

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO DEL USO DE CLORURO DE POTASIO EN LA
TOSTACIÓN DE CONCENTRADO CALCOPIRÍTICO
PARA MEJORAR LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN**

TESIS

Presentada por:

Bach. Duvali Ruth Villena Paco

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2025

Hoja de jurados

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO DEL USO DE CLORURO DE POTASIO
EN LA TOSTACIÓN DE CONCENTRADO
CALCOPIRÍTICO PARA MEJORAR
LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN**

Trabajo sustentado y aprobado el día viernes, 12 de diciembre de 2025, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE

.....
Dr. Freddy Felipe Cori Nina

SECRETARIO

.....
MSc. Daniel Jesús Zevallos Ramos

VOCAL

.....
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR

.....
Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

Certificado de similitud

CERTIFICADO DE SIMILITUD

YO, MATIAS CARLOS VIVAR COLQUICOCHA, en mi condición de asesor, acreditado por resolución de Facultad N° 9833-2025 FAIN/UNJBG, de la tesis titulado **“ESTUDIO DEL USO DE CLORURO DE POTASIO EN LA TOSTACIÓN DE CONCENTRADO CALCOPIRÍTICO PARA MEJORAR LA CINÉTICA DE LIXIVIACIÓN”** presentado por el Bachiller: **DUVALI RUTH VILLENA PACO**.

Para optar el título de Ingeniero Metalurgista, habiendo cumplido con el reglamento de originalidad y 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 que es de 5 por ciento. Por lo que **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciada líneas arriba, la cual está expedita para continuar con los trámites para la obtención del título profesional de **Ingeniero Metalurgista**, consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente documento para que continúe con los trámites respectivos para su publicación.



Firma del asesor

Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha

D.N.I. 08622167



Firma del Titulante

Bach. Duvali Ruth Villena Paco

D.N.I. 72859129



Dedicatoria

A mis padres, Don Flavio Villena Figueroa y Doña Eugenia Lucia Paco Bautista, por formarme en valores, por su apoyo y siempre mostrarme que una nunca deja de aprender como los grandes maestros que son; a mi hermana siempre escucharme; a mi prometido, Edwin Vizcarra, por mostrarme que en la vida una debe tomar siempre las oportunidades, por ser mi amigo, por cuidarme, por ayudarme a abrir mis horizontes y ser alguien a quien pueda admirar; y a mi compañero Erick por brindarme sus consejos y apoyo.

Agradecimiento

A mis amados padres, Don Flavio Villena Figueroa y Doña Eugenia Lucia Paco Bautista, por ser los pilares inquebrantables de mi vida, su sacrificio constante y las innumerables lecciones de vida que me han inculcado. Esto es un testimonio de su fe en mí y de todo lo que me han enseñado.

A ti, Edwin Vizcarra, mi compañero de vida, por tu paciencia infinita, tu comprensión y tu amor inquebrantable durante este desafiante proceso. Gracias por sostenerme, por creer en mi capacidad y por celebrar cada pequeño avance.

Al Dr. Matías Carlos Vivar Colquicocha, mi asesor de tesis, por su invaluable guía, y dedicación. Gracias por su confianza, por sus comentarios precisos y por el tiempo invertido en mi formación, fue un mentor que me enseñó a creer en la calidad de mi trabajo."

Contenido

Hoja de jurados	ii
Certificado de similitud.....	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Contenido	vi
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xi
Resumen.....	xii
Abstract	xiii
Introducción	14
Capítulo I: El problema de Investigación.....	15
1.1. Antecedentes	15
1.1.1. Reseña histórica de lixiviación de concentrados.....	15
1.2. Identificación y formulación del problema de investigación.....	15
1.2.1. Innovación de procesos metalúrgicos	15
1.2.2. Riesgos asociados a la producción de cobre mediante fundición .	16
1.2.3. Tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre	17
1.2.4. Aplicación de sales cloruradas en tostación.....	18
1.2.5. Hidrometalurgia vs Pirometalurgia.....	18
1.2.6. Planteamiento del problema general	22
1.2.7. Problemas específicos	22
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	23
1.3.1. Justificación técnica	23
1.3.2. Justificación ambiental.....	24
1.3.3. Justificación social	25
1.3.4. Justificación metodológica.....	26
1.3.5. Importancia	26
1.4. Objetivos	27

1.4.1.	Objetivo general	27
1.4.2.	Objetivos específicos	27
1.5.	Hipótesis.....	27
1.5.1.	Hipótesis general	27
1.5.2.	Hipótesis específicas	28
1.6.	Variables	28
1.6.1.	Identificación de las variables	28
1.6.2.	Caracterización de las variables	29
1.6.3.	Definición operacional de las variables	29
1.7.	Limitaciones de la investigación.....	30
1.7.1.	Alcance específico	30
1.7.2.	Uso de equipos de protección personal.....	31
1.7.3.	Uso de equipos de laboratorio propios.....	32
1.7.4.	Cantidad de concentrado disponible	32
1.8.	Descripción de las características de la investigación.....	33
Capítulo II: Marco teórico.....		34
2.1.	Antecedentes del estudio.....	34
2.1.1.	Antecedentes locales	34
2.1.2.	Antecedentes nacionales	36
2.1.3.	Antecedentes internacionales	38
2.2.	Bases teóricas	40
2.2.1.	Importancia del cobre como recurso mineral.....	40
2.2.2.	Cambios realizados	42
2.2.3.	Cloruro de potasio (KCl).....	43
2.2.4.	Principales minerales de cobre: calcopirita, calcocita y covelita..	47
2.2.5.	Descripción de la piro-metalurgia: fundición y conversión.....	50
2.2.6.	Principios y métodos de lixiviación	55
2.2.7.	Modelos cinéticos de lixiviación.....	58
2.2.8.	Factores que afectan la cinética de lixiviación: tiempo, temperatura, porcentaje de sólido	60

2.2.9. Proceso de tostación de sulfuros (calcopirita-calcocita) y su objetivo en la metalurgia	61
Capítulo III: Marco metodológico	64
3.1. Caracterización del diseño de investigación	64
3.1.1. Tipo y diseño de la investigación.....	64
3.1.2. Nivel de investigación.....	65
3.1.3. Diseño de la Investigación	66
3.1.4. Diseño de los experimentos	67
3.1.5. Ejecución de experimentos	68
3.1.6. Redacción de tesis	79
3.2. Materiales e instrumentos	79
3.2.1. Material de laboratorio.....	79
3.2.2. Equipos de seguridad	80
3.2.3. Insumos químicos	80
3.3. Población y muestra	81
3.3.1. Población.....	81
3.3.2. Muestra.....	81
3.4. Tratamiento de datos	81
Capítulo IV: Resultados y discusión	83
4.1. Caracterización del concentrado	83
4.1.1. Análisis Químico.....	83
4.1.2. Porcentaje de humedad	84
4.2. Lixiviación de concentrados	86
4.2.1. Análisis de cobre por absorción atómica	86
4.3. Análisis del diseño factorial	89
4.3.1. Análisis de varianza	89
4.3.2. Ecuación de regresión obtenido	91
4.3.3. Influencia individual de los factores	92
4.3.4. Combinación de variables más significativas	93
4.3.5. Análisis de la superficie de respuesta.....	94

4.3.6. Contrastación de la técnica aplicada	95
4.4. Discusión de resultados.....	97
Conclusiones	99
Recomendaciones.....	100
Referencias.....	102

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Cuadro comparativo: hidrometalurgia vs pirometalurgia del cobre</i>	21
Tabla 2 <i>Operacionalización de variables</i>	30
Tabla 3 <i>Resumen de las propiedades fisicoquímicas del KCl</i>	46
Tabla 4 <i>Ventajas y desventajas de la piro-metalurgia</i>	52
Tabla 5 <i>Medios lixiviantes</i>	57
Tabla 6 <i>Comparación de métodos de tostación</i>	63
Tabla 7 <i>Resumen del diseño factorial fraccionado</i>	67
Tabla 8 <i>Parámetros experimentales de las corridas</i>	68
Tabla 9 <i>Pesos de sólidos</i>	70
Tabla 10 <i>Características de la solución lixiviante</i>	73
Tabla 11 <i>Leyes de cobre obtenidos</i>	87
Tabla 12 <i>Porcentajes de recuperación de cobre</i>	88
Tabla 13 <i>Análisis de varianza</i>	89
Tabla 14 <i>Resumen del modelo de regresión</i>	91

Índice de figuras

Figura 1 <i>Reservas mundiales de cobre 2023</i>	41
Figura 2 <i>Reservas de cobre a nivel departamento</i>	42
Figura 3 <i>Cristal de Cloruro de Potasio</i>	45
Figura 4 <i>Calcopirita</i>	48
Figura 5 <i>Calcocita</i>	49
Figura 6 <i>Covelita</i>	50
Figura 7 <i>Tratamiento para obtener cobre a partir de minerales sulfurados</i>	54
Figura 8 <i>Velocidad de disolución del cobre expuestas al ácido sulfúrico</i>	55
Figura 9 <i>Lixiviación</i>	58
Figura 10 <i>Modelo núcleo sin reaccionar</i>	59
Figura 11 <i>Preparación del concentrado</i>	69
Figura 12 <i>Pesado de reactivos sólidos</i>	71
Figura 13 <i>Tostación del concentrado</i>	72
Figura 14 <i>Preparación de solución ácida</i>	74
Figura 15 <i>Control de agitación</i>	75
Figura 16 <i>Proceso de filtración</i>	76
Figura 17 <i>Muestras post-filtración</i>	76
Figura 18 <i>Dilución de PLS</i>	77
Figura 19 <i>Análisis por absorción atómica</i> Nota. El equipo de absorción atómica (EAA) corresponde a la marca Shimadzu, modelo AA-6300.....	78
Figura 20 <i>Contenido metálico del concentrado</i>	83
Figura 21 <i>Concentrado húmedo</i>	84
Figura 22 <i>Humedad del concentrado</i>	85
Figura 23 <i>Captura de pantalla de resultados de absorción atómica</i>	86
Figura 24 <i>Diagrama de Pareto</i>	90
Figura 25 <i>Efectos individuales de las variables</i>	92
Figura 26 <i>Análisis de contorno</i>	93
Figura 27 <i>Superficie de respuesta del % de recuperación</i>	94
Figura 28 <i>Contraste visual de soluciones obtenidas</i>	96

Resumen

La presente investigación propuso y evaluó un tratamiento hidrometalúrgico para la lixiviación de concentrados calcopiríticos al combinar tostación con cloruro de potasio (KCl) a temperaturas inferiores a 600 °C y lixiviación ácida, como alternativa técnica y ambiental a la ruta pirometalúrgica convencional de fundición y conversión, procesos caracterizados por su elevados costos energéticos y emisiones de gases sulfurosos.

Para abordar este objetivo, se desarrolló un estudio experimental cuantitativo de corte transversal, estructurado en un diseño factorial fraccionado, en el cual la recuperación de cobre constituyó la variable de respuesta. Como variables independientes se evaluaron el porcentaje de sólidos, el tiempo de agitación, la relación concentrada/KCl y la acidez del lixivante.

Los resultados muestran que la tostación clorurante facilitó la disolución de cobre y aceleró la cinética proceso. Asimismo, el porcentaje de sólidos emergió como el factor dominante y la relación C/KCl aportó un efecto positivo adicional, evidenciándose una interacción entre ambos factores. En contraste, la acidez y el tiempo presentaron efectos menores. Las mejores extracciones de cobre se alcanzaron con porcentajes de sólidos cercanos al 19–20 % y relaciones concentrado/KCl de 4,5 y 5.

La investigación proporciona una base técnica para optimizar la lixiviación de concentrados calcopiríticos mediante tostación con KCl y establece criterios para su futura escala industrial.

Palabras claves: tostación, lixiviación clorurada, concentrado de cobre, calcopirita, hidrometalurgia, pirometalurgia, sulfuro de cobre.

Abstract

The present research proposes and explores a hydrometallurgical treatment for the leaching of chalcopyrite concentrates by combining roasting with potassium chloride (KCl) below 600 °C and acid leaching, as a technical and environmental alternative to the conventional pyrometallurgical route involving smelting and converting—processes characterized by high energy costs and sulfurous gases gas emissions. To address this challenge, a quantitative, cross-sectional experimental study was carried out using a fractional factorial design, where copper recovery was the response variable. Independent variables included factors such as solids percentage, agitation time, concentrate/KCl ratio, and leachant acidity.

The results show that chloridizing roasting enables copper dissolution and accelerates the kinetics, while the solids percentage emerges as the dominant factor and the C/KCl ratio provides an additional positive effect, with interaction between both; in contrast, acidity and time show minor effects. The best extractions occur at around 19–20% solids and a concentrate/KCl ratio of 4.5–5. This research provides a technical basis for optimizing the leaching of chalcopyrite concentrates through KCl roasting and outlines criteria for its future industrial-scale application.

Keywords: Roasting, Chloride leaching, Copper concentrate, Chalcopyrite, Hydrometallurgy, Pyrometallurgy, Copper sulfide

Introducción

El cobre sostiene la electrificación, posibilita la transición energética desde combustibles fósiles hacia fuentes menos contaminantes y constituye un metal estratégico para la infraestructura moderna. Sin embargo, su obtención depende mayoritariamente del procesamiento pirometalúrgico de sulfuros de cobre, un esquema eficiente a gran escala, pero intensivo en demanda energética y generador de emisiones reguladas, como los gases sulfurosos.

En ese contexto, la combinación de tostación con la adición de sales cloruradas se perfila como un pretratamiento promisorio para la aplicación de rutas hidrometalúrgicamente en el tratamiento de concentrados de cobre.

Los criterios evaluados en la presente tesis demuestran la posibilidad de emplear procesos hidrometalúrgicos para el tratamiento de concentrados calcopiríticos para la obtención de soluciones concentradas de cobre. A la luz de los resultados obtenidos, resulta promisorio la aplicación de la tostación como etapa previa a la lixiviación clorurada de concentrados calcopiríticos. Asimismo, los hallazgos del trabajo justifican la realización de pruebas complementarias destinados a la optimización de la técnica propuesta antes de su eventual escalamiento industrial.

En consecuencia, la presente tesis se centra en determinar el efecto de la tostación con cloruro de potasio(KCl) sobre la cinética de lixiviación de un concentrado calcopirítico.

Capítulo I: El problema de Investigación

1.1. Antecedentes

1.1.1. Reseña histórica de lixiviación de concentrados

El inicio de investigaciones hidrometalúrgicas para el tratamiento de concentrados de cobre inicia en los años 60 el siglo pasado con la aplicación de Bureau of Mines de EE. UU. con la lixiviación de concentrados calcopiríticos con ácido clorhídrico para la recuperación de azufre sin la formación de dióxido de azufre (SO_2), gas formado en la fundición de los concentrados.

1.2. Identificación y formulación del problema de investigación

1.2.1. Innovación de procesos metalúrgicos

El 80 % de la producción mundial de cobre se sustenta en la refinación del mineral cúprico a través de procesos de flotación, fundición y refinación, los cuales emplean menas sulfuradas con leyes marginales que oscilan entre el 0,5 % y 2 % de cobre. Esta situación implica la necesidad de procesar mayores volúmenes cada vez mayores de mineral para satisfacer la creciente demanda de este metal. Entre las principales especies sulfuradas presentes en dichas menas se destacan la calcopirita, bornita y calcosina (Luca, 2019).

Se ha generado una creciente necesidad de desarrollar nuevos procedimientos metalúrgicos orientados a reducir el impacto ambiental asociado al tratamiento de menas sulfuradas de cobre. Actualmente, la producción de cobre refinado se basa en el procesamiento de concentrados mediante los procesos de fundición y conversión, los cuales presentan el inconveniente de producir contaminantes que requieren un adecuado control y tratamientos, como es el caso de los gases sulfurosos. Asimismo, el fortalecimiento de la regulación y fiscalización ambiental, a través de normativas cada vez más estrictas, conlleva costos significativos asociados a la implementación de tecnologías, equipos y sistemas necesarios para el manejo y disposición de los residuos generados.

En este contexto, la implementación de procesos hidrometalúrgicos, como la lixiviación de concentrados, debe ser promovida por instituciones del Estado, universidades y empresas vinculadas a la extracción de cobre. Es fundamental desarrollar estudios exhaustivos sobre este tema, considerando que el Perú se posiciona como uno de los principales productores de este metal a nivel mundial. De acuerdo con información oficial del Estado peruano, el país ocupa el segundo lugar en la producción mundial de cobre (Gobierno del Perú, 2024).

1.2.2. Riesgos asociados a la producción de cobre mediante fundición

Luca (2019), en un boletín de percepción de riesgos en la fundición de cobre elaborado por 3M, señala que la emisión aérea de contaminantes particulados en suspensión (diámetro menor a 2,5 μm), tales como partículas finas con diámetros menores a 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) y partículas con diámetros menores a 10 μm (PM_{10}), generadas durante el procesamiento de menas de cobre mediante fundición, puede generar diversos efectos adversos sobre la salud, entre los cuales se incluyen:

- Dióxido de azufre: Irritación de vías respiratorias y ojos, asma, edemas pulmonares.
- Arsénico: Dermatitis alérgica, irritación de vías respiratorias y ojos, daños al sistema nervioso, problemas cardiovasculares, cáncer de pulmón, riñón, piel, hígado y vejiga.
- Cadmio: Irritación de vías respiratorias y ojos, dolores de cabeza, mareos, síntomas parecidos a la gripe, lesiones renales, daño óseo, alteración de la fertilidad, cáncer asociado a pulmón, riñón y próstata
- Cobre: Problemas gastrointestinales por exposición prolongada y consumo de este elemento en agua potable.
- Plomo: Anemia, enfermedades hepáticas, renales y pulmonares, esterilidad, problemas gastrointestinales, problemas de desarrollo neurológicos.
- Mercurio: Daños al sistema nervioso, problemas gastrointestinales, anemia y problemas renales.

1.2.3. Tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre

Uceda (2016) refiere que desde hace varias décadas se ha investigado la búsqueda de procesos metalúrgicos alternativos al tratamiento convencional de concentrados de cobre, que implica comprender las etapas de fundición, conversión y electrorefinación. En este tratamiento hidrometalúrgico de concentrados se ha focalizado principalmente en la lixiviación de concentrados calcopirítricos, con el objetivo de obtener como producto principal el cobre metálico y, como subproductos, metales preciosos. Asimismo, destaca la aplicación de procesos químicos y biológicos para la obtención de cobre a partir de concentrados sulfurados.

No obstante, persiste el desafío asociado a la formación de capas pasivas de azufre sobre la superficie de la calcopirita, las cuales limitan el humedecimiento del mineral por la solución lixiviante y restringen la cinética de disolución.

Asimismo, se ha observado que el tratamiento de concentrados mediante lixiviación se ve beneficiado por la oxidación a presión del concentrado, lo que genera un exceso de ácido sulfúrico que puede utilizarse para disolver el óxido de cobre formado.

Por otra parte, **se ha observado** que el tratamiento de concentrados mediante lixiviación **se ve favorecido** por la oxidación a presión del concentrado, proceso que **genera** un exceso de ácido sulfúrico, el cual **puede ser utilizado** para disolver el óxido de cobre formado.

1.2.4. Aplicación de sales cloruradas en tostación

Narangarav et al. (2022) analizan la aplicación de tratamientos alternativos para la tostación de concentrados sulfurados de cobre y mencionan que el uso de sales cloruradas, tales como KCl, NaCl, CaCl₂ y NH₄Cl, seguido de una etapa de lixiviación ácida, constituye una alternativa altamente promisorio. Bajo condiciones ideales, estos autores reportan recuperaciones de cobre de hasta 96,2 %. Asimismo, destacan el empleo de cloruro de potasio (KCl) frente a otras sales, debido a que requiere menos tiempo para alcanzar temperatura de reacción necesaria para la formación de sulfatos y cloruros, pueden ser posteriormente procesados mediante lixiviación.

1.2.5. Hidrometalurgia vs Pirometalurgia

El proceso pirometalúrgico se considera actualmente el método más común para refinación de cobre a partir de minerales sulfurados, siendo la calcopirita la principal fuente de este metal. En este contexto, Mokmeli y Parizi (2022) reportan los resultados

de evaluaciones técnicas y económicas orientadas a comparar rutas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas para el procesamiento de este tipo de minerales.

Desde el punto de vista técnico, la evaluación de 100 toneladas de mineral de baja ley en una planta piloto de flotación permitió alcanzar concentrados con leyes de cobre entre 23,3 % y 19,6 %, con recuperaciones entre 90,9 % y 78,1 %. En contraste, el tratamiento hidrometalúrgico de 40 000 toneladas del mismo mineral alcanzó una recuperación de 32,6 % de cobre tras 326 días de operación. Bajo estas condiciones, el proceso pirometalúrgico presentó un menor costo operativo, siendo aproximadamente 1,4 veces más económico que el procesamiento hidrometalúrgico. En ambos casos, se asumió la disponibilidad de instalaciones de extracción por solvente (SX), electro-obtención (EW), fundición y electro-refinación.

Sin embargo, al incrementar la capacidad del procesamiento a 3 000 000 de toneladas de mineral por año, el elevado costo de capital asociado al proceso pirometalúrgico resultó hasta diez veces mayor que el del proceso hidrometalúrgico, favoreciendo a este último, especialmente bajo tasas de interés superiores al 27,5 %. Por el contrario, a tasas de interés más bajas y con un precio de mercado del cobre de US\$ 9 500 por tonelada, el proceso pirometalúrgico resulta más viable económicamente. En un escenario hipotético en el que el precio del cobre descienda a US\$ 6 000 por tonelada, el procesamiento hidrometalúrgico resultaría más ventajoso, incluso con tasas de interés superiores al 22,4 %, logrando una recuperación del 31 % de cobre, frente a una recuperación del 79 % correspondiente al proceso pirometalúrgico.

Por su parte, J. Liu et al. (2025) presentan una revisión bibliográfica sobre la generación de escoria en el procesamiento pirometalúrgico de cobre y sus posibles aplicaciones, así como una comparación entre la pirometalurgia y la hidrometalúrgica.

Según lo expuesto en la Tabla 1, la hidrometalurgia permite procesar menas de baja ley y se considera relativamente más ecológica, ya que evita la generación directa de grandes volúmenes de escoria y posibilita la obtención de cátodos de alta pureza. Sin embargo, esta ruta implica procesos más lentos, múltiples etapas de separación y la necesidad de un control riguroso de las soluciones y efluentes líquidos. En cambio, la pirometalurgia, que sigue la ruta dominante para concentrados de sulfuros de cobre, aporta con la mayor parte del cobre refinado a nivel mundial, caracterizándose por altos volúmenes de producción, a costa de generar grandes cantidades de escoria, un mayor impacto ambiental asociados a emisiones y residuos sólidos, y un elevado consumo energético debido requiere operar a altas temperaturas, con un significativo consumo energético.

Tabla 1*Cuadro comparativo: hidrometalurgia vs pirometalurgia del cobre*

Aspecto	Hidrometalurgia del cobre	Pirometalurgia del cobre
Flujo principal del proceso	Lixiviación → extracción por solventes → electroobtención (electrowinning) de cátodos de cobre.	Concentración → fusión → conversión → refinado pirometalúrgico para producir cobre blister y luego cátodos. Genera grandes volúmenes de escoria de cobre.
Tipo de mineral / ley	Más adecuada para menas de baja ley y materias primas con múltiples impurezas (incluyendo algunos residuos y escorias). La lixiviación puede ser selectiva.	Es la ruta dominante para concentrados de sulfuros convencionales, históricamente de mayor ley. Alrededor del 80 % del cobre refinado mundial se produce por esta vía.
Ventajas clave	Proceso considerado relativamente más amigable con el ambiente (no hay gases de combustión). Permite producir directamente cátodos de alta pureza mediante electroobtención.	Tecnología madura y ampliamente implementada a escala industrial; alto volumen de producción. Alta eficiencia de fundición y gran capacidad de tratamiento por unidad de tiempo.
Desventajas clave	Los procesos de lixiviación y separación suelen ser lentos (ciclos largos), lo que reduce la capacidad de producción o throughput. Requiere varias etapas de separación/purificación, lo que incrementa costos y complejidad operativa. El tratamiento de soluciones y efluentes líquidos es crítico para evitar impactos ambientales.	Genera grandes volúmenes de escoria de cobre que ocupan terreno y pueden liberar metales al ambiente. Se considera menos amigable ambientalmente, debido a las emisiones y la cantidad de residuos sólidos. Requiere altas temperaturas y, por tanto, un consumo energético significativo.
Desempeño ambiental	Descrita como “relativamente ecológica” para cobre, porque puede evitar la generación de escorias de fundición y se adapta bien a menas de baja ley, aunque sigue exigiendo buen control de efluentes.	La pirometalurgia es de alta producción; sin embargo, "es poco respetuosa con el medio ambiente " por la gran cantidad de escoria y posibles emisiones asociadas.

Nota. Elaboración propia.

1.2.6. Planteamiento del problema general

La investigación pretende establecer una conexión clara entre el tratamiento previo de los concentrados de cobre mediante tostación controlada con cloruro de potasio y el mejoramiento de la recuperación de cobre mediante el proceso de lixiviación. Al abordar este tema, se espera contribuir en el desarrollo de tecnología más sostenible en la metalurgia del cobre, el presente trabajo pretende establecer datos técnicos que ayuden al tratamiento hidrometalúrgico de concentrados de cobre calcopiríticos.

La siguiente pregunta de investigación proporcionará un marco sólido para orientar el estudio abarcando aspectos técnicos como la influencia del pretratamiento térmico, la acción clorurante de la sal utilizada y la cinética de lixiviación de la calcopirita.

¿Cómo influye la tostación con cloruro de potasio en la eficiencia de la cinética de la lixiviación de concentrados de calcopirita para maximizar la recuperación de cobre?

1.2.7. Problemas específicos

A fin de detallar la forma como será abordado el cuestionamiento planteado, desglosaremos el problema general en dos específicos, siendo estos:

¿Cuál es la influencia del concentrado calcopirítico tostado a 600 °C mezclado con cloruro de potasio en la recuperación de cobre en el proceso de lixiviación?

¿Cómo influyen las variables predictoras porcentaje de sólidos, relación concentrada/cloruro de potasio, tiempo de agitación y acidez de la solución lixivante en la recuperación del cobre del concentrado calcopirítico tostado y mezclado con cloruro de potasio?

1.3. Justificación e importancia de la investigación

1.3.1. Justificación técnica

La elevada demanda de cobre, en el contexto de cambio de matriz energética donde se busca reemplazar la generación de energía a partir de combustibles fósiles, así como la recurrencia de procesar cada vez más minerales sulfurados de cobre de baja ley, han creado la necesidad de crear métodos de procesamiento alternativos que sean más eficientes y menos perjudiciales para el medio ambiente. La producción convencional de concentrados de cobre produce contaminantes significativos y conlleva altos costos de manejo de residuos, lo que presenta desafíos económicos y regulatorios. La lixiviación de concentrados con tostación controlada surge como una alternativa prometedora para incrementar la obtención de cobre mientras se mantiene un impacto ambiental más positivo y dentro de las regulaciones ambientales.

La viabilidad técnica de adoptar la lixiviación con tostación controlada como una alternativa al proceso convencional, pretende presentar un enfoque innovador que responda a la creciente demanda de cobre de minerales con menor ley y a la necesidad de implementar prácticas más sostenibles en la industria metalúrgica.

Asimismo, al disminuir la generación de contaminantes asociados a la fundición convencional de concentrados, se reduce la carga económica asociada al cumplimiento de las normativas ambientales, lo que puede resultar en un ahorro en costos operativos y en una mayor competitividad para el sector metalúrgico.

1.3.2. Justificación ambiental

La pirometalurgia de concentrados de cobre requiere alcanzar temperaturas superiores a 1 200 °C, a esta temperatura existe liberación considerable de gases sulfurosos como el dióxido de azufre (SO₂). Esta emisión representa un importante desafío ambiental, ya que de las operaciones que no cuentan con sistemas de captación eficientes de estos gases, contribuyen a la contaminación atmosférica causando efectos perjudiciales para la salud humana y el entorno. La gestión y control de estos gases son cruciales para cumplir con los rigurosos estándares establecidos por los organismos reguladores, lo que implica la necesidad de inversiones significativas en tecnología y equipos destinados a la captación y tratamiento de emisiones conllevando a un impacto económico añadido para las empresas del sector.

Por otro lado, la inclusión de la tostación del concentrado calcopirítico con cloruro de potasio ofrece una alternativa prometedora para enfrentar estos problemas ambientales. Este método opera a temperaturas mucho más bajas, alrededor de 600 °C, lo que permite evitar la formación de gases sulfurosos durante el proceso contribuyendo a un proceso más sostenible y respetuoso con el medio ambiente.

Esto resalta la importancia de adoptar tecnologías que respondan no solo a las exigencias económicas, sino que también se alineen con los objetivos de sostenibilidad y protección ambiental, convirtiendo a la tostación con cloruro de potasio en una alternativa viable y necesaria para la extracción de cobre.

1.3.3. Justificación social

El uso de sal clorurada en la tostación previa a la lixiviación de concentrados representa una tecnología sostenible en la obtención de cobre, esta nueva metodología tiene el potencial de cambiar de manera significativa los aspectos negativos vinculados al tratamiento pirometalúrgico convencional. En la actualidad, numerosos sectores de la población se oponen a la apertura de nuevos proyectos mineros de cobre, en gran medida debido a la percepción errónea de que los métodos tradicionales, como la fundición y conversión, producen emisiones dañinas y residuos que afectan la calidad del aire perjudicando la salud de las personas.

El estudio de este enfoque más sostenible en el procesamiento de concentrados de cobre puede ayudar a sustentar la implementación de tecnología que minimice las emisiones contaminantes y reduzcan el impacto ambiental, mostrando que existen alternativas viables que priorizan tanto la recuperación de recursos como el cobre, así como la priorización de los aspectos ambientales y sociales.

1.3.4. Justificación metodológica

La elección de una investigación experimental del tipo cuantitativo transversal permitirá establecer la relación causal de las variables planteadas sobre la recuperación de cobre en la lixiviación ácida del concentrado calcopirítico, el cual previamente será sometido a diferentes temperaturas de tostación sin superar los 600 °C a fin de evitar la formación de gases sulfurosos; así mismo, en este proceso se evaluará la mezcla del concentrado y del cloruro de potasio que será usado como agente oxidante. Las evaluaciones serán sostenidas con el uso de un diseño factorial fraccionado para realizar las pruebas necesarias a fin de alcanzar los objetivos planteados de una manera eficiente.

1.3.5. Importancia

La importancia de esta investigación radica en que no solo busca optimizar la extracción de cobre, sino que también pretende posicionar a la minería como una actividad más sostenible y responsable que puede claramente beneficiarse de la innovación tecnológica. Al abordar de manera integral los desafíos técnicos,

ambientales y sociales, esta tesis tiene el potencial de influir positivamente en el futuro de la industria del cobre, ofreciendo un marco que respalde el desarrollo de prácticas mineras sostenibles que alineen la rentabilidad con la protección del medio ambiente y el bienestar de las comunidades.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

- Determinar el efecto de la tostación con cloruro de potasio en la cinética de lixiviación de concentrado calcopirítico.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar el rendimiento de la lixiviación de concentrado calcopirítico tratado con tostación controlada a 600 °C.
- Evaluar cómo el porcentaje de sólidos, el tiempo de lixiviación, la relación concentrada/cloruro de potasio y la acidez del lixivante afectan la recuperación de cobre.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

- La tostación controlada de concentrado calcopirítico con cloruro de potasio a 600 °C incrementa la cinética de lixiviación en comparación con la lixiviación de concentrados sin tratamiento.

1.5.2. Hipótesis específicas

- La lixiviación de concentrados calcopirítricos tratados mediante tostación controlada resulta en un rendimiento de recuperación de cobre significativamente mayor que el de los concentrados no tostados.
- El porcentaje de sólidos, la relación concentrada/cloruro de potasio, el tiempo de lixiviación y la acidez del lixivante tienen un impacto significativo en la recuperación de cobre de concentrados calcopirítricos que han sido tratados mediante tostación controlada con cloruro de potasio.

1.6. Variables

1.6.1. Identificación de las variables

- Variable dependiente (VD):
 - a. Porcentaje de extracción
- Variables independientes (VI):
 - a. Relación concentrada/cloruro de potasio
 - b. Tiempo de agitación
 - c. Porcentaje de sólidos
 - d. Concentración de ácido

1.6.2. Caracterización de las variables

- Porcentaje de extracción: se define como la cantidad de cobre disuelto en un tiempo específico, en relación con la cantidad inicial de cobre presente en el concentrado antes de la lixiviación, se expresa en porcentaje.
- Relación concentrada/cloruro de potasio: indica la relación de masa entre el mineral a lixiviar y la sal de clorurada de potasio, al ser una relación específica de unidades similares, esta variable es adimensional.
- Tiempo de agitación: indica el tiempo de contacto entre la solución lixiviante y el concentrado, se expresa en minutos.
- Porcentaje de sólidos: representa la masa de concentrado en relación con la masa de lixivante, ambas masas deben tener unidades equivalentes, se expresa en porcentaje.
- Concentración de ácido: indica la cantidad de ácido sulfúrico disuelto en la solución lixiviante, se expresa en gramos por litro; se debe considerar el porcentaje de pureza del ácido utilizado.

1.6.3. Definición operacional de las variables

El objetivo de la operacionalización de variables es establecer la forma en que serán medidas las variables, las dimensiones son los factores que miden las variables expresadas en forma textual, mientras que los indicadores son los elementos concretos de las dimensiones y expresan la realidad medible de la

variable (Arias, 2021). Se especifica en la Tabla 2 la operacionalización de todas las variables involucradas.

Tabla 2

Operacionalización de variables

variable	dimensión	indicador
VD		
porcentaje de extracción	relación de masas entre cobre disuelto y cobre inicial	%
VI		
relación concentrada/cloruro de potasio	relación entre masa de concentrado y sal	w/w
tiempo de agitación	unidad de tiempo	min
porcentaje de sólidos	relación de masas entre concentrado y solución lixiviante	%
concentración de ácido	relación entre masa de ácido y volumen de solución lixiviante	g/l

Nota. Elaboración propia.

1.7. Limitaciones de la investigación

1.7.1. Alcance específico

Los resultados de la presente investigación presentan limitaciones en su capacidad de generalización debido a las variaciones mineralógicas del concentrado de calcopirita utilizado. Por lo tanto, es importante considerar estos resultados como referenciales.

Las ecuaciones derivadas del presente trabajo se limitan a ser extrapoladas dentro del rango de las variables estudiadas, con el fin de evitar interpretaciones erróneas de los resultados obtenidos.

1.7.2. Uso de equipos de protección personal

La lixiviación de concentrados implica el uso de ácido sulfúrico para disolver el cobre, lo que requiere la preparación de diferentes concentraciones de ácido diluido en agua. Debido al riesgo de quemaduras por contacto directo o salpicaduras en la piel y los ojos, es fundamental utilizar en todo momento el equipo de protección personal adecuado, que incluye guantes de nitrilo, gafas de seguridad, bata de laboratorio y protección respiratoria.

La preparación de soluciones y la manipulación de reactivos para su pesaje implicó el uso de instrumentales de vidrio de laboratorio, lo que representó riesgos de cortes debido a la mala manipulación de vasos precipitados, lunas de reloj, buretas, baguetas de vidrio, pipetas y fioles.

Además, el tratamiento previo a la lixiviación, que consiste en la tostación del concentrado, conllevó a riesgos de quemaduras debido a altas temperaturas a las que fue sometido el concentrado. Por ello, se debe trabajar con el material adecuado, como pinzas para manipular el material caliente, y debe usarse el equipo de protección personal correspondiente, incluyendo guantes, careta y ropa resistente al calor.

1.7.3. Uso de equipos de laboratorio propios

Se empleó diversos equipos de la Escuela Profesional de Metalurgia y de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann para analizar las soluciones acuosas denominadas PLS, así como para llevar a cabo el análisis mineralógico del concentrado antes y después del tratamiento. Además, se utilizó un horno eléctrico para el proceso de tostación del concentrado. Es relevante señalar que este equipamiento está destinado principalmente a la enseñanza de los estudiantes, lo que podría ocasionar algunas variaciones en los resultados. Sin embargo, esta limitación se ve compensada por la experiencia del personal competente que opera dichos equipos.

Se obtuvo los permisos correspondientes de las autoridades competentes para el uso de los siguientes equipos:

- Equipo de absorción atómica
- Hornos o muflas eléctricas
- Microscopio de barrido electrónico

1.7.4. Cantidad de concentrado disponible

La disponibilidad limitada de concentrado disponible en la Escuela Profesional de Metalurgia que tiene carácter de donación, puede afectar la representatividad de los resultados y limitar la posibilidad de realizar réplicas adicionales de los experimentos.

1.8. Descripción de las características de la investigación

La investigación se clasifica como cuantitativa experimental, se enfocó en la generación de datos numéricos que permitieron analizar y evaluar las hipótesis planteadas mediante la manipulación controlada de variables, esto facilitó el estudio de sus efectos. Además, se considera transversal, ya que la recopilación y análisis de datos se llevó a cabo en un período específico. Se desarrolló un nivel descriptivo correlacional, con el propósito de especificar las características del fenómeno de disolución de cobre a través de la tostación con cloruro de potasio antes de la lixiviación.

Capítulo II: Marco teórico

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Antecedentes locales

La cinética de la lixiviación del mineral de cobre constituye un aspecto crítico de los procesos hidrometalúrgicos, ya que influye directa en la eficiencia y eficacia de la extracción de este metal. Varios estudios locales han investigado la cinética de lixiviación de diferentes minerales de cobre en diferentes condiciones, proporcionando información sobre los factores que afectan la tasa de lixiviación y los mecanismos involucrados.

En este contexto, Mamani (2018) realizó un estudio experimental sobre la cinética del consumo de ácido y de la disolución de cobre del mineral oxidado de la zona de Sama Inclán. El objetivo principal fue evaluar el consumo de ácido y la solubilidad del cobre. Los minerales predominantes identificados fueron la crisocola ($\text{CuSiO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y la malaquita [$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], mientras que la azurita [$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$], la pirita (FeS_2) y la cuprita (Cu_2O) se encontraron en menor proporción. Los resultados evidenciaron que tanto la velocidad de consumo de ácido (H_2SO_4) como la tasa de disolución de cobre aumentaron a medida que disminuyó el tamaño de grano de los minerales, dentro de un rango de 1,27 cm ($\frac{1}{2}$ "") a 2,54 cm (1").

Mamani (2018) determinó que la cinética del proceso de lixiviación estuvo controlada por la difusión de protones al interior de las partículas minerales en todo el rango de acidez evaluado. Asimismo, estableció que el tiempo requerido para completar la reacción dependió directamente de la cinética de lixiviación del cobre. Bajo estas condiciones, se alcanzó una recuperación máxima de cobre de 86,93 % tras 30 días de tratamiento del mineral, utilizando un tamaño de partícula de 0,0127 m ($\frac{1}{2}$ ”).

Por otro lado, Usecca (2024) desarrollo un estudio aplicado y experimental se enfocó en determinar la cantidad óptima de ácido sulfúrico necesaria para la extracción eficiente el cobre mediante lixiviación en columna. El estudio consideró dos tamaños de partícula del mineral, correspondiente a 90 % y 100 % bajo 8 mm. Para ello, se evaluó la cinética de lixiviación del cobre empleando diferentes tasas de riego de ácido sulfúrico, específicamente 500, 600, 700 y 800 L/m²·h.

Los resultados evidenciaron que la mayor recuperación de cobre soluble en ácido se alcanzó con una tasa de riego de 800 L/m²·h para el material con 90 % –8 mm, obteniéndose una recuperación de 99,1 %, mientras que para el material con 100 % –8 mm la recuperación máxima de cobre soluble fue de 99,8 % a una tasa de 700 L/m²·h. No obstante, la recuperación total de cobre resultó superior (82,5 %) cuando se empleó una tasa de riego de 500 L/m²·h en el material con 100 % –8 mm. En todas las pruebas, la dosificación de 20 kg de ácido sulfúrico por tonelada de mineral demostró ser efectiva.

Respecto al análisis de la velocidad de reacción, el autor indicó que el incremento en la tasa de riego acelera el proceso de lixiviación. En conclusión, el estudio resalta la importancia de ajustar la tasa de riego y considerar el tamaño de partícula del mineral como variables clave para optimizar la recuperación de cobre.

2.1.2. Antecedentes nacionales

La cinética de lixiviación de los minerales de cobre se encuentra influenciada por diversos factores, entre los que se incluyen la temperatura, la concentración de agente lixivante, el tamaño de partícula y la velocidad de agitación. Para describir este proceso, se emplea comúnmente el modelo del núcleo en contracción, el cual plantea que la lixiviación puede estar controlada por la reacción química en la superficie del sólido o por la difusión a través de la capa de producto formada. La comprensión de estos factores y mecanismos resulta fundamental para la optimización de los procesos de extracción de cobre.

En este contexto, Herrera (2019) desarrolló una investigación doctoral orientada al estudio de la velocidad de extracción de cobre a partir de malaquita, utilizando soluciones de ácido cítrico como agente lixivante. A partir del análisis experimental, el autor propuso un modelo cinético de “control químico del núcleo en contracción” como el que mejor describe el proceso de lixiviación, superando a otros enfoques, tales como el modelo de “difusión a través de la capa de producto” y el de “control mixto”. Dicho modelo resultó válido para experimentos realizados con concentraciones de ácido cítrico de 10 y 20 g/L, tamaños de partícula del

mineral de $-1/4$ y $-3/8$ de pulgada, y un tiempo de lixiviación de 36 días. Los resultados mostraron que:

- Con 10 y 20 g/L de ácido cítrico y un tamaño de partícula de $-1/4$ de pulgada, se extrajo el 93,05 % y el 97,72 % de cobre respectivamente en 36 días, mientras que en 16 días se obtuvo un 41,81 % y un 43,14 %.
- Con el mismo tiempo y concentración, pero un tamaño de partícula mayor ($-3/8$ de pulgada), la extracción disminuyó al 55,40 % y 64,48 %.

En general, la extracción de cobre de la malaquita aumenta con la mayor concentración de ácido cítrico, menor tamaño de partícula del mineral y mayor tiempo de lixiviación.

Guillén (2022) desarrolló un estudio cuyo objetivo principal fue evaluar la velocidad de consumo de ácido durante la lixiviación en bateas de un mineral de cobre oxidado proveniente de la Concesión Minera Chaspaya S.A.C., analizando como variables el tamaño de partícula y la acidez del mineral. El mineral estuvo compuesto predominantemente por malaquita y, en menor proporción, por crisocola y cuprita, además de presentar impurezas de limonitas, hematitas y silicatos.

Los resultados evidenciaron que la reducción del tamaño de partícula del mineral incrementó tanto el consumo de ácido como la recuperación de cobre para la producción de sulfato de cobre pentahidratado. Asimismo, se determinó que la velocidad de consumo de ácido y la tasa de disolución de cobre aumentaron

conforme disminuyó el tamaño de grano. El análisis cinético indicó que el proceso estuvo controlado por la difusión de protones al interior de las partículas minerales, alcanzándose recuperaciones de cobre entre 60 % y 90 % mediante lixiviación con ácido sulfúrico.

2.1.3. Antecedentes internacionales

La tostación de concentrados calcopiríticos constituye una etapa relevante en la extracción de cobre a partir de calcopirita (CuFeS_2), ya que consiste en el calentamiento del concentrado para promover reacciones químicas que transforman los sulfuros en óxidos o sulfatos, los cuales resultan más susceptibles a tratamientos hidrometalúrgicos posteriores.

En este contexto, Tumen-Ulzii et al. (2022) desarrollaron un estudio sobre un proceso combinado de tostación con sales y lixiviación ácida para la recuperación de cobre a partir de un concentrado sulfurado que contenía 43,5 % de calcopirita. El concentrado fue tostado tanto en ausencia como en presencia de cloruro de potasio, empleando relaciones másicas concentrado:KCl entre 1:0,5 y 1:0,9, a temperaturas comprendidas entre 400 °C y 600 °C y tiempos de tostación de 1 a 4 horas, bajo una atmósfera de 1 atm. Posteriormente, el concentrado tostado se sometió a lixiviación en una solución de ácido sulfúrico de 60 g/L, con una relación sólido-líquido de 1:8, a temperatura ambiente y durante un periodo de 2 horas.

El concentrado de calcopirita, las muestras tostadas y los residuos de lixiviación fueron analizados mediante espectrometría de absorción atómica, espectrofotometría UV-VIS y difracción de rayos X. Los resultados evidenciaron que aproximadamente entre 80 % y 90 % de la calcopirita se descompuso bajo condiciones de una relación concentrado:KCl de 1:0,6 y un tiempo de tostación de 2 horas a temperaturas de 500 °C y 550 °C, respectivamente. Asimismo, la disolución de cobre en la solución de ácido sulfúrico a partir de los concentrados tostados superó el 99,7 % y el 99,0 % en las condiciones evaluadas.

Ozer et al. (2017) realizaron experimentos de tostación–lixiviación y análisis térmicos en distintas muestras minerales con el fin de evaluar el comportamiento fisicoquímico de la sulfatación en materiales con bajo contenido de cobre, en comparación con concentrados de calcopirita obtenidos de una planta de flotación. Como resultado, se alcanzaron extracciones máximas de cobre de 94,7 %, 99,5 % y 82,7 % para el mineral de mina, el concentrado de calcopirita y los relaves de flotación, respectivamente, a temperaturas de tostación de 550 °C, 650 °C y 525 °C.

Los autores concluyeron que, a medida que aumentó la temperatura de tostación, la extracción de cobre disminuyó, fenómeno atribuido a la descomposición del sulfato de cobre generado durante el proceso. Asimismo, los análisis térmicos indicaron que los sulfatos de cobre formados a partir de cada tipo de muestra comenzaron a descomponerse a diferentes temperaturas. De acuerdo

con los análisis fisicoquímicos mediante análisis térmico diferencial (DTA) y termogravimetría (TG), las reacciones de sulfatación durante la tostación del concentrado de calcopirita ocurrieron en un intervalo de temperaturas comprendido entre 394 °C y 650 °C. En contraste, para los materiales de bajo contenido de cobre provenientes del mineral en bruto y de los relaves de flotación, dichas reacciones se desarrollaron en rangos de 450–565 °C y 480–550 °C, respectivamente.

Según los autores, las diferencias observadas se atribuyen a la composición mineralógica y al contenido químico de los materiales. En particular, se determinó que el contenido de azufre y de óxidos, especialmente óxido ferroso, desempeñó un papel relevante en el comportamiento del proceso de tostación.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Importancia del cobre como recurso mineral

El cobre es un recurso mineral de gran importancia debido a sus diversas aplicaciones y propiedades esenciales. Es uno de los minerales más importantes a nivel mundial, con importantes reservas y producción concentradas en unos pocos países. En 2023, las reservas mundiales de cobre eran de 890 millones de toneladas, con Chile teniendo la mayor participación. Los cinco principales países (Chile, Australia, Perú, Rusia y México) representaron más del 54,3 % de la reserva mundial de cobre (MEM, 2023). La minería y el procesamiento del cobre contribuyen significativamente a las economías de los países productores, ayudando a mitigar las recesiones económicas. La industria del cobre también

apoya el desarrollo de las economías nacionales al proporcionar materiales esenciales para diversas industrias.

Figura 1

Reservas mundiales de cobre 2023

PAÍS	MILES DE TMF	%
CHILE	190,000	21.3%
AUSTRALIA	97,000	10.9%
PERÚ	81,000	9.1%
RUSIA	62,000	7.0%
MÉXICO	53,000	6.0%
ESTADOS UNIDOS	44,000	4.9%
CONGO	31,000	3.5%
POLONIA	30,000	3.4%
CHINA	27,000	3.0%
INDONESIA	24,000	2.7%
OTROS PAÍSES	246,600	27.7%
TOTAL MUNDIAL	890,000	100%

Nota. Adaptado de Mapa del cobre, por Ministerio de Energía y Minas (2023).

En el caso de Perú, de acuerdo con el informe del Ministerio de Energía y Minas (MINEM,2023), la distribución de yacimientos de cobre se concentra principalmente en la región Arequipa, lidera con el 52 % de reservas (62 565 TMF), Moquegua 17,2 % (20 651 TMF), Áncash 5,9 % (7 110 TMF), Tacna 5,8 % (6 972 TMF), entre otros. Además, la producción nacional de cobre es liderada por la

Minera Cerro Verde, con una participación del 16,9 %, seguida de Minera Antamina con el 15,8 % y Southern Perú Corporation con el 13,6 %.

2.2.2. Cambios realizados

Figura 2

Reservas de cobre a nivel departamento

DEPARTAMENTO	PROBABLES	PROBADAS	TOTAL
AREQUIPA	33,103	29,463	62,565
MOQUEGUA	4,733	15,918	20,651
ÁNCASH	3,296	3,814	7,110
TACNA	2,770	4,201	6,971
JUNÍN	3,711	2,352	6,062
APURÍMAC	2,275	2,702	4,976
CAJAMARCA	3,734	209	3,942
PASCO	2,530	268	2,798
CUSCO	1,304	1,451	2,755
PUNO	592	586	1,178
LIMA	250	316	565
ICA	244	191	435
HUÁNUCO	73	199	272
HUANCAVELICA	18	6	23
AYACUCHO	16	4	20
LA LIBERTAD	16	0.4	16
TOTAL	58,665	61,677	120,342

Nota. Adaptado de Mapa del cobre, por Ministerio de Energía y Minas (2023).

La contribución de la producción de cobre a la economía peruana es fundamental, dado que este metal constituye uno de los principales productos de exportación del país y una fuente relevante de generación de divisas. Al cierre del año 2023, la producción nacional de cobre alcanzó un récord histórico de 2 755 066

toneladas métricas finas (TMF), lo que representó un incremento del 12,7 % en comparación con el año 2022. Este desempeño consolidó al Perú como el segundo productor mundial de cobre, solo superado por Chile.

Asimismo, las exportaciones de cobre registraron un crecimiento significativo, al alcanzar los 23 345 millones de dólares, cifra que representa un aumento del 17,6 % respecto a 2022. De manera complementaria, el precio internacional del cobre alcanzó un máximo histórico de 492 centavos de dólar por libra, de acuerdo con información del Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), difundida por *El Peruano* (2024).

2.2.3. Cloruro de potasio (KCl)

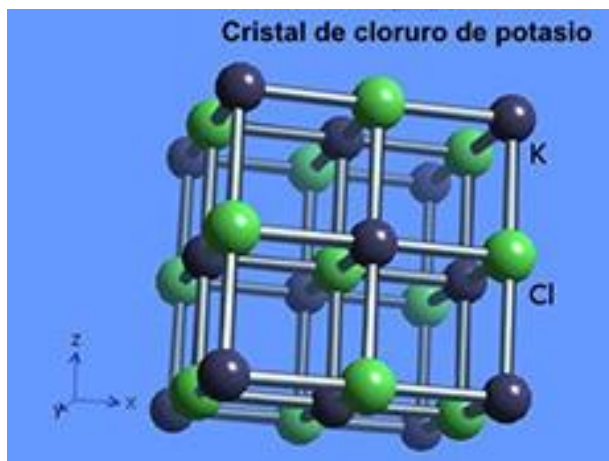
El cloruro de potasio (KCl) es un compuesto iónico con momentos dipolares significativos consistente en enlaces iónicos entre los iones de potasio (K^+) y cloruro (Cl^-) mostrando propiedades eléctricas por la naturaleza de enlace entre el potasio y el cloro, lo que indica que el KCl es altamente soluble en agua y su solubilidad puede verse influenciada por la presencia de otros iones y compuestos. Por ejemplo, la adición de modificadores inorgánicos, como el carbonato de sodio y el sulfato de sodio, puede mejorar la resistencia a la humedad y la integridad mecánica de los gránulos de KCl, al favorecer la conversión de cloruros solubles de calcio y magnesio en formas menos solubles (Zezin & Driesner, 2017).

Para comprender cómo la estructura química del cloruro de potasio (KCl) contribuye a sus propiedades fisicoquímicas, debemos considerar su naturaleza iónica y su estructura cristalina.

- **Naturaleza iónica:** El cloruro de potasio está compuesto por iones de potasio (K^+) y cloruro (Cl^-). El enlace iónico entre estos iones es fuerte debido a la atracción electrostática entre los iones de potasio cargados positivamente y los iones de cloruro cargados negativamente (Yamashita et al., 2023).
- **Estructura cristalina:** El KCl normalmente cristaliza en una red cúbica centrada en las caras (FCC), también conocida como fase B1. Esta estructura se caracteriza porque cada ion está rodeado por seis iones con carga opuesta, formando una disposición altamente estable y simétrica (Yamashita et al., 2023).
- La estructura química del cloruro de potasio, caracterizada por sus enlaces iónicos y su red cúbica centrada en las caras, influye significativamente en sus altos puntos de fusión y ebullición, solubilidad, conductividad eléctrica y otras propiedades físicas. Estas propiedades se modulan aún más por factores como la temperatura, la presión y la concentración, tal como se detalla.

Figura 3

Cristal de Cloruro de Potasio



Nota. Adaptado de Enlace químico, por Guatequímica (2025).

Propiedades fisicoquímicas del KCl:

- **Estructura cristalina:** El KCl cristaliza en una estructura cúbica, similar a la del cloruro de sodio (NaCl).
- **Densidad y viscosidad:** La densidad y la viscosidad de las soluciones de KCl varían con la concentración y la temperatura (Dikhtievskaya & Shevchuk, 2014).
- **Tensión superficial:** La tensión superficial de las soluciones de KCl aumenta con la concentración (Peng & Firouzi, 2018).
- **Tamaño de partícula:** Las partículas de KCl tienen un tamaño medio de 12,599 μm . El tamaño de partícula aumenta y el área de superficie específica disminuye después de la lixiviación del agua (Han et al., 2017).

- **Hidratación y disolución:** El proceso de hidratación del KCl implica la formación de estructuras estables con moléculas de agua. A temperaturas más altas, las configuraciones de pares de iones separados por solvente se vuelven más frecuentes. El comportamiento de disolución del KCl en el agua está influenciado por la interacción entre los iones de cloruro y las moléculas de agua, que es más fuerte que la interacción entre los iones de potasio y el agua (Shi et al., 2024).
- **Conductividad:** Las soluciones de KCl exhiben una alta conductividad eléctrica, que es una característica típica de los compuestos iónicos en soluciones acuosas.

Tabla 3

Resumen de las propiedades fisicoquímicas del KCl

Propiedad	Descripción
<i>Fórmula</i>	KCl
<i>Naturaleza de vínculo</i>	Enlaces iónicos entre iones K^+ y Cl^-
<i>Solubilidad</i>	Altamente soluble en agua; influenciado por otros iones
<i>Estructura cristalina</i>	Estructura cúbica
<i>Densidad y viscosidad</i>	Varía con la concentración y la temperatura
<i>Tensión superficial</i>	Aumenta con la concentración
<i>Tamaño de partícula</i>	Tamaño medio de 12.599 μm en cenizas volantes
<i>Hidratación y disolución</i>	Formación de estructuras estables con moléculas de agua
<i>Conductividad</i>	Alto contenido en soluciones acuosas

Nota. Elaboración propia.

2.2.4. Principales minerales de cobre: calcopirita, calcocita y covelita

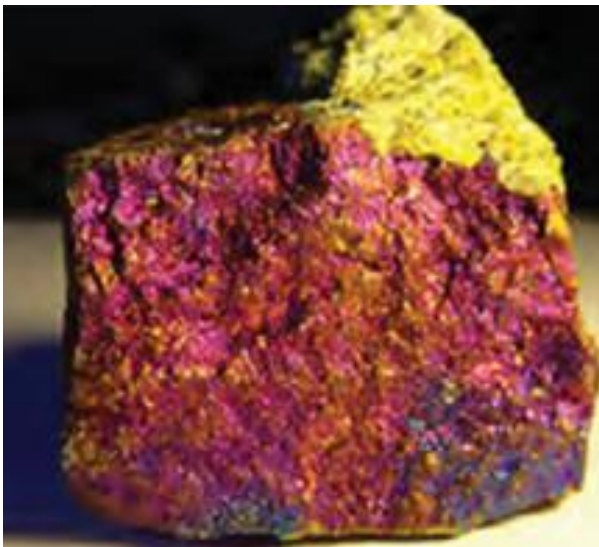
Los concentrados de cobre están constituidos principalmente por calcopirita (CuFeS_2) y pirita (FeS_2); no obstante, también pueden encontrarse otros minerales sulfurados y de ganga, como la bornita (Cu_5FeS_4), la calcosina (Cu_2S), la covelina (CuS) y el cuarzo (SiO_2). Desde el punto de vista de la composición química, estos concentrados presentan, de manera aproximada, contenidos de cobre (Cu) entre 20 % y 30 %, hierro (Fe) entre 25 % y 35 % y azufre (S) en un rango similar, de acuerdo con lo reportado por W. Liu et al. (2023).

- **Calcopirita:** La calcopirita (CuFeS_2) es el mineral más abundante y una fuente importante de cobre en todo el mundo. Se encuentra principalmente en depósitos de pórfido y es crucial para diversas aplicaciones industriales, incluidos equipos eléctricos y tecnologías emergentes como la producción de energía solar. La calcopirita está ampliamente distribuida en sistemas magmáticos y magmático-hidrotermales y constituye alrededor del 70-80 % de las reservas de cobre conocidas (Kimball, 2013). Sin embargo, la calcopirita, al igual que otros sulfuros de cobre, generalmente se encuentra en depósitos con leyes de alrededor de 0,4-0,5 % de cobre. La explotación de estas reservas mediante métodos tradicionales de flotación seguidos de un tratamiento pirometalúrgico del concentrado de cobre está al límite de la viabilidad económica. La ruta hidrometalúrgica sería más adecuada para el tratamiento de estos minerales de sulfuro de baja ley. No obstante, la

calcopirita es refractaria en medios de ácido férrico/sulfúrico y muestra tasas de disolución lentas. Para ello, se llevaron a cabo una serie de investigaciones para acelerar la cinética de la lixiviación mediante la adición de pirita, polvo de hierro, sílice de tamaño nanométrico, carbón y carbón activado (Méndez et al., 2022).

Figura 4

Calcopirita



Nota. Adaptado de Calcopirita: portadora de un metal precioso y no precioso, por Kimball (2013).

- **Calcocita:** La calcocita (Cu_2S) es un importante mineral secundario de sulfuro de cobre conocido por su alto contenido de cobre y su facilidad de tratamiento mediante procesos hidro-metalúrgicos convencionales, lo que lo hace muy rentable para la extracción de cobre. Entre los diversos procesos de lixiviación para tratar la calcocita, los medios de cloruro muestran mejores resultados y tienen un mayor auge industrial. La disolución de la

calcocita es un proceso de dos etapas, siendo la segunda mucho más lenta que la primera. La forma óptima de extraer cobre de la calcocita es, durante la primera etapa, trabajar con altas concentraciones de cloruro (50-100 g/L) y bajas concentraciones de ácido sulfúrico (0,5 mol/L) en un ambiente de temperatura, ya que otras variables se vuelven irrelevantes durante esta etapa si la concentración de iones cloruro en el sistema es alta. Mientras que, en la segunda etapa, es necesario aumentar la temperatura del sistema (temperaturas moderadas) o incorporar una alta concentración de algún agente oxidante para evitar la pasivación del mineral (Toro et al., 2021).

Figura 5

Calcocita



Nota. Adaptado de Calcosita, por Wikipedia (2025).

- **Covelita:** La covelita (CuS) es un mineral de sulfuro de cobre que se encuentra comúnmente en varios tipos de depósitos de mineral, incluidos

los depósitos de pórfido de cobre, epitermales y sulfuro masivo volcanogénico. La covelita tiene una relación estequiométrica de 1:1 para el cobre y el azufre, existiendo el cobre en estado monovalente (Tagirov et al., 2016).

Figura 6

Covelita



Nota. Adaptado de Covellina, por Wikipedia (2025).

2.2.5. Descripción de la piro-metalurgia: fundición y conversión

Schlesinger et al. (2011) mencionan que aproximadamente el 80 % del cobre extraído del mundo proviene de menas de Cu-Fe-S. Los minerales de Cu-Fe-S no se disuelven fácilmente en soluciones acuosas, por lo que la gran mayoría de la extracción de cobre de estos minerales es piro-metalúrgica. La piro-metalurgia es una rama de la metalurgia que se utiliza para la extracción y procesamiento de minerales y concentrados de cobre, principalmente sulfuros, para cuyo fin emplea

altas temperaturas. Este proceso es ampliamente utilizado debido a su eficiencia en el manejo de grandes volúmenes y su capacidad para procesar minerales. Este tipo de extracción implica:

- Aislar las partículas minerales de Cu-Fe-S y Cu-S en una mena para obtener un concentrado mediante flotación por espuma.
- Fundir este concentrado para obtener una mata de sulfuro con alto contenido de Cu.
- Convertir (oxidar) esta mata fundida en cobre fundido impuro.
- Refinar por fuego y electro-refinar este cobre impuro para obtener cobre ultrapuro.

Los procesos pirometalúrgicos son conocidos por su alta eficiencia en la recuperación de metales, lo que los hace adecuados para operaciones a gran escala. Estos procesos pueden tratar una amplia gama de materiales, incluidos minerales de baja ley y concentrados complejos, que no se procesan fácilmente con otros métodos. Los métodos piro-metalúrgicos ofrecen tiempos de procesamiento rápidos en comparación con otras técnicas metalúrgicas, lo que es beneficioso para operaciones de alto rendimiento (Robertson et al., 2014). Además, pueden manejar materiales de entrada complejos y diversos, como residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) y polvo de hornos de arco eléctrico (EAFD), de forma eficaz (Narzari et al., 2023); sin embargo, son intensivos en energía, requiriendo

cantidades significativas de calor para alcanzar las temperaturas necesarias para la fundición y el refinado. Esta alta demanda de energía puede provocar un aumento de los costes operativos y del impacto medioambiental debido a las emisiones de gases de efecto invernadero; es decir, los procesos pueden producir emisiones tóxicas, como halógenos y dioxinas, que plantean riesgos para el medio ambiente y la salud (Faraji et al., 2022).

Tabla 4

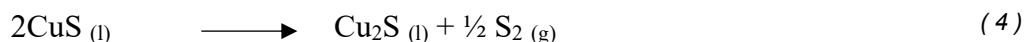
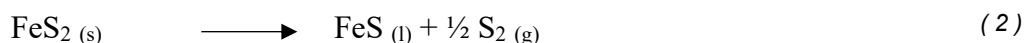
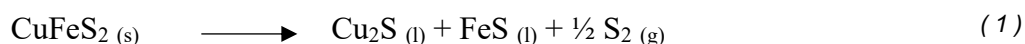
Ventajas y desventajas de la piro-metalurgia

Ventajas	Desventajas
Alta eficiencia y escalabilidad	Alto consumo de energía
Versatilidad en el procesamiento de materiales	Preocupaciones ambientales (emisiones tóxicas)
Tiempos de procesamiento rápidos	Degradación de equipos
Potencial de recuperación de energía	Recuperación limitada de material
	Complejidad y desafíos técnicos

Nota. Elaboración propia.

Los procesos piro-metalúrgicos del cobre se realizan por calentamiento directo de los concentrados de minerales formados por calcopirita (CuFeS_2), calcocita (Cu_2S), covelita (CuS) y pirita (FeS_2) que tienen como reacciones

químicas del proceso, donde el azufre es eliminado en el proceso de fusión por evaporación:



La fusión de concentrados de cobre se realiza principalmente mediante dos métodos. El primero es la fusión por oxidación, la cual es cada vez más empleada debido a sus ventajas ambientales y a su mayor eficiencia en el control de emisiones. El segundo corresponde a la fusión convencional, cuyo uso ha ido disminuyendo progresivamente debido a las crecientes preocupaciones ambientales asociadas a este proceso.

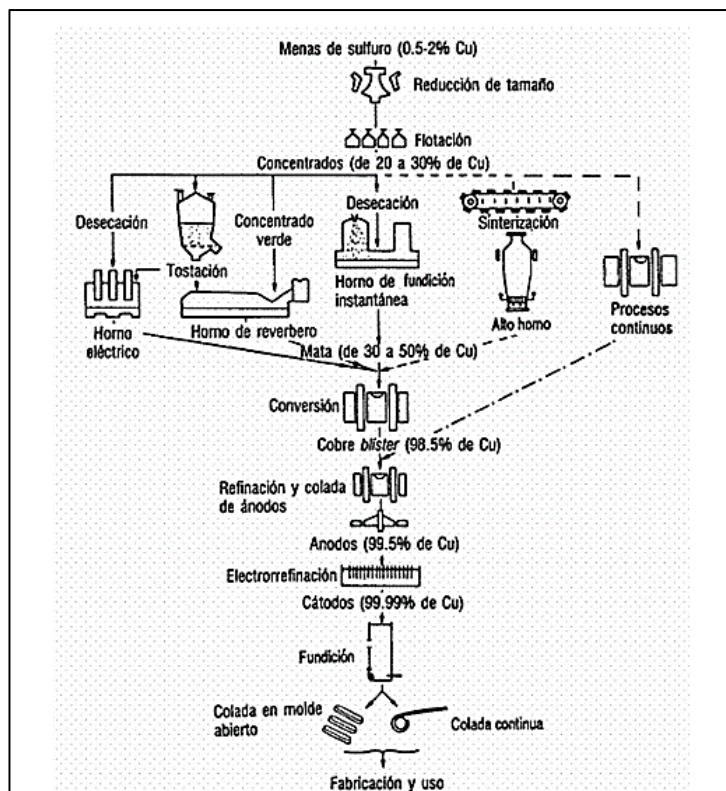
Durante la operación de los hornos de fusión, se alimentan diversos materiales clave. Entre ellos se encuentra el concentrado de cobre, que constituye la principal fuente del metal; el fundente de sílice (SiO_2), utilizado para ajustar la composición de la escoria; y el aire, que proporciona el oxígeno necesario para la oxidación del hierro y el azufre, así como para la combustión del combustible.

Asimismo, se emplea oxígeno industrial, el cual permite mejorar la eficiencia del proceso de oxidación del hierro y el azufre.

Adicionalmente, en el proceso de fundición se reciclan otros materiales con el objetivo de recuperar el cobre que contienen. Entre estos se incluyen el circulante, correspondiente al material sólido generado durante la fundición, y los polvos, los cuales son recuperados de los gases del horno (Universidad de Santiago de Chile, 2023).

Figura 7

Tratamiento para obtener cobre a partir de minerales sulfurados



Nota. Adaptado de Pirometalurgia, por Universidad de Santiago de Chile (2023). La figura muestra los procesos necesarios para obtener el cobre a partir de minerales sulfurados.

2.2.6. Principios y métodos de lixiviación

La lixiviación es un proceso de separación en el que uno o varios componentes de una mezcla sólida se disuelven en un líquido, llamado disolvente. Este proceso se basa en la solubilidad de los componentes deseados en el disolvente utilizado. En el caso específico del cobre, se utiliza una solución ácida, comúnmente ácido sulfúrico, para disolver el cobre presente en minerales o concentrados.

Figura 8

Velocidad de disolución del cobre expuestas al ácido sulfúrico

Especies Minerales de Cu	Cinética Relativa	Tiempos de Referencia
Carbonatos (malaquita, azurita), Sulfatos y Cloruros	Muy rápida (a temperatura ambiente)	Segundos – Minutos (disolución completa)
Óxidos Cúpricos (tenorita), Silicatos	Rápida (requiere medio ácido)	Horas (disolución completa)
Cobre nativo, óxidos complejos y óxidos cuprosos (cuprita)	Moderada (requiere oxidante)	Días – Semanas (disolución puede no ser completa)
Sulfuros simples (cs, cov)	Lenta (requiere oxidante)	Semanas – Meses (disolución puede no ser completa)
Sulfuros complejos (cpy, bornita, enargita)	Muy lenta (requiere oxidante)	Años (disolución incompleta)

Nota. Adaptado de Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología Cuprochlor, por Duque (2014).

El tiempo que tarda en disolverse un mineral durante la lixiviación depende de varios factores, como la forma en que se encuentra el metal valioso en el mineral (ya sea en un concentrado, mineral de alta ley o baja ley) y las características químicas y mineralógicas del mineral (si es un sulfuro, óxido o una mezcla de ambos). Cada mineral reacciona de manera diferente a la lixiviación, lo que

significa que no todos se disuelven a la misma velocidad. Algunos minerales, como los óxidos, pueden lixivarse en unas pocas semanas, mientras que otros, como los sulfuros, pueden tardar más de un año en disolverse por completo. La lixiviación es un proceso que se adapta a las características de cada mineral y que puede tomar diferentes cantidades de tiempo dependiendo de la reactividad del mineral y de cómo se encuentre el metal valioso en él.

La lixiviación, un proceso clave en la extracción de metales, se puede llevar a cabo de dos maneras principales: por irrigación o por agitación.

- **Lixiviación por irrigación:** Este método, más económico tanto en inversión inicial como en costos operativos, se realiza a gran escala en pilas o botaderos. La solución lixivante se rocía sobre el material apilado, y por gravedad se filtra a través de él, disolviendo los metales. El líquido resultante se recoge y se envía a las etapas de recuperación del metal. La lixiviación en botaderos se emplea para minerales de cobre de baja ley (ROM), mientras que la lixiviación en pilas se usa para minerales triturados y apilados en un terreno impermeable. En ambos casos, la solución lixivante se aplica en la parte superior del material y se recoge en la parte inferior, donde se envía a las etapas de recuperación del metal. La solución ácida resultante se reacondiciona y se recircula al proceso de lixiviación, optimizando el uso de recursos.

- **Lixiviación por agitación:** Se lleva a cabo en reactores donde el mineral se mezcla con la solución lixivante para acelerar la disolución de los metales.
- La lixiviación puede ser clasificado según el tipo de disolvente utilizado. Los más comunes son el sulfato, el cloro, el nitrato y el amonio. El ácido sulfúrico, en combinación con otros agentes oxidantes como el oxígeno y el ion férrico, destaca por su bajo costo, su menor impacto corrosivo en los equipos y la posibilidad de regenerar el ácido sulfúrico durante la electro-obtención, una etapa clave en la recuperación del metal.

A continuación, se presenta una tabla con los medios de lixiviación más utilizados y sus características principales:

Tabla 5

Medios lixiviantes

Medio Lixivante	Características
Sulfato (Ácido Sulfúrico)	Bajo costo, menor corrosión, regeneración en electro-obtención, ampliamente utilizado en la lixiviación de cobre.
Cloro	Utilizado en la lixiviación de minerales de oro y plata, puede generar subproductos tóxicos.
Nitrato	Electro-obtención después de SX
Amonio	Reducción de H ₂

Nota. SX: siglas del proceso extractivo metalúrgico conocido como extracción por solventes.

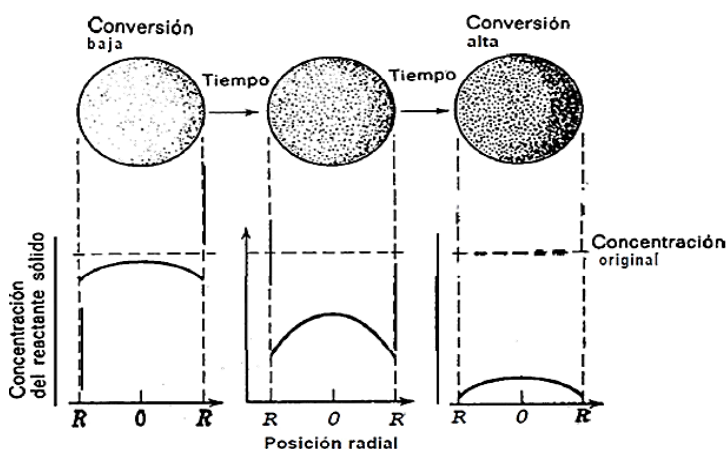
2.2.7. Modelos cinéticos de lixiviación

Z.-X. Liu et al. (2012) señalan que la cinética de los procesos de lixiviación está influenciada por diversos factores operativos, entre los que destacan la temperatura, la concentración de los agentes lixiviantes, el tamaño de partícula, la velocidad de agitación y la relación sólido-líquido. En el estudio de la lixiviación de minerales, se emplean principalmente dos modelos cinéticos para simular y comprender este fenómeno complejo. Si bien ambos modelos constituyen simplificaciones del sistema real, resultan herramientas útiles para describir el comportamiento global del proceso, así como para formular expresiones matemáticas que permiten analizar y optimizar la eficiencia de la lixiviación.

La elección del modelo adecuado dependerá de las características específicas del mineral y de las condiciones de lixiviación:

Figura 9

Lixiviación

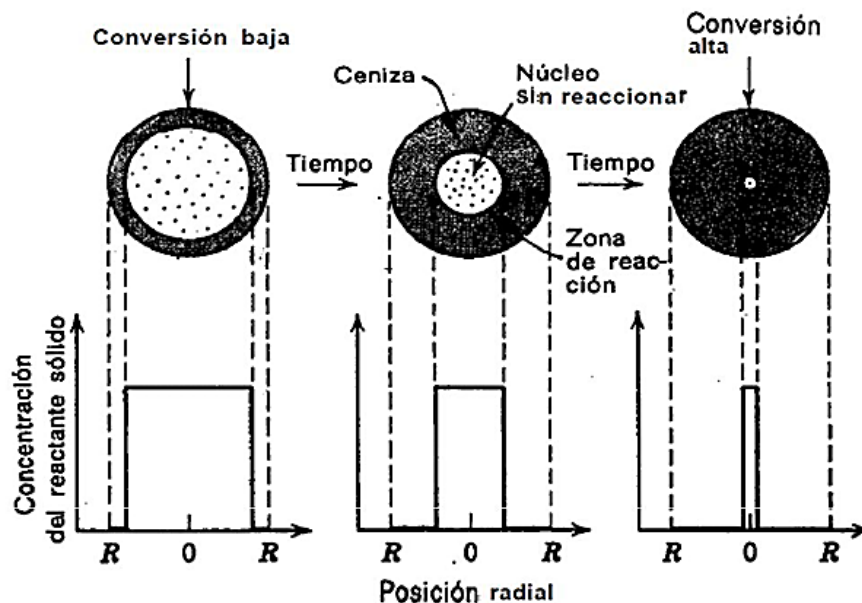


Nota. Adaptado de Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología Cuprochlor, por Duque (2014).

- **Modelo de conversión progresiva:** Este modelo asume que la reacción de lixiviación ocurre de manera uniforme en toda la partícula del mineral (). A medida que avanza el tiempo, la partícula se va convirtiendo progresivamente de mineral a producto en toda su estructura (Z.-X. Liu et al., 2012).
- **Modelo de núcleo sin reaccionar:** En contraste, este modelo postula que la reacción se produce en una zona o frente de reacción que se desplaza desde la superficie de la partícula hacia su interior, dejando un núcleo central sin reaccionar (Figura 10). La lixiviación avanza gradualmente, consumiendo el mineral desde afuera hacia adentro (Bayati et al., 2018).

Figura 10

Modelo núcleo sin reaccionar



Nota. Adaptado de Lixiviación de minerales sulfurados de cobre de baja ley en columnas unitarias utilizando la tecnología Cuprochlor, por Duque (2014).

2.2.8. Factores que afectan la cinética de lixiviación: tiempo, temperatura, porcentaje de sólido

La cinética de la lixiviación de cobre está significativamente influenciada por el tiempo de lixiviación, la temperatura y el porcentaje de sólidos. Las condiciones óptimas a menudo implican temperaturas más altas y proporciones sólidas-líquidas cuidadosamente equilibradas para maximizar la recuperación de cobre. Comprender estos factores puede ayudar a diseñar procesos de lixiviación más eficientes para la extracción de cobre.

- **Temperatura:** La temperatura tiene un impacto significativo en la cinética de lixiviación del cobre. Un aumento de la temperatura aumenta la tasa de lixiviación del cobre logrando que la energía de activación de la lixiviación del cobre disminuya, lo que indica un cambio en el mecanismo de reacción. Las energías de activación para el proceso de lixiviación varían, lo que indica diferentes mecanismos de control, como la difusión o el control de la reacción química. Por ejemplo, en un estudio de lixiviación y la cinética de la malaquita en soluciones de glicina alcalina al aumentar la temperatura de 25 °C a 50 °C dio como resultado un incremento en la extracción de cobre de 32,3-83,6 % respectivamente durante 5 min (Tanda et al., 2021).
- **Tiempo de lixiviación:** La duración del proceso de lixiviación influye significativamente en la tasa de recuperación de cobre, ya que tiempos de contacto más prolongados favorecen la disolución del metal. En este

sentido, Nozari y Azizi (2020) reportaron que, en un estudio sobre el comportamiento de la lixiviación de un mineral óxido/sulfuro, se alcanzó una recuperación óptima de cobre del 88,17 % con un tiempo de lixiviación de 60 minutos, bajo condiciones óptimas que incluyeron una temperatura de 50 °C.

- **Porcentaje de sólidos:** El porcentaje de sólidos en la solución de lixiviación (proporción de sólido a líquido) es crucial. Un mayor porcentaje de sólidos puede reducir la eficiencia de lixiviación debido al contacto limitado entre el agente de lixiviación y las partículas de mineral. Por ejemplo, en algunos estudios se encontró óptima una proporción de sólido a líquido de 2:1 (Wu et al., 2012).

2.2.9. Proceso de tostación de sulfuros (calcopirita-calcocita) y su objetivo en la metalurgia

El tostado de concentrado calcopirítico es un proceso versátil con varios métodos diseñados para optimizar la recuperación de cobre y minimizar el impacto ambiental. Cada método tiene sus condiciones y ventajas específicas, por lo que es crucial seleccionar la técnica adecuada en función de los resultados deseados y las limitaciones operativas.

- **Tostado sulfatado:** Este proceso tiene como objetivo convertir la calcopirita en sulfato de cobre, una fase que presenta mayor facilidad de lixiviación. Generalmente, el tostado sulfatado se lleva a cabo a

temperaturas comprendidas entre 500 °C y 625 °C. La formación de sulfato de cobre se inicia alrededor de los 500 °C y alcanza su máximo aproximadamente a 580 °C; a temperaturas superiores, dicho compuesto tiende a descomponerse, dando lugar a la formación de óxido de cobre (Ozer et al., 2017). Asimismo, la cinética de la reacción se ve influenciada por factores como la temperatura y la presencia de agentes activadores, entre los que se incluyen el sulfato de hierro trivalente y las mezclas de vapor y aire (Sargsyan & Hovhannisyan, 2010).

- **Tostado en microondas:** Este proceso tiene por objetivo lograr una oxidación rápida y eficiente de la calcopirita. La oxidación completa se puede lograr en 10 minutos usando microondas, en comparación con 20 minutos con métodos convencionales (Mulaba-Bafubiandi, 2006). El tostado por microondas mejora la cinética de lixiviación al modificar la estructura superficial de la calcopirita, aumentando los sitios activos y el estrés interno (Bai et al., 2022).
- **Tostado de sal:** Este proceso tiene por objetivo mejorar la recuperación de cobre mediante la adición de sales como el cloruro de potasio (KCl) durante el tostado. El tostado se realiza a 400-600°C con una relación concentrado:KCl de 1:0,5 a 1:0,9 durante 1-4 horas obteniendo altas tasas de disolución de cobre (más del 99 %) en la lixiviación ácida posterior (Tumen-Ulzii et al., 2022).

Tabla 6*Comparación de métodos de tostación*

Método de tostado	Rango de temperatura	Reacciones clave	Ventajas	Desventajas
Sulfatación Tostada	500-625°C	$\text{CuFeS}_2 \rightarrow \text{CuSO}_4$	Recuperación de Cu alto	Descomposición a altas temperaturas
Asado en microondas	Calentamiento rápido	Óxidos de Cu $\rightarrow$ CuFeS_2	Rápido, eficiente	Costo del equipo
Tostado a la sal	400-600°C	$\text{CuFeS}_2 + \text{KCl}$	Disolución de alto Cu	Manejo de sal

Nota. Elaboración propia.

Capítulo III: Marco metodológico

3.1. Caracterización del diseño de investigación

3.1.1. Tipo y diseño de la investigación

La tesis se puede clasificar como una investigación cuantitativa, ya que la generación de datos numéricos permitió el análisis de las variables y la evaluación de las hipótesis planteadas. Además, la manipulación deliberada y controlada de las variables involucradas caracteriza esta investigación como experimental, lo que facilitó el estudio de los efectos generados por dichas variables. La investigación se llevó a cabo en un contexto temporal específico para la obtención de resultados, lo cual es una característica distintiva de las investigaciones transversales.

La caracterización de la presente investigación es congruente con las siguientes definiciones:

- Cuantitativa: Proviene del término Quantum (cuanto), este tipo de investigaciones generan datos numéricos utilizando la estadística y matemáticas, a través de fórmulas y ecuaciones, como técnicas para expresar resultados, según se refiere Rivas (2022) en el portal de la American Psychology Association (APA).

- Experimental: el portal de Tesis doctorales (2023) establece, la investigación experimental cuantitativa tiene como el objetivo estudiar y caracterizar el fenómeno observado con el aumento o disminución de las variables (manipulación) en condiciones rigurosamente controladas para establecer la causa de los fenómenos acontecidos.
- Transversal: la institución académica ESAN (2024), define este tipo de investigaciones en las que la recopilación y el análisis estadístico de la información se llevan a cabo en un período de tiempo determinado.

3.1.2. Nivel de investigación

El desarrollo de los objetivos planteados permitió alcanzar un nivel de investigación del tipo descriptivo correlacional, este nivel de investigación tiene mayor jerarquía al nivel exploratorio que es solo aplicable a las investigaciones con poca información que le sirvan de antecedentes respecto de la línea de investigación, siendo esta la razón por la cual no es posible caracterizar con este nivel a la presente investigación en particular debido a que anteceden diversas investigaciones enfocadas en la búsqueda de la lixiviación efectiva de concentrado calcopirítico.

Con el nivel de investigación descriptivo correlacional, se estableció la relación directa o inversa de las variables independientes sobre la recuperación del cobre en la lixiviación ácida del concentrado de cobre al mismo tiempo que se

procedió a la descripción matemática de las variables con mayor significancia sobre la recuperación de cobre.

3.1.3. Diseño de la Investigación

Se implementó un diseño factorial fraccionado 2^{k-p} ($k=4$ y $p=1$) que incluyó doble repetición y tres puntos centrales, resultando en un total de 19 pruebas experimentales (Tabla 7). La resolución IV de este diseño experimental permitió evaluar e identificar los efectos principales, así como las posibles interacciones de segundo orden entre las variables estudiadas. En este sentido, se analizaron las diversas combinaciones de las variables independientes y su influencia sobre la variable dependiente, correspondiente a la recuperación de cobre, lo que contribuyó a una comprensión más profunda del proceso y facilitó su modelamiento matemático.

Asimismo, la inclusión de puntos centrales permitió verificar la posible no linealidad del modelo matemático generado. A partir de los resultados obtenidos, se alcanzó un nivel de investigación descriptivo y correlacional. De acuerdo con Hernández (2014, p. 98), una investigación es descriptiva cuando especifica las características del proceso o fenómeno estudiado; en este caso, la disolución de cobre mediante un tratamiento de tostación con cloruro de potasio previo a la lixiviación ácida del concentrado. Del mismo modo, se logró un enfoque correlacional al analizar la relación existente entre las variables predictoras o independientes y la recuperación de cobre como variable dependiente, cuyo

propósito es determinar el grado de asociación entre las variables dentro de un contexto específico, en este caso, el proceso de disolución del cobre.

Tabla 7

Resumen del diseño factorial fraccionado

Descripción	Valor
Factores	4
Corridas	19
Bloques	1
Resolución	IV
Fracción	$\frac{1}{2}$
Puntos centrales	3

Nota. Imagen capturada en el software estadístico Minitab 19.

3.1.4. Diseño de los experimentos

La Tabla 8 indica la matriz de pruebas que usó para el diseño experimental fraccionado propuesto, se consideró criterios como el tipo de equipos y materiales disponibles en el laboratorio ESME, así como los reactivos previamente mencionados para la preparación de soluciones lixiviantes y la realización de 19 de las pruebas planteadas.

Tabla 8*Parámetros experimentales de las corridas*

Orden Corrida	relación Conc./KCl	tiempo de agitación	Porcentaje de sólidos	Concentración de ácido
1	1,25	120	20	50
2	5,00	120	5	50
3	5,00	120	20	150
4	5,00	20	5	150
5	1,25	120	20	50
6	1,25	120	5	150
7	1,25	20	5	50
8	1,25	20	20	150
9	5,00	20	20	50
10	1,25	120	5	150
11	1,25	20	20	150
12	5,00	120	5	50
13	3,13	70	13	100
14	5,00	120	20	150
15	3,13	70	13	100
16	1,25	20	5	50
17	3,13	70	13	100
18	5,00	20	20	50
19	5,00	20	5	150

Nota. Relación Conc./KCl: indica el cociente entre el peso del concentrado y el peso del cloruro de potasio.

3.1.5. Ejecución de experimentos

Las pruebas experimentales se realizaron enteramente en el laboratorio de hidrometalurgia ESME de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. A manera de resumen se detalla las siguientes etapas que obedecen a la preparación de reactivos y materiales para la realización de las pruebas, así como al análisis químico posterior.

– **Preparación del concentrado**

Se utilizó un mortero para eliminar los grumos de forma manual a fin de uniformizar la granulometría del concentrado antes de ser pesado.

Figura 11

Preparación del concentrado



Nota. La figura muestra la preparación del concentrado.

– **Pesado de reactivos**

La Tabla 9 indica la cantidad requerida tanto de concentrado y cloruro de potasio utilizado en cada una de las 19 pruebas, esta tabla está basada en la matriz de pruebas (Tabla 8) de la donde si indica los parámetros experimentales.

Tabla 9*Pesos de sólidos*

Orden Corrida	Escorificador	Total	Relación Conc./KCl	KCl	Concentrado
		g		g	g
1	H	10,00	1,25	4,444	5,556
2	A	2,50	5,00	0,417	2,083
3	G	10,00	5,00	1,667	8,333
4	B	2,50	5,00	0,417	2,083
5	H	10,00	1,25	4,444	5,556
6	D	2,50	1,25	1,111	1,389
7	C	2,00	1,25	0,889	1,111
8	I	10,00	1,25	4,444	5,556
9	F	10,00	5,00	1,667	8,333
10	D	2,50	1,25	1,111	1,389
11	I	10,00	1,25	4,444	5,556
12	A	2,50	5,00	0,417	2,083
13	E	6,25	3,125	1,515	4,735
14	G	10,00	5,00	1,667	8,333
15	E	6,25	3,125	1,515	4,735
16	C	2,00	1,25	0,889	1,111
17	E	6,25	3,125	1,515	4,735
18	F	10,00	5,00	1,667	8,333
19	B	2,50	5,00	0,417	2,083

Nota. Los valores fueron calculados a partir de los porcentajes de sólidos indicados en la matriz experimental. Las letras consignadas en la columna “Escorificador” se utilizaron para rotular los escorificadores, a fin de evitar confusiones durante el pesado y la manipulación de las muestras.

Figura 12

Pesado de reactivos sólidos



Nota. Arriba: se muestran 19 muestras de concentrado en sus respectivos escorificadores debidamente rotulados. Abajo: pesado de la muestra correspondiente a la prueba N.º 1; el exceso de peso corresponde a la merma esperada del proceso.

– **Tostación del concentrado**

Las muestras de concentrado de cobre se sometieron a tostación a 600 °C durante 2 horas, se utilizó 19 escorificadores de material refractario capaz de soportar la temperatura indicada, a cada escorificador se le agregaron las cantidades de concentrado y sal (KCl) según lo indicado en la matriz de pruebas (Tabla 8).

Figura 13

Tostación del concentrado



Nota. Las 19 muestras fueron sometidas a una temperatura de tostación de 600 °C, con el fin de evitar la generación de gases sulfurosos por sublimación del azufre.

El color rojizo pardo es indicativo de la oxidación producida durante el proceso de tostación al que fueron sometidos las diferentes muestras de concentrado.

– **Preparación de la solución lixivante**

En Tabla 10 se indica el volumen requerido de solución lixivante para cada prueba, así como los tres tipos de solución ácida (50, 100 y 150 g/l). Se preparó un litro por cada solución para realizar todas las pruebas.

Tabla 10

Características de la solución lixivante

Orden Corrida	Concentración ácida	Volumen requerido
	g/l	ml
1	50	50
2	50	50
3	150	50
4	150	50
5	50	50
6	150	50
7	50	50
8	150	50
9	50	50
10	150	50
11	150	50
12	50	50
13	100	50
14	150	50
15	100	50
16	50	50
17	100	50
18	50	50
19	150	50

Nota. Elaboración propia.

Figura 14

Preparación de solución ácida



Nota: Izquierda. Enrase de fiolas con agua destilada para la preparación de las soluciones ácidas. Derecha. Titulación ácida para ajustar los valores de acidez de las soluciones.

– Pruebas de lixiviación

Se elaboraron las 19 evaluaciones de acuerdo con la matriz presentada en la Tabla 8. Como se indicó anteriormente, cada prueba requirió un volumen de 50 ml de solución ácida, el peso del concentrado tostado varió de acuerdo al porcentaje de

sólidos de cada prueba, la Figura 15 muestra el equipo utilizado con el que se alcanzó los 500 RPM de agitación necesarios para la lixiviación.

Figura 15

Control de agitación



Nota. A la izquierda se muestra la verificación de la intensidad de agitación, realizada bajo condiciones ambientales; a la derecha, el equipo de agitación cedido para la ejecución de las pruebas.

– Filtración

Una vez finalizada las pruebas de lixiviación, las pulpas obtenidas fueron filtradas para obtener muestras de PLS libres de sólidos para ser diluidas y posteriormente analizadas mediante absorción atómica. La Figura 16 muestra el

proceso de filtración realizado y la Figura 17 muestra los sólidos retenidos posterior al proceso de filtración.

Figura 16

Proceso de filtración



Nota. El PLS filtrado fue almacenado en envases debidamente rotulados.

Figura 17

Muestras post-filtración



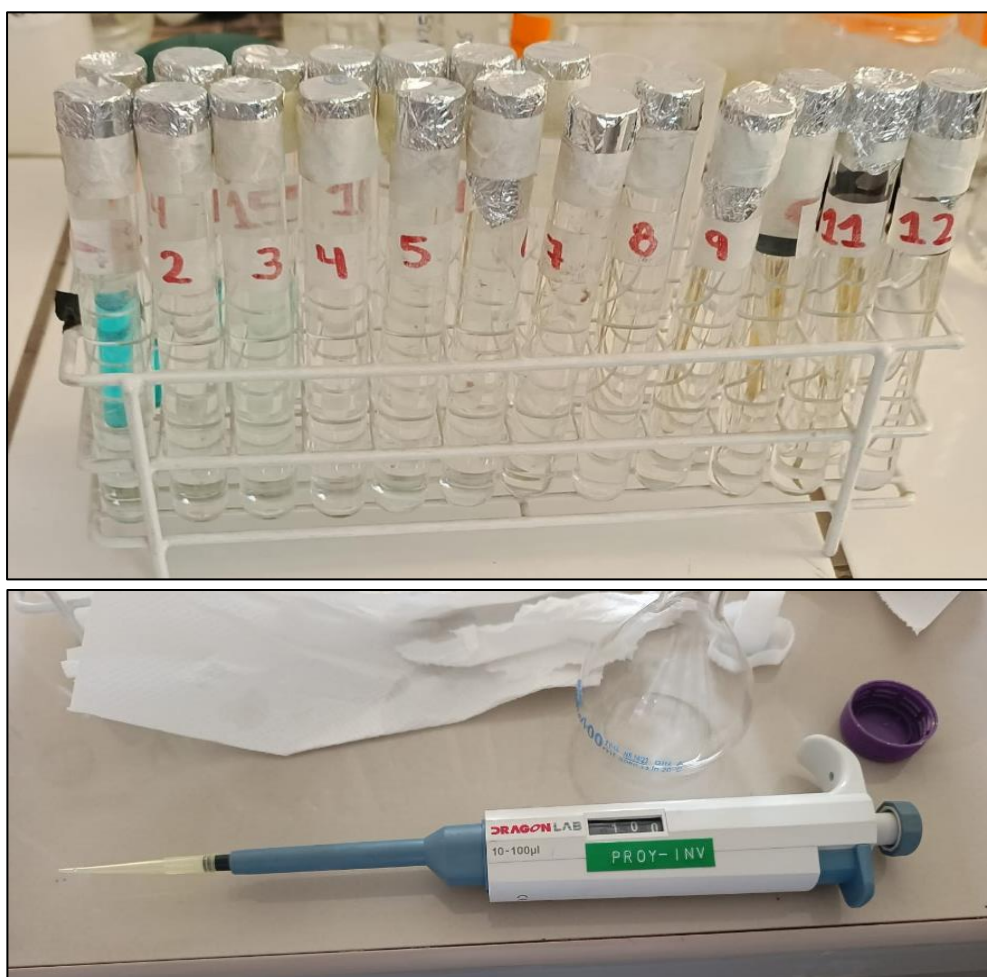
Nota. Izquierda: sólidos retenidos después de la filtración; derecha: muestras de PLS almacenadas y listas para ser diluidas.

– **Dilución de muestras líquidas**

Las muestras de PLS obtenidas, fueron diluidas utilizando una micropipeta, se tomaron alícuotas de 0,1 ml y se utilizó agua destilada para un volumen de enrase a 100 ml.

Figura 18

Dilución de PLS



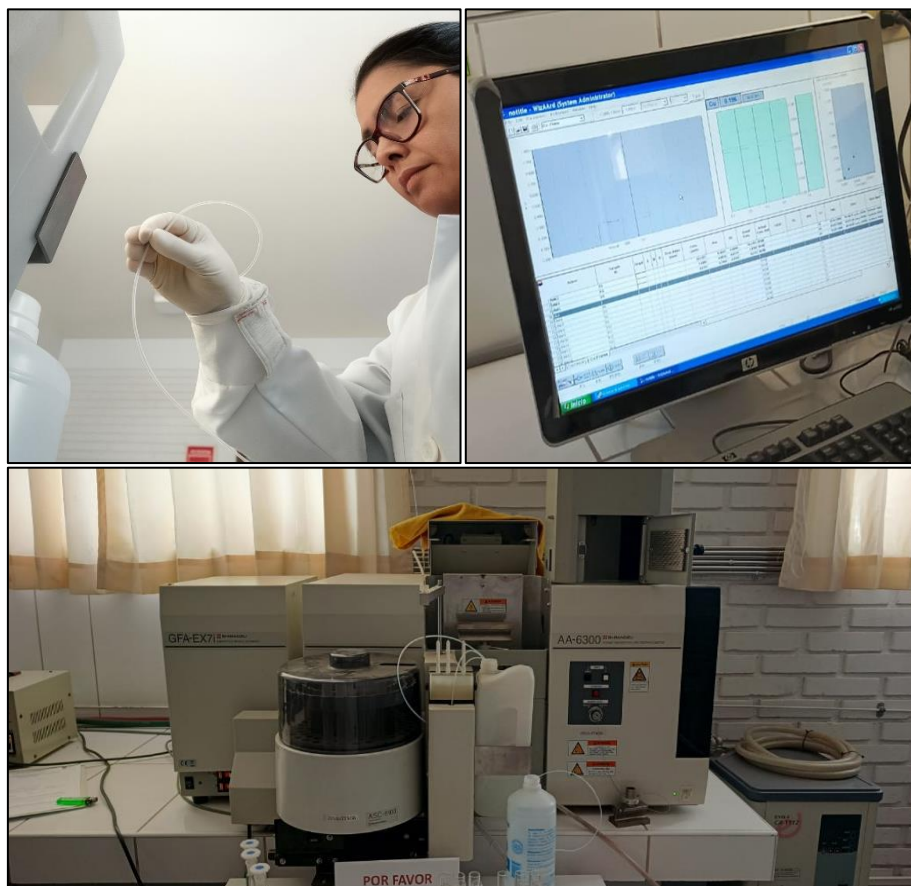
Nota. Arriba: 19 muestras líquidas listas para el análisis por espectrofotometría de absorción atómica; abajo: micropipeta utilizada para la dilución de las muestras, las cuales se enrasaron en fioles de 100 mL con agua destilada.

– **Análisis espectrofotométrico**

Las muestras anteriormente preparadas fueron analizadas en el equipo de absorción atómica cedido por la ESME. UNJBG para los análisis respectivos. Las muestras, así como la preparación de los estándares de calibración fueron realizadas por el personal responsable del área.

Figura 19

Análisis por absorción atómica



Nota. El equipo de absorción atómica (EAA) corresponde a la marca Shimadzu, modelo AA-6300.

3.1.6. Redacción de tesis

La ejecución de los experimentos conllevó a realizar el análisis químico de las soluciones acuosas obtenidas para determinar el contenido de cobre alcanzado en cada una de las pruebas, los resultados obtenidos fueron procesados en el paquete estadístico Minitab19, la interpretación de resultados según lo definido en la operacionalización de variables (Tabla 2) permitió realizar el análisis crítico de las hipótesis planteadas de acuerdo con la significancia estadística de las variables involucradas.

3.2. Materiales e instrumentos

A continuación, se detalla los materiales e instrumentos usados en la realización de las pruebas metalúrgicas:

3.2.1. Material de laboratorio

- Vasos de precipitados y probetas
- Pipetas, propipeta y micropipeta
- Papel filtros y pinzas
- Balanza analítica
- Agitadores magnéticos e imán agitador
- Horno eléctrico
- Equipo de absorción atómica Shimadzu modelo AA6300

- Microscopio de barrido electrónico SEM

3.2.2. Equipos de seguridad

Se menciona los siguientes equipos de protección personal (EPP) necesarios y utilizados para minimizar los riesgos asociados a la manipulación de sustancias nocivas como el ácido sulfúrico.

- Guantes de nitrilo
- Guantes con material refractario
- Gafas de seguridad
- Bata de laboratorio
- Zapato con punta de acero
- Respirador con filtros para vapores ácidos
- Careta facial

3.2.3. Insumos químicos

La siguiente lista enumera los agentes químicos usados en el desarrollo de los experimentos:

- Ácido sulfúrico
- Agua destilada
- Muestra de concentrado calcopirítico
- Cloruro de potasio grado QP
- Estándares para la calibración del equipo de absorción atómica

- Hidróxido de sodio para corregir la acidez de la solución lixiviante

3.3. Población y muestra

3.3.1. Población

El concentrado utilizado en el presente estudio corresponde a material donado a la Escuela Profesional de Metalurgia con fines de investigación. Debido a razones de confidencialidad, no se puede mencionar el nombre de la empresa donante. La Figura 20 muestra la caracterización química los principales elementos constituyentes del concentrado. Bajo este contexto, se denomina como población al total de concentrado presente en el laboratorio hidrometalúrgico.

3.3.2. Muestra

Se utilizó un total de 2 kg de muestra para llevar a cabo las 19 pruebas planteadas en el diseño experimental. En este sentido, la cantidad de muestra solicitada dependió de la cantidad estimada para las pruebas, por lo que el muestreo se realizó de manera no probabilística. No obstante, se aplicó criterios de homogeneización y cuarteo para garantizar la obtención de una muestra representativa de la población mencionada.

3.4. Tratamiento de datos

Se utilizó el software estadístico Minitab19 para el análisis estadístico, según el diseño planteado se evaluó 19 pruebas suficientes para generar los grados de libertad necesarios para generar el modelo matemático adecuado.

El uso combinado de los siguientes programas fue necesario para asegurar un tratamiento integral de los datos, mejorando tanto la precisión del análisis como la claridad en la presentación de los resultados de la investigación sobre la aplicación de la tostación con cloruro de potasio para la lixiviación ácida de concentrado de cobre.

- Minitab 19: Utilizado para llevar a cabo el planteamiento del diseño experimental, así como el análisis estadístico de los datos.
- Microsoft Excel: Utilizado para organizar y almacenar los datos recopilados durante los experimentos, así como para crear gráficos y tablas.
- Microsoft Word: Se empleo para redactar el informe final de la investigación.

Capítulo IV: Resultados y discusión

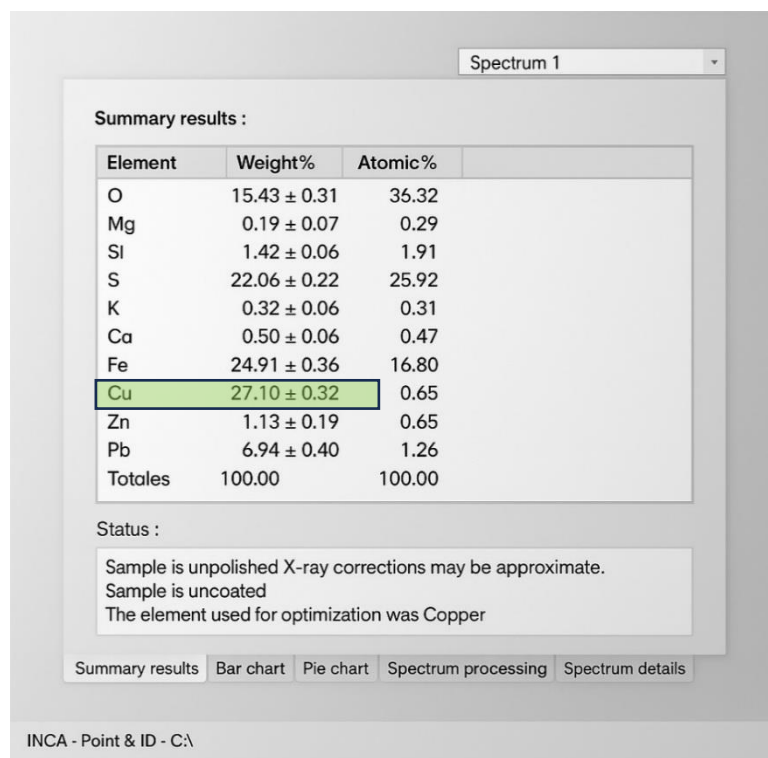
4.1. Caracterización del concentrado

4.1.1. Análisis Químico

La Figura 20 muestra el contenido metálico presente en concentrado de cobre, para interés del presente trabajo y como referencia para los cálculos del porcentaje de extracción, se resalta el contenido de cobre obtenido de 27,10 %.

Figura 20

Contenido metálico del concentrado



Nota. Resultados obtenidos del análisis químico mediante microscopía electrónica de barrido (SEM).

4.1.2. Porcentaje de humedad

Se eliminó la humedad contenida en el concentrado, utilizando un horno eléctrico de ESME a 105 °C, la Figura 21 muestra la cantidad de concentrado sometido a calor de vaporización del agua durante 24 horas.

Figura 21

Concentrado húmedo



Nota. El color verde es característico del concentrado de cobre calcopirítico.

La cantidad de humedad presente en el concentrado fue determinada mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{w_i - w_f}{w_i} * 100 \quad [1]$$

Donde:

W_i = Peso inicial del concentrado húmedo

W_f = Peso final del concentrado seco

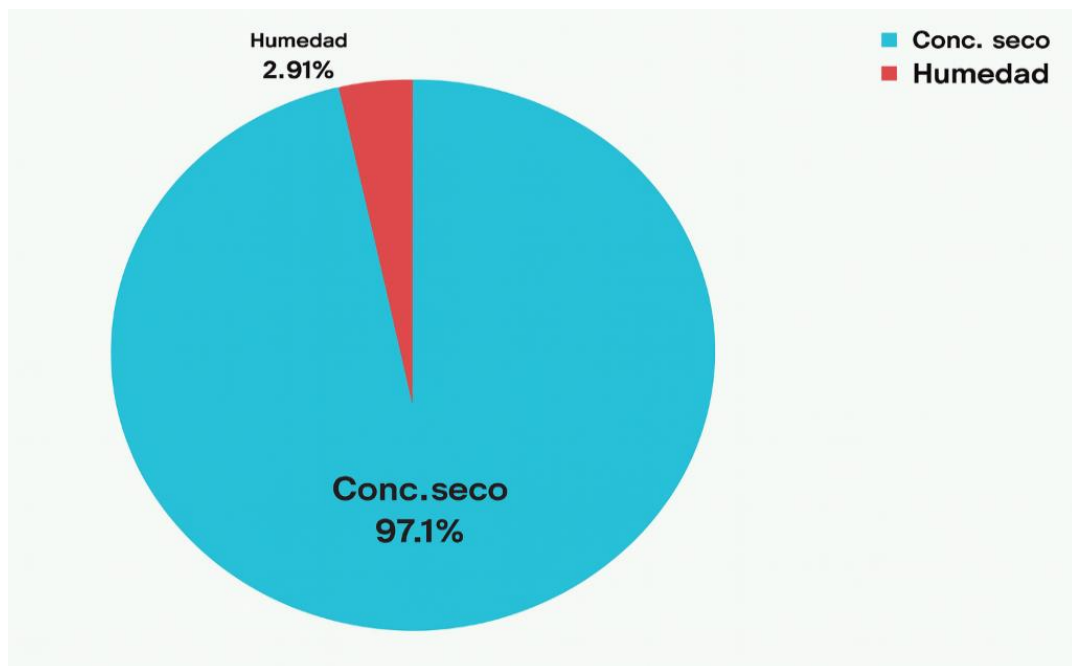
Los pesos registrados quedan indicados en la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad} = \frac{50,0020 - 48,5479}{50,0020} * 100 \quad [2]$$

$$\% \text{ Humedad} = 2,9081 \%$$

Figura 22

Humedad del concentrado



Nota. Aunque minoritario, el porcentaje de humedad es importante para determinar la cantidad exacta de concentrado utilizada en las pruebas posteriores de lixiviación.

4.2. Lixiviación de concentrados

4.2.1. Análisis de cobre por absorción atómica

La Figura 23 muestra la captura de pantalla del resumen de los análisis, la primera columna contiene valores en ppm de los análisis, la segunda columna muestra la absorbancia generada en cada muestra, la tercera columna indica el corrección de fondo o background y la última columna muestra la conversión de la primera columna de ppm a gramos por litro, para este caso en particular, los valores de la primera columna son multiplicados por 1000 debido al factor de dilución “1000”, este valor se obtiene dividiendo el volumen de la fiola en la que se hizo la dilución (100 ml) entre la alícuota tomada de 0,1 ml.

Figura 23

Captura de pantalla de resultados de absorción atómica

Analysis

Controls

Library

Calibrate

Samples

AA Wizard — Report Sheet

Instrument Settings

Lamp Type:

Wavelength:

Slit:

Background:

Pulse:

Detector Voltage:

Average Current:

Integrate Time:

Password:

Update Instrument

Save to Library

Conc. (ppm)	Abs.	BG	Conc. Actual
35.8061	1.5508	-0.0097	35.8061
23.557	1.1069	-0.0113	23.557
36.4456	1.5785	-0.009	36.4456
27.9582	1.2109	-0.0101	27.9582
36.0716	1.5623	-0.0092	36.0716
15.7927	0.684	-0.0104	15.7927
15.0654	0.6525	-0.0114	15.0654
34.9171	1.5123	-0.0099	34.9171
36.1016	1.5636	-0.0094	36.1016
16.6862	0.7227	-0.0113	16.6862
34.423	1.4909	-0.0096	34.423
24.324	1.0535	-0.011	24.324
35.245	1.5265	-0.0089	35.245
35.3374	1.5305	-0.0091	35.3374
32.6521	1.4142	-0.0098	32.6521
11.8168	0.5118	-0.0125	11.8168
33.832	1.4653	-0.0095	33.832
36.06	1.5618	-0.0085	36.06
24.2086	1.0485	-0.0105	24.2086

Status: Ready | User: System Administrator

AA Wizard v2.0

Nota: HCL, hace referencia al tipo de lámpara usado, en este caso lámpara de cátodo hueco para cobre

La Tabla 11 muestra los resultados las leyes obtenidas en cada una de las 19 pruebas, estos datos son tomados de los valores de la última columna de la tabla mostrada en la figura anterior.

Tabla 11

Leyes de cobre obtenidos

Muestra	Ley Cu
Nº	g/l
1	35,806
2	23,557
3	36,446
4	27,958
5	36,072
6	15,793
7	15,065
8	34,917
9	36,102
10	16,686
11	34,423
12	24,324
13	35,245
14	35,337
15	32,652
16	11,817
17	33,832
18	36,060
19	24,209

Nota. La tabla indica las leyes de los PLS obtenidos únicamente para cobre.

Los valores de la tabla anterior permitieron calcular los porcentajes de recuperación obtenidos en cada prueba, para ello se considera el contenido de cobre en la muestra cabeza (27,10 % de Cu) y el peso de concentrado usado en cada evaluación, los pesos del concentrado usado para cada caso están referidos en la Tabla 9. La masa de cobre obtenida en cada PLS se halla multiplicando las leyes por el volumen de muestra.

Tabla 12

Porcentajes de recuperación de cobre

Prueba	Ley Cu	Masa de Cu en PLS	Recuperación
Nº	g/l	g	%
1	35,806	1,790	79,275
2	23,557	1,178	52,156
3	36,446	1,822	80,691
4	27,958	1,398	61,900
5	36,072	1,804	79,863
6	15,793	0,790	34,965
7	15,065	0,603	26,684
8	34,917	1,746	77,307
9	36,102	1,805	79,930
10	16,686	0,834	36,944
11	34,423	1,721	76,213
12	24,324	1,216	53,854
13	35,245	1,762	78,033
14	35,337	1,767	78,238
15	32,652	1,633	72,292
16	11,817	0,473	20,930
17	33,832	1,692	74,905
18	36,060	1,803	79,838
19	24,209	1,210	53,598

Nota. La masa de cobre en cabeza fue de 2,258 g y el volumen de la muestra fue de 50 mL.

4.3. Análisis del diseño factorial

Las recuperaciones obtenidas en las 19 pruebas mostradas en la tabla anterior son tabuladas para el análisis respectivo del diseño factorial en el software Minitab 19.

4.3.1. Análisis de varianza

La Tabla 13 muestra los resultados del ANOVA de la regresión factorial aplicado, esta indica el grado de significancia de las variables y sus interacciones con el grado de recuperación de cobre. Se consideró un error del 5 % para el desarrollo de las pruebas por lo que el valor de α es 0,05 (confiabilidad de 95 %).

Tabla 13

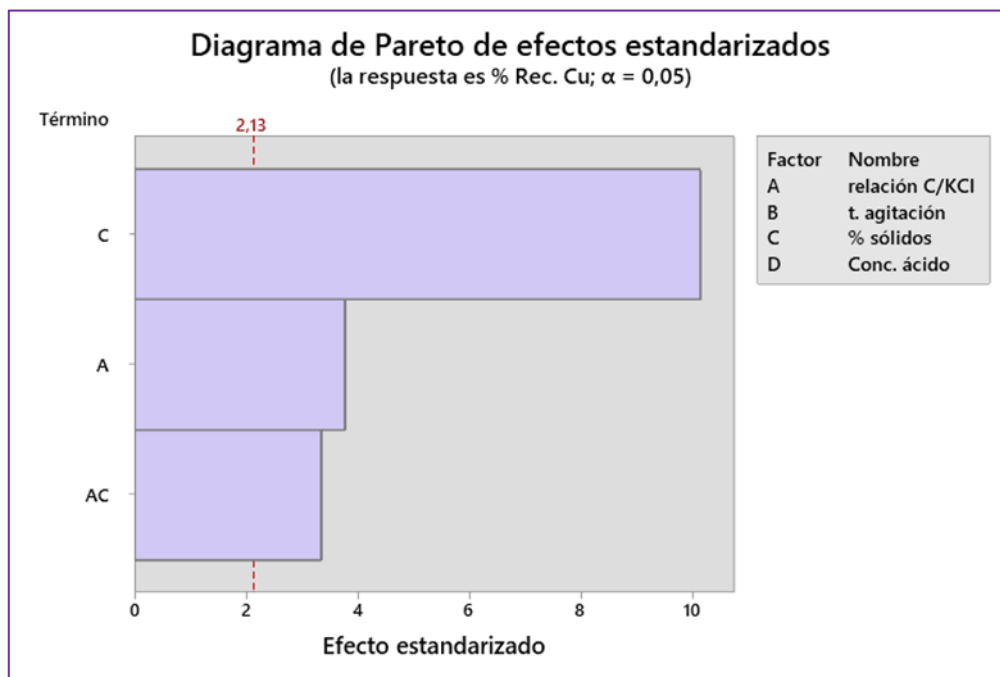
Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	6572,69	2190,90	42,70	0,000
Lineal	2	5997,32	2998,66	58,44	0,000
relación C/KCl	1	729,30	729,30	14,21	0,002
% sólidos	1	5268,02	5268,02	102,67	0,000
Interacciones de 2 términos	1	575,37	575,37	11,21	0,004
relación C/KCl*% sólidos	1	575,37	575,37	11,21	0,004
Error	15	769,65	51,31		
Curvatura	1	516,80	516,80	28,61	0,000
Falta de ajuste	4	178,14	44,53	5,96	0,010
Error puro	10	74,72	7,47		
Total	18	7342,34			

Nota. Los datos se tomaron del análisis del diseño factorial ejecutado en Minitab 19.

Figura 24

Diagrama de Pareto



Nota. Tomada del análisis del diseño factorial ejecutado en Minitab 19.

El análisis de varianza y el diagrama de Pareto muestran el siguiente análisis:

- Efectos lineales significativos: % sólidos (dominante), relación C/KCl. El tiempo de agitación y concentración de ácido no son significativos ($p > 0,05$)
- Interacciones significativas: C/KCl $\times$ % sólidos (muy fuerte $p < 0,05$).

- Hay curvatura significativa ($p < 0,05$) $\rightarrow$ conviene un modelo cuadrático especialmente en las variables % de sólidos y relación C/KCl.
- El error residual del modelado es alto (MC ajustado $\approx 51,31$), el valor de la falta de ajuste ($p = 0,01$) indica que el modelado lineal generado no explica adecuadamente la respuesta, la variación o error residual no proviene del error puro si no que indica que hay patrones no modelados

4.3.2. Ecuación de regresión obtenido

De acuerdo con la evaluación del ANOVA, la Tabla 14 presenta el siguiente resumen del ajuste del modelo generado.

Tabla 14

Resumen del modelo de regresión

S	R ²	R ² (ajustado)	R ² (pred)
7,163	89,52 %	87,42 %	85,65 %

Nota. R² (pred) corresponde al coeficiente de determinación predictivo.

Ecuación de regresión:

% Rec. Cu = 4,88 + 8,93 relación C/KCl + 3,752 % sólidos - 0,426 relación

C/KCl*% sólidos

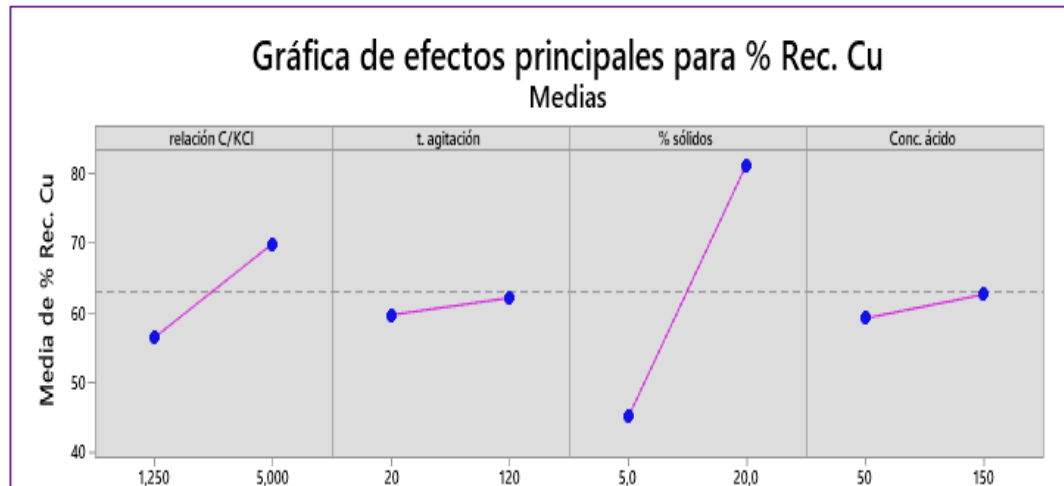
[3]

4.3.3. Influencia individual de los factores

La Figura 25 muestra el efecto de cada una de las variables sobre el porcentaje de recuperación.

Figura 25

Efectos individuales de las variables



Nota. La imagen fue tomada del análisis del diseño factorial ejecutado en Minitab 19.

- El porcentaje de sólidos es el factor dominante: al pasar del 5 % al 20 % la recuperación sube con fuerza desde una recuperación aproximada de 45 % a valores superiores a 80 %.
- La relación C/KCl tiene efecto positivo claro: niveles altos alcanzan recuperaciones cercanas a 70 %.
- La concentración de ácido muestra un incremento moderado de 58 % aproximadamente hasta valores cercanos a 62 %.

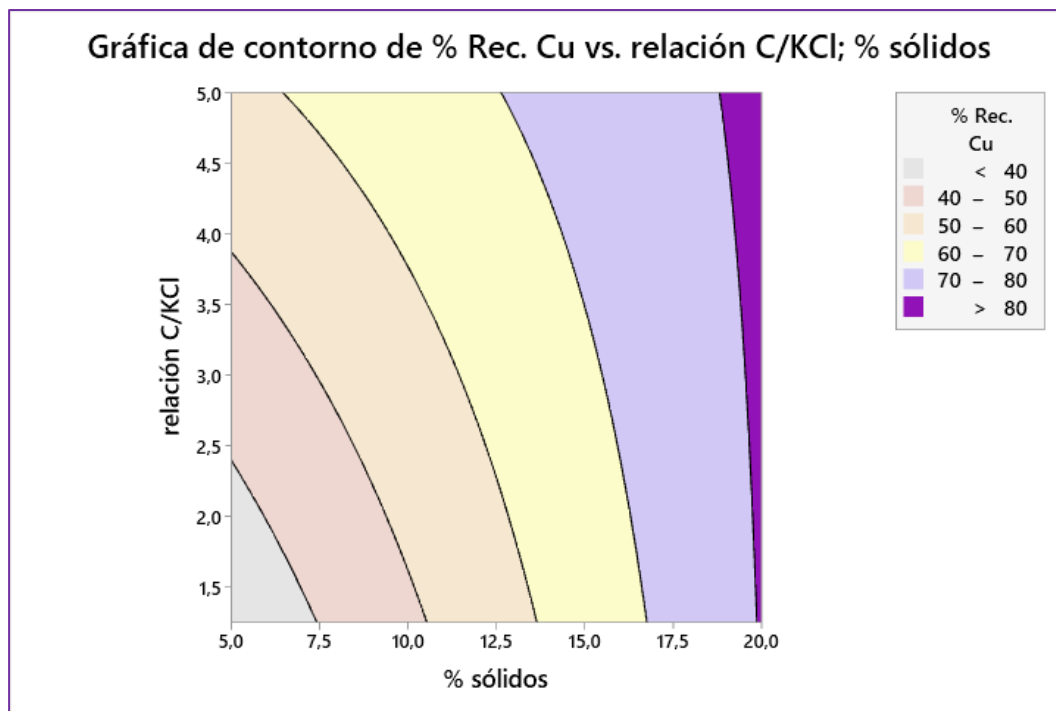
- El tiempo de agitación apenas cambia la respuesta (ligero aumento), por lo que su efecto principal es débil.

4.3.4. Combinación de variables más significativas

Según la Figura 26, muestra la zona de mayor recuperación (>80 %) corresponde a la banda en morado, esta región aparece solo cerca del extremo alto del porcentaje de sólidos (19 a 20 %) con relación C/KCl también alto (4,5 a 5). A medida que aumentan el porcentaje de sólidos (eje x) y la relación C/KCl (eje y), el porcentaje de recuperación de cobre aumenta.

Figura 26

Análisis de contorno



Nota. La imagen fue tomada del análisis del diseño factorial ejecutado en Minitab 19.

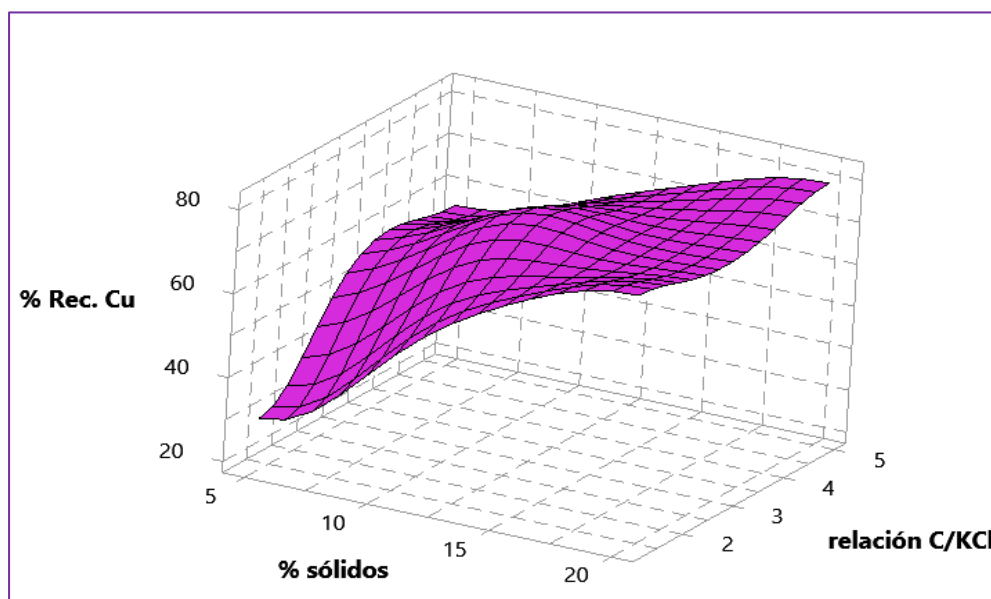
De la figura anterior, también es observable que las líneas que demarcan las regiones no son rectas, confirmando que hay curvatura en la superficie. Las curvas están más juntas en la dirección del porcentaje de sólidos que en la de la relación C/KCl, por tanto, la recuperación es más sensible a cambios en el porcentaje de sólidos que a cambios equivalentes en la relación C/KCl.

4.3.5. Análisis de la superficie de respuesta

La curvatura de la superficie de la Figura 27 confirma que la respuesta no es lineal, así mismo, el beneficio de subir la relación C/KCl es mayor cuando el porcentaje de sólidos ya es alto, esto confirma que hay una interacción significativa entre ambas variables.

Figura 27

Superficie de respuesta del % de recuperación



Nota. La imagen fue tomada del análisis del diseño factorial ejecutado en Minitab 19.

La superficie muestra que el porcentaje de sólidos es el factor más influyente: al pasar de 5 % a un rango de 12 - 15 % la recuperación aumenta con una pendiente muy pronunciada. Entre 15 a 20 % de sólidos la recuperación sigue aumentando, pero cada vez menos. La relación C/KCl también tiene efecto positivo, aunque más suave que el de sólidos: eleva sustancialmente la recuperación cuando se incrementa desde valores entre 4 a 5.

4.3.6. Contrastación de la técnica aplicada

El promedio de los porcentajes de recuperación más altos corresponde a las pruebas 3 y 14 (ver Tabla 12), entre ambas se obtuvo una media de 79,465 %.

Para contrastar el porcentaje de cobre obtenido mediante la aplicación de tostación del concentrado y el uso de la sal KCl, se realizó una prueba adicional con los mismos parámetros de evaluación donde se obtuvo la mejor recuperación, es decir:

- porcentaje de sólidos de 20 %
- relación concentrada/KCl
- tiempo de agitación de 120 minutos
- concentración de ácido en la solución lixivante de 150 g/l.

El análisis de la muestra resultante arrojó una ley de PLS de 0,611 g/l de cobre, este valor expresado en porcentaje de recuperación representa un valor de 1,352 %.

La Figura 28 muestra la diferencia de coloración entre ambas soluciones PLS obtenidas, la figura de la izquierda corresponde a la solución obtenida sin la aplicación de tostación y KCl, todas las soluciones mostradas en la figura de la derecha presentan una coloración azul verdosa indicando la presencia de cobre disuelto.

Figura 28

Contraste visual de soluciones obtenidas



Nota. A la izquierda se muestran PLS sin tostación ni KCl, mientras que a la derecha se presentan PLS con aplicación de tostación y adición de KCl.

4.4. Discusión de resultados

En las pruebas de lixiviación, las leyes de cobre medidas por absorción atómica se tradujeron en valores que oscilaron desde 20,930 % hasta 80,694 % de recuperación de cobre

Las pruebas 3, 5, 9, 14 y 18 obtuvieron mayores extracciones, los porcentajes altos de recuperación se asocian a combinaciones de alto porcentaje de sólidos y alta relación concentrado/KCl; por el contrario, cuando estas variables se mantuvieron en niveles reducidos, se obtuvo las recuperaciones más bajas.

En el ANOVA del diseño factorial, el % de sólidos emergió como el factor dominante y la relación C/KCl mostró también un efecto lineal significativo; en cambio, la concentración de ácido y el tiempo de agitación no resultaron determinantes al nivel de significancia utilizado ($\alpha = 0,05$).

Se detectó una interacción significativa entre C/KCl y % de sólidos, así como la evidencia de curvatura, lo que sugiere que un modelo puramente lineal no describirá adecuadamente la respuesta porcentaje de recuperación de cobre. Coherentemente, la falta de ajuste fue significativa, a pesar de que el ajuste general del modelo resultó alto con R^2 ajustado de 87,42 %.

La ecuación de regresión ajustada **% Rec. Cu = 4,88 + 8,93 relación C/KCl + 3,752 % sólidos - 0,426 relación C/KCl*% sólidos**

[3] producto de las evaluaciones:

% Rec. Cu = 4,88 + 8,93 relación C/KCl + 3,752 % sólidos - 0,426 relación C/KCl*% sólidos

Indica que, es un modelo lineal múltiple con un término de interacción donde la variable dependiente Y es el % de Recuperación de Cobre y las variables independientes son la razón C/KCl (X) y el % de Sólidos (W). El modelo toma la forma general $Y=a+bX+cW+d(XW)$, donde a es el intercepto con el eje de las abscisas, b y c son los efectos principales de cada variable, y d es el efecto combinado o de interacción. De acuerdo con los coeficientes calculados, el intercepto es $a = 4.88$ y el coeficiente $b = 8.93$, lo que muestra que al aumentar la relación C/KCl se incrementa la recuperación de cobre, el coeficiente $c = 3.752$ indica que, a mayor porcentaje de sólidos, mejor recuperación. Pero el valor de interacción $d = -0.426$ indica que cuando ambas variables aumentan, el efecto combinado no es aditivo, sino que disminuye el aumento esperado en la recuperación, al existir una interacción negativa entre la relación C/KCl y el porcentaje de sólidos.

La zona de mayor recuperación (>80 %) se ubica en el extremo alto del porcentaje de sólidos (19 a 20 %) combinada con la relación concentrado/KCl elevada (4,5 a 5). La pendiente más pronunciada a lo largo del eje “% de sólidos” revela una sensibilidad mayor de la respuesta a esta variable que a cambios equivalentes en la relación C/KCl.

Finalmente, la prueba de contraste es contundente: replicando las “mejores” condiciones, pero sin tostación y sin adición de cloruro de potasio, la ley del PLS cae a 0,611 g/L, equivalente a una recuperación de apenas 1,35 %. Este contraste,

la aplicación de ambos factores, valida causalmente la contribución de la técnica (tostación + cloruración con KCl) al aumento de la extracción.

Conclusiones

- La tostación con cloruro de potasio modifica de manera positiva el comportamiento de lixiviación del concentrado calcopirítico, bajo las condiciones estudiadas, permitió alcanzar recuperaciones cercanas al 80 % en solo 2 horas de lixiviación, mientras que al replicar las “mejores” condiciones operativas sin tostación ni KCl la recuperación cayó a 1,35 %. Este contraste, se demuestra que la tostación clorurante habilita y acelera la disolución de cobre, mejorando la cinética global del proceso 58,86 veces más rápido que sin la aplicación de la técnica propuesta.
- El tratamiento térmico controlado a 600 °C generó un material claramente más lixiviable, las pruebas con concentrado tostado produjeron leyes elevadas que, en el mejor dominio operativo, superaron el 80 % de recuperación de cobre confirmando que la tostación a 600 °C es eficaz para lixiviar el concentrado y obtener altas extracciones en las condiciones ensayadas.
- Entre las variables operativas, el porcentaje de sólidos fue el factor dominante y la relación concentrado/KCl tuvo un efecto positivo significativo. En cambio, la concentración de ácido y el tiempo de lixiviación presentaron efectos débiles en el rango estudiado. La región de mayor desempeño se ubica con porcentajes de sólidos entre 19 a 20 % y relación concentrada/KCl entre 4,5–5.

Recomendaciones

- Desde el punto de vista industrial, el tratamiento de un mayor porcentaje de sólidos es favorable debido a que permite la obtención de mayor contenido cobre disuelto, mientras que una relación concentrado/KCl alta proporciona más agente clorurante para promover la disolución de cobre de minerales refractarios como la calcopirita; sin embargo, los resultados del estudio determinan que es posible obtener recuperaciones altas pero que este mecanismo no ha sido modelado adecuadamente por lo que es necesario ampliar la investigación aplicando metodologías que incluyan variables cuadráticas como los modelos de diseño central compuesto (DCC), esto permitirá a su vez la optimización de la recuperación de cobre, aspecto que no es posible desarrollar con el modelo factorial fraccionado utilizado pero que ha permitido dilucidar la relevancia estadística del porcentaje de sólidos y la relación concentrado/cloruro de potasio.
- El desarrollo de las evaluaciones del presente trabajo tomó como factor constante a la temperatura de lixiviación, las pruebas fueron desarrolladas a temperatura ambiente. Se requiere evaluar si la variación de este factor puede potenciar la cinética de lixiviación obtenida con los parámetros tomados en cuenta.

- Es necesario la realización de pruebas adicionales donde se contemple la posible sustitución del cloruro de potasio directamente con agua de mar considerando el alto contenido de cloruro de sodio presente en este líquido debido a que ha quedado demostrado la acción positiva de usar un agente clorurante.

Referencias

- Arias, J. (2021). Guía para elaborar la operacionalización de variables. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, 10(28), 42–56.
<https://www.espacioimasd.unach.mx/index.php/Inicio/article/download/274/974>
- Bai, Y., Wang, W., Dong, K., Xie, F., Lu, D., Chang, Y., & Jiang, K. (2022). Effect of microwave pretreatment on chalcopyrite dissolution in acid solution. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 471–481. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.014>
- Bayati, B., Azizi, A., & Karamoozian, M. (2018). A comprehensive study of the leaching behavior and dissolution kinetics of copper oxide ore in sulfuric acid lixiviant. *Scientia Iranica*, 25(3C), 1412–1422.
<https://doi.org/10.24200/sci.2018.5226.1154>
- Dikhtievskaya, L. V., & Shevchuk, V. V. (2014). Inorganic modifiers controlling the physicochemical and mechanical properties of potassium fertilizer dispersions. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 87(9), 1233–1238.
<https://doi.org/10.1134/S1070427214090055>

El Peruano. (2024). *El incremento del precio del cobre*.
<https://elperuano.pe/noticia/244134-el-incremento-del-precio-del-cobre>

ESAN. (2024). *Estudios longitudinales y transversales: Pautas para su aplicación*. <https://www.esan.edu.pe/conexion-esan/estudios-longitudinales-y-transversales-pautas-para-su-aplicacion>

Faraji, F., Golmohammadzadeh, R., & Pickles, C. (2022). Potential and current practices of recycling waste printed circuit boards: A review of the recent progress in pyrometallurgy. *Journal of Environmental Management*, 316, 115242.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115242>

Guillén, J. (2022). *Cinética de lixiviación de mineral oxidado de cobre en bateas para la obtención de sulfato de cobre con mineral oxidado de la unidad minera Chaspaya* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<https://repositorio.unsa.edu.pe>

Han, D., Wang, W., Sun, S., Fang, H., Ren, J., & Dai, Y. (2017). Potassium salt water leaching from municipal solid waste incineration fly ash. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 37(6), 2223–2231.
<https://doi.org/10.13671/j.hjkxxb.2016.0420>

- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill. <https://apiperiodico.jalisco.gob.mx>
- Herrera, H. (2019). *Estudio cinético de la lixiviación del cobre a partir de la malaquita mediante soluciones diluidas de ácido cítrico* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <https://repositorio.unsa.edu.pe>
- Kimball, B. (2013). Chalcopyrite-bearer of a precious, non-precious metal. *Geology Today*, 29(1).
- Liu, J., Xie, H., & Han, B. (2025). The utilization of copper smelting slag: A critical review. *Minerals*, 15(9), 926. <https://doi.org/10.3390/min15090926>
- Liu, W., Zhao, Y., Chen, J., Azam, M., Asubonteng, D., Ngoie, M., Lin, S., & Sun, W. (2023). Advancements in removing fluorine from copper concentrate. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 40(5), 1487–1497. <https://doi.org/10.1007/s42461-023-00820-3>
- Liu, Z.-X., Zhou-Lan, Y., Hu, H.-P., & Qi-Yuan, C. (2012). Leaching kinetics of low-grade copper ore with high-alkalinity gangues in ammonia–ammonium sulphate solution. *Journal of Central South University*, 19, 77–84. <https://doi.org/10.1007/s11771-012-0975-8>
- Mamani, R. (2018). *Estudio de la cinética de consumo de ácido sulfúrico y la lixiviación de minerales oxidados de cobre* [Tesis de licenciatura,

Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann].
<https://repositorio.unjbg.edu.pe>

MEM. (2023). *Mapa del cobre*. Ministerio de Energía y Minas.
<https://cdn.www.gob.pe>

Méndez, A., Álvarez, M. L., Fidalgo, J. M., Di Stasi, C., Manyà, J. J., & Gascó, G. (2022). Biomass-derived activated carbon as catalyst in the leaching of metals from a copper sulfide concentrate. *Minerals Engineering*, 183, 107594.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107594>

Mokmeli, M., & Parizi, M. T. (2022). Low-grade chalcopyrite ore: Heap leaching or smelting recovery route? *Hydrometallurgy*, 211, 105885.
<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105885>

Mulaba-Bafubiandi, A. F. (2006). Characterization of products emanating from conventional and microwave energy roasting of chalcopyrite concentrate. *Hyperfine Interactions*, 168(1–3), 923–928.
<https://doi.org/10.1007/s10751-006-9398-y>

Nozari, I., & Azizi, A. (2020). Experimental and kinetic modeling investigation of copper dissolution process from an Iranian mixed oxide/sulfide copper ore. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 6(3), 437–450. <https://doi.org/10.1007/s40831-020-00291-6>

Schlesinger, M. E., King, M. J., Sole, K. C., & Davenport, W. G. (2011).

Extractive metallurgy of copper. Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/C2010-0-64841-3>

Toro, N., Moraga, C., Torres, D., Saldaña, M., Pérez, K., & Gálvez, E.

(2021). Leaching chalcocite in chloride media: A review. *Minerals*,

11(11). <https://doi.org/10.3390/min11111197>