009	0.0224	1:19:18 AM	Yes	
2	0.110	0.110	0.0227	1:19:22 AM	Yes	
3	0.100	0.100	0.0225	1:19:25 AM	Yes	
Mean	0.100	0.100	0.0225			
SD:	0.0010	0.0010	0.0001			
%RSD:	1.00%	1.00%	0.66%			

Sequence No.: 1301				Autosampler Location:		
Sample ID: Sample090				Date Collected: 10/11/2		
				11/10/2024 01:21		

- Análisis de cobre de prueba N°2, CuTot=1,442 g/l

Results						
Initial Sample Wt:						Ini
Analyte Dilution Factor:						Sam
Wash Time (before sample): 0						Sys

Replicate Data: Sample090						Ana
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time		S
#	mg/L	mg/L	Signal			S
1	1.441	1.441	0.0283	1:19:37 AM		
2	1.442	1.442	0.0284	1:19:40 AM		
3	1.442	1.442	0.0288	1:19:43 AM		
Mean	1.442	1.442	0.0285			
SD:	0.0020	0.0020	0.0003			
%RSD:	0.139%	0.139%	1.03%			
=====						
Sequence No.: 1302						Auto
Sample ID: Sample091						Date
Analyst:						Data
Initial Sample Wt:						Init
Analyte Dilution Factor:						
Wash Time (before sample): 0						

11/10/2024 01:22

- Análisis de cobre de prueba N°3, CuTot=1,994 g/l

Results					
Sequence No.: 1303					
Sample ID: Sample092					
Analyst:					
Initial Sample Wt:					
Analyte Dilution Factor:					
Wash Time (before sample): 0					
Replicate Data: Sample092					
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	
#	mg/L	mg/L	Signal		
1	1.986	1.986	0.2893	1:20:19 AM	
2	2.000	2.000	0.2912	1:20:22 AM	
3	1.995	1.995	0.2905	1:20:26 AM	
Mean:	1.994	1.994	0.2903		
SD:	0.0069	0.0069	0.0010		
%RSD:	0.34%	0.34%	0.33%		
Method Loaded					
Method Name: Fe - PLS					
Method Description: Fe Totsl - curva larga					
11/10/2024 01:22					

- Análisis de cobre de prueba N°4, CuTot=0,156 g/l

Results					
Analyst:					
Initial Sample Wt:					
Analyte Dilution Factor:					
Wash Time (before sample): 0					
Data Type: Original					
Initial Sample Vol:					
Sample Prep Vol:					
System Dilution Factor:					
Replicate Data: Sample061					
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	Analyte: Cu 324.75
#	mg/L	mg/L	Signal		Signal
1	0.155	0.155	0.0373	1:23:10 AM	Stored
2	0.157	0.157	0.0374	1:23:14 AM	Yes
3	0.155	0.155	0.0372	1:23:17 AM	Yes
Mean:	0.156	0.156	0.0373		
SD:	0.0005	0.0005	0.0001		
%RSD:	0.32%	0.32%	0.23%		
Sequence No.: 405					
Sample ID: Sample062					
Analyst:					
Initial Sample Wt:					
Analyte Dilution Factor:					
Wash Time (before sample): 0					
Autosampler Location:					
Date Collected: 10/12/2024					
Data Type: Original					
Initial Sample Vol:					
Sample Prep Vol:					
System Dilution Factor: 1					
12/10/2024 01:31					

- Análisis de cobre de prueba N°5, CuTot=0,144 g/l

Results						
Sequence No.: 405				Autosampler Location:		
Sample ID: Sample062				Date Collected: 10/11/11		
Analyst:				Data Type: Original		
Initial Sample Wt:				Initial Sample Vol:		
Analyte Dilution Factor:				Sample Prep Vol:		
Wash Time (before sample): 0				System Dilution Factor:		

Replicate Data: Sample062				Analyte: Cu 324.75		
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	Signal	
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored	
1	0.146	0.146	0.0239	1:23:30 AM	Yes	
2	0.146	0.146	0.0239	1:23:34 AM	Yes	
3	0.141	0.141	0.0230	1:23:37 AM	Yes	
Mean:	0.144	0.144	0.0236			
SD:	0.0030	0.0030	0.0005			
%RSD:	2.05%	2.05%	2.05%			
=====						
Sequence No.: 406				Autosampler Location:		
Sample ID: Sample063				Date Collected: 10/11/11		

- Análisis de cobre de prueba N°6, CuTot=2,028 g/l

Results						
Initial Sample Wt:				Initial Sa		
Analyte Dilution Factor:				Sample Pre		
Wash Time (before sample): 0				System Dil		

Replicate Data: Sample063				Analyte: Cu		
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	Signal	
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored	
1	2.028	2.028	0.2569	1:23:55 AM	Yes	
2	2.028	2.028	0.2594	1:23:58 AM	Yes	
3	2.028	2.028	0.2586	1:24:02 AM	Yes	
Mean:	2.028	2.028	0.2583			
SD:	0.0084	0.0084	0.0013			
%RSD:	0.41%	0.41%	0.49%			

Sequence No.: 407				Autosampler		
Sample ID: Blanco				Date Collect		
Analyst:				Data Type: O		
Initial Sample Wt:				Initial Sampl		
Analyte Dilution Factor:				Sample Prep V		
Wash Time (before sample): 0				System Diluti		

- Análisis de cobre de prueba N°7, CuTot=0,241 g/l

Results						
Sequence No.: 744					Autosampler Location	
Sample ID: Sample038					Date Collected: 10/3/2010	
Analyst:					Data Type: Original	
Initial Sample Wt:					Initial Sample Volume	
Analyte Dilution Factor:					Sample Prep Volume	
Wash Time (before sample): 0					System Dilution Factor	

Replicate Data: Sample038					Analyte: Cu 324.75	
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	Signal	
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored	
1	0.242	0.242	0.2400	11:03:44 PM	Yes	
2	0.241	0.241	0.2413	11:03:47 PM	Yes	
3	0.241	0.241	0.2412	11:03:51 PM	Yes	
Mean:	0.241	0.241	0.2408			
SD:	0.0046	0.0046	0.0007			
%RSD:	1.91%	1.91%	0.29%			
=====						
Sequence No.: 745					Autosampler Location	
Sample ID: Sample039					Date Collected: 10/3/2010	
Analyst:					Data Type: Original	
Initial Sample Wt:					Initial Sample Volume	

- Análisis de cobre de prueba N°8, CuTot=0,062 g/l

Sequence No.: 219	Autosampler
Sample ID: Sample080	Date Collected
Analyst:	Data Type
Initial Sample Wt:	Initial Sample Volume
Analyte Dilution Factor:	Sample Preparation
Wash Time (before sample): 0	System Dilution

Replicate Data: Sample080				Analyte: Cu	
Repl	SampleConc	StdConc	BlkCorr	Time	Signal
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored
1	0.063	0.063	0.0103	1:09:47 AM	Yes
2	0.061	0.061	0.0100	1:09:50 AM	Yes
3	0.062	0.062	0.0101	1:09:54 AM	Yes
Mean:	0.062	0.062	0.0101		
SD:	0.0010	0.0010	0.0002		
%RSD:	1.69%	1.69%	1.69%		

- Análisis de cobre de prueba N°9, CuTot=1,556 g/l

Results

Replicate Data: Sample094

Repl	SampleConc	StndConc	BlkCorr	Time	Signal	Stored
#	mg/L	mg/L	Signal			
1	1.519	1.519	0.2387	12:57:20 AM	Yes	
2	1.567	1.567	0.2458	12:57:24 AM	Yes	
3	1.581	1.581	0.2480	12:57:27 AM	Yes	
Mean:	1.556	1.556	0.2441			
SD:	0.0322	0.0322	0.0049			
%RSD:	2.07%	2.07%	1.99%			

- Análisis de cobre de prueba N°10, CuTot=2,240 g/l

Results

Analyte Dilution Factor: Sample Pr
Wash Time (before sample): 0 System Di

Replicate Data: Sample095

Repl	SampleConc	StndConc	BlkCorr	Time	Signal	Stored
#	mg/L	mg/L	Signal			
1	2.241	2.241	0.1998	12:57:47 AM	Yes	
2	2.240	2.240	0.1996	12:57:50 AM	Yes	
3	2.240	2.240	0.1989	12:57:54 AM	Yes	
Mean:	2.240	2.240	0.1994			
SD:	0.0028	0.0028	0.0004			
%RSD:	0.13%	0.13%	0.22%			

- Análisis de cobre de prueba N°11, CuTot=0,225 g/l

Results						
Initial Sample Wt:				Initial Sa		
Analyte Dilution Factor:				Sample Pre		
Wash Time (before sample): 0				System Dil		
Replicate Data: Sample096				Analyte: Cu		
Repl	SampleConc	StndConc	BlnkCorr	Time	Signal	
#	mg/L	mg/L	Signal		Stored	
1	0.252	0.252	0.0409	12:58:10 AM	Yes	
2	0.218	0.218	0.0353	12:58:13 AM	Yes	
3	0.206	0.206	0.0384	12:58:16 AM	Yes	
Mean:	0.225	0.225	0.0365			
SD:	0.0243	0.0243	0.0039			
%RSD:	10.79%	10.79%	10.73%			

