



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrion

Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

Pretratamiento de minerales sulfurados de cobre mediante autoclave para mejorar la recuperación en el centro de investigación de metalurgia y materiales – Huacho 2024

Tesis

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

Autores

Angely Lizet Jaramillo Lozano

Juan Alexander Villanueva Arribasplata

Asesor

Dr. Máximo Cisneros Tejeira


Dr. Máximo Cisneros Tejeira
CIP. 46832


Huacho – Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial – Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales. **Sin Derivadas:** Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL
JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN
LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALÚRGICA.

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA.

INFORMACIÓN DE METADATOS.

DATOS DEL AUTOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Angely Lizet Jaramillo Lozano	76072566	27/08/2026
Juan Alexander Villanueva Arribasplata	70206660	27/08/2026
DATOS DEL ASESOR:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Máximo Cisneros Tejeira	23904230	https://orcid.org/0000-0001-7953-9559
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADO-PREGRADO:		
NOMBRES Y APELLIDOS	DNI	CÓDIGO ORCID
Berardo Beder Ruiz Sanchez	31602007	https://orcid.org/0000-0002-1822-9204
Gerardo Luis Mora Palomino	16120729	https://orcid.org/0000-0002-4623-5580
Crisostomo Villanueva Valdivia	42471434	https://orcid.org/0000-0007-9722-8261

2026-043737 Jaramillo Loano 2026-045343 Villanue...

PRETRATAMIENTO DE MINERALES SULFURADOS DE COBRE MEDIANTE AUTOCLAVE PARA MEJORAR LA RECUPERACIÓN ...

 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN DE LA FIQyM - PREGRADO - 2026

 Unidad de Investigación de la FIQyM - 2026

 Facultad de Ingeniería Química y Metalúrgica

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::1:3615376717

84 páginas

Fecha de entrega

22 jul 2026, 12:52 a.m. GMT-5

14.870 palabras

Fecha de descarga

22 jul 2026, 12:57 a.m. GMT-5

85.881 caracteres

Nombre del archivo

Borrador_Pretratamiento_de_Minerales_Sulfurados_de_Cobre.docx

Tamaño del archivo

1.7 MB



Página 2 de 50 - Descripción general de integridad

Identificador de la entrega trn:oid:::1:3615376717

13% Similitud general

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

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Exclusiones

- N.º de coincidencia excluida

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

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

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

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres, por su amor, apoyo incondicional y sacrificio constante, quienes han sido el pilar fundamental en mi formación personal y profesional.

A mi familia, por su comprensión y motivación permanente para alcanzar mis metas

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme la fortaleza y la oportunidad de culminar esta etapa de mi vida.

Expreso mi sincero agradecimiento a mi asesor y a los docentes que contribuyeron con sus conocimientos y orientación en el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, agradezco a mi familia y amigos por su apoyo y motivación durante todo este proceso académico.

INDICE

Resumen.....	xii
Abstract	xiii
Introduccion	xiv
Capítulo I.....	1
Planteamiento Del Problema	1
1.1.Descripción De La Realidad Problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema	2
1.2.1Problema general.....	2
1.2.2.Problemas específicos	3
1.3. Objetivos de la Investigación	3
1.3.1.Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Justificación de la Investigación.....	4
1.4.1.Innovación Tecnológica en el Sector Minero:.....	4
1.4.2.Reducción de Pasivos Ambientales y Mejora del Entorno Social	4
1.4.3.Relevancia Económica	5
1.5. Delimitaciones del estudio	5
1.5.1.Ámbito Geográfico.....	5
1.5.2.Ámbito Temporal.....	5
1.5.3. Ámbito Temático	5
1.5.4.Ámbito Tecnológico.....	6
1.5.5. Ámbito de Impacto.....	6

1.6. Viabilidad del estudio	6
1.6.1 Disponibilidad de recursos:	6
1.6.2. Acceso a Datos y Muestras:	6
1.6.3 Capacidad Técnica y Experiencia:	6
1.6.4. Apoyo Financiero:	7
1.6.5 Factibilidad en la Implementación:	7
Capítulo II.	8
Marco teórico	8
2.1 Antecedentes de la investigación	8
2.1.1. Investigaciones internacionales	8
2.1.2. Investigaciones nacionales	14
2.2. Bases teóricas	20
2.2.1. Minerales sulfurados de cobre	20
2.2.2. Hidrometalurgia del cobre	21
2.2.3. Fundamentos del pretratamiento de minerales sulfurados	21
2.2.4. Principios de la oxidación en autoclave	22
2.2.4.1. Oxidación de la Arsenopirita (FeAsS) a Escorodita	22
2.2.4.2. Oxidación de la Pirita (FeS ₂) a Hematita	22
2.2.5 Variables operativas del proceso en autoclave	23
2.2.6.1. Formación y Control de Fases Sólidas: Hematita, Escorodita y Jarositas	24
2.2.7. Recuperación del cobre	24
2.2.8. Sustentabilidad y beneficios tecnológicos	25
2.2.9. Oxidación a Presión	25

2.2.10. Autoclave en Minería.....	26
2.2.11. Oxidación de alta presión de minerales sulfurados de cobre	27
2.2.12. Análisis termodinámico.....	28
2.2.13. Minerales sulfurados refractarios.....	28
2.4.13.1. Ecuación general de oxidación de calcopirita:.....	29
2.2.14. Diagramas de E-pH (Pourbaix).....	29
2.2.15. Energía libre de Gibbs (ΔG)	29
2.2.16. Constante de equilibrio (K).....	30
2.2.17. Análisis termodinámico de la oxidación en autoclave de sulfuros	31
2.3. Definición de términos básicos	32
2.3.1. Minerales refractarios.....	32
2.3.2. Tecnología de pretratamiento	33
2.4. Hipótesis de investigación.....	34
2.4.1. Hipótesis general	34
2.4.2. Hipótesis Específicas	35
2.5. Operacionalización de las variables	35
2.5.1. Variable independiente (VI).....	35
2.5.2. Variable dependiente (VD)	36
2.5.3. Variables intervinientes o controladas	36
Capítulo III.	38
Metodología	38
3.1. Diseño metodológico.....	38
3.1.1. Tipo de estudio.....	38

3.1.2. Diseño de investigación	38
3.1.3. Diseño experimental	40
3.2. Población y muestra	40
3.2.1. Población... ..	40
3.2.2. Muestra.....	40
3.3. Técnicas de recolección de datos	40
3.3.1. Selección de la muestra	40
3.3.2. Instrumentos de Medición	41
3.3.3. Análisis de datos	41
3.4. Técnicas para el procedimiento de la información	41
3.4.1. Interpretación de resultados.....	42
3.4.2. Validación y verificación	42
Capítulo IV.....	43
Resultados	43
4.1. Análisis de resultados	43
4.1.1. Especificaciones de autoclave.....	43
4.1.2. Desarrollo del proceso.....	43
Operación en autoclave	43
4.1.3. Métodos de análisis post-lixivación.....	44
4.1.4. Parámetros de operación controladas.....	44
4.1.5. Parámetros de Operación y Condiciones por Prueba.....	45
4.1.6. Lixiviación y concentraciones de cobre en solución.....	46
4.1.8. Balance Metalúrgico	49

4.1.9. Analisis de Varianza (ANOVA) y significancia de variables.....	49
4.1.10.Diagrama de Pareto	50
4.1.11.Diagnóstico y Validación del Modelo Estadístico	52
4.1.12. Efectos Principales e Interacciones de los Parámetros Operativos	53
4.1.12.1. Grafico de efectos Principales.....	53
4.1.12.1. Grafico de interacciones.....	54
4.1.13.Optimizacion y modelo predictivo del proceso	54
4.1.13.1. Resultados de la optimización de parámetros	54
4.1.14.Superficie de respuesta y región operativa optima	55
4.1.15. cinetica de la lixiviación de oro	56
4.1.16. Cálculo de velocidades de lixiviación	56
Capítulo V	57
Discusión.....	57
5.1. Discusión de resultados.....	57
Capítulo VI.....	60
Conclusiones y recomendaciones.....	60
6.1. Conclusiones	60
6.2. Recomendaciones.....	63
Capitulo VII	65
Referencias Bibliográficas	65
ANEXOS	69

Resumen

El presente trabajo de investigación evaluó el pretratamiento oxidativo en autoclave de un mineral refractario sulfurado de cobre con ley de cabeza de 1,60 % Cu, mediante un diseño experimental factorial fraccionario 2^{4-1} que analizó el efecto de la presión de O₂ (20-30 PSI), presión final (50-100 PSI), temperatura (290-300 °C) y tiempo de reacción (30-50 min). Los resultados del balance metalúrgico revelaron que la presión final fue el factor dominante y de mayor impacto negativo: a 50 PSI se alcanzaron recuperaciones promedio del 90,29 %, mientras que a 100 PSI descendieron al 45,94 %, representando una diferencia superior al 44 %. El tiempo mostró un efecto positivo consistente (+3,55 %), la presión de O₂ un incremento moderado (+2,56 %) y la temperatura no presentó influencia significativa en el rango estudiado.

Las condiciones óptimas identificadas fueron: presión de O₂ 30 PSI, presión final 50 PSI, temperatura 290 °C y tiempo 50 min, logrando una recuperación máxima de 94,00 % de cobre (prueba N° 5). Este pretratamiento oxidativo demostró una eficiencia excepcional al destruir la matriz refractaria (principalmente calcopirita), liberando el cobre para su disolución y habilitando la recuperación de metales preciosos encapsulados, con potenciales recuperaciones >90-95 % en etapas posteriores, superando ampliamente los métodos convencionales (lixiviación atmosférica o flotación-fundición, limitados a <60 % en minerales refractarios).

El estudio confirma que la lixiviación a presión oxidativa representa una alternativa hidrometalúrgica eficiente, robusta y con menor impacto ambiental para el procesamiento de minerales sulfurados complejos, proporcionando bases técnicas para su escalamiento industrial y optimización económica.

Palabras clave: lixiviación oxidativa en autoclave, mineral de cobre refractario, calcopirita, presión final, recuperación de cobre, pretratamiento oxidativo, diseño factorial, hidrometalurgia.

Abstract

This research evaluated the oxidative pretreatment in autoclave of a refractory copper sulfide ore with 1.60 % Cu head grade, using a 2^{4-1} fractional factorial experimental design to assess the effects of oxygen pressure (20-30 PSI), final pressure (50-100 PSI), temperature (290-300 °C), and reaction time (30-50 min). Metallurgical balance results identified final pressure as the dominant negative factor: at 50 PSI, average copper recoveries reached 90.29 %, dropping to 45.94 % at 100 PSI (a difference >44 %). Reaction time exhibited a consistent positive effect (+3.55 %), oxygen pressure a moderate increase (+2.56 %), and temperature showed no significant influence in the studied range.

Optimal conditions were defined as 30 PSI oxygen pressure, 50 PSI final pressure, 290 °C, and 50 min, achieving a maximum copper recovery of 94.00 % (test No. 5). This oxidative pretreatment effectively destroys the refractory matrix (primarily chalcopyrite), enabling copper dissolution and facilitating precious metals recovery (>90-95 % potential in subsequent stages), significantly outperforming conventional methods (atmospheric leaching or flotation-smelting, limited to <60 % for refractory ores).

The study confirms that pressure oxidative leaching is an efficient, robust, and environmentally friendlier hydrometallurgical alternative for processing complex sulfide ores, providing a solid technical foundation for industrial scaling and economic optimization.

Keywords : oxidative leaching in an autoclave, refractory copper ore, chalcopyrite, final pressure, copper recovery, oxidative pretreatment, factorial design, hydrometallurgy

INTRODUCCION

La extracción de cobre a partir de minerales sulfurados refractarios, particularmente aquellos dominados por calcopirita (CuFeS_2), representa uno de los mayores desafíos en la metalurgia extractiva moderna. Estos minerales exhiben baja reactividad bajo condiciones atmosféricas convencionales debido a la formación de capas pasivantes de azufre elemental o jarosita, lo que limita las recuperaciones en procesos tradicionales como la lixiviación en pilas o la flotación seguida de fundición, alcanzando típicamente valores inferiores al 60 % en minerales de baja ley o complejos. Además, los procesos pirometalúrgicos enfrentan restricciones ambientales crecientes por emisiones de SO_2 y altos consumos energéticos, impulsando la búsqueda de alternativas hidrometalúrgicas más sostenibles y eficientes.

La lixiviación oxidativa a presión (Pressure Oxidation - POX) en autoclave se posiciona como una tecnología probada industrialmente para la oxidación completa de sulfuros refractarios, convirtiendo el azufre en sulfato y liberando metales valiosos (cobre, oro y plata) en solución. Este proceso opera a temperaturas elevadas (generalmente $>200\text{ }^\circ\text{C}$) y presiones de oxígeno parciales controladas, permitiendo recuperaciones superiores al 90-95 % en concentrados de calcopirita, como se reporta en aplicaciones comerciales y estudios científicos (McDonald et al., 2007; procesos CESL, Phelps Dodge-Placer Dome).

El estudio evalúa experimentalmente el pretratamiento oxidativo en autoclave de un mineral refractario sulfurado de Cobre con ley de 1,60 % Cu, mediante un diseño factorial que analiza variables críticas: presión de O_2 , presión final, temperatura y tiempo de reacción. El objetivo principal es optimizar la recuperación de cobre, comparar la eficiencia frente a métodos convencionales y evaluar los parámetros cinéticos del proceso, contribuyendo con alternativas hidrometalúrgicas para minerales refractarios de baja ley y alta complejidad mineralógica.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción De La Realidad Problemática

La mayor parte de las reservas de cobre remanentes en el país y en el mundo se encuentran en forma de minerales sulfurados, como la calcopirita (CuFeS_2), la bornita (Cu_5FeS_4) y la enargita (Cu_3AsS_4). Estos minerales son refractarios a los procesos de lixiviación convencionales, como la lixiviación en pilas, que son económicamente viables y ambientalmente preferibles a la pirometalurgia (fundición).

La refractariedad de estos sulfuros se debe a su estructura cristalina estable, que impide que los agentes lixiviantes, como el ácido sulfúrico, accedan y disuelvan eficazmente el cobre. Esto se traduce directamente en:

Bajas Tasas de Recuperación: Los métodos hidrometalúrgicos tradicionales apenas logran recuperar entre el 30% y el 50% del cobre contenido en estos minerales. Esto significa que una cantidad significativa del metal valioso se queda sin extraer y es desechada en los relaves.

Cinéticas de Lixiviación Lentas: El proceso de disolución del cobre es extremadamente lento, pudiendo tardar meses o incluso años, lo que hace que la operación sea económicamente inviable a gran escala.

Ineficiencia Económica: La baja recuperación impacta negativamente la rentabilidad de los proyectos mineros. Se invierten grandes cantidades de recursos en mover y procesar toneladas de mineral para obtener solo una fracción del metal contenido, elevando los costos operativos y disminuyendo los márgenes de ganancia.

Para superar estos desafíos, la industria ha investigado diversas tecnologías de pretratamiento diseñadas para "descomponer" la matriz del mineral sulfurado y liberar el cobre para su posterior lixiviación. Una de las alternativas más prometedoras es el pretratamiento en autoclave. Este proceso utiliza altas presiones y temperaturas en un reactor cerrado para oxidar los sulfuros de manera rápida y controlada, transformando las especies refractarias en compuestos que son fácilmente lixiviables.

A pesar de que esta tecnología ha demostrado ser eficaz en la metalurgia del oro y otros metales, su aplicación específica a la diversidad de minerales sulfurados de cobre presentes en la geología peruana no ha sido suficientemente estudiada. Existe una brecha de conocimiento sobre las condiciones óptimas de operación (presión, temperatura, tiempo de residencia, adición de reactivos) para los diferentes tipos de mineral de cobre, así como sobre su viabilidad técnica y económica a escala industrial en el contexto local.

Por lo tanto, investigar y optimizar el pretratamiento en autoclave es fundamental para desarrollar un método que permita mejorar significativamente la recuperación de cobre, haciendo viables económicamente proyectos mineros actualmente marginales y reduciendo el impacto ambiental de la producción. La falta de un proceso eficiente para estos minerales representa el principal cuello de botella que limita el pleno aprovechamiento del potencial cuprífero del país.

1.2. Formulación del Problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo mejorar la recuperación de Minerales Sulfurados de Cobre mediante Autoclave para mejorar La Recuperación en el Centro de Investigación de Metalurgia y Materiales – Huacho 2025?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿En qué condiciones el pretratamiento de minerales refractarios de cobre , el tiempo ,presión y temperatura sucede la oxidación ?
- ¿En qué medida el pre tratamiento de minerales refractarios de cobre mediante autoclave mejora la recuperación de metales preciosos en comparación con los métodos tradicionales?
- ¿Cómo influye los parámetros y variables en el proceso de lixiviación para la recuperación de cobre del mineral pretratado?

1.3. Objetivos de la Investigación

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un proceso de pre tratamiento de Minerales Sulfurados de Cobre mediante Autoclave para mejorar la Recuperación en el Centro de Investigación de Metalurgia y Materiales – Huacho 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- Definir las condiciones para el pretratamiento de minerales refractarios de cobre , el tiempo ,presión y temperatura de oxidación.
- Determinar la eficiencia del pretratamiento de minerales refractarios de cobre mediante autoclave en la recuperación de metales preciosos en comparación con los métodos convencionales.
- Evaluar los parámetros y variables en el proceso de lixiviación para la recuperación de cobre del mineral pretratado .

1.4. Justificación de la Investigación

El Perú, como uno de los principales productores de metales preciosos a nivel mundial, enfrenta desafíos significativos relacionados con la gestión de relaves mineros, que contienen metales no recuperados y productos químicos que pueden generar impactos ambientales severos. Al desarrollar un proceso de pre tratamiento en autoclave para mejorar la recuperación de estos metales, la investigación no solo busca maximizar el aprovechamiento de los recursos, sino también promover prácticas más sostenibles en la industria minera. Esto se alinea con los principios de la economía circular, que buscan reducir residuos y fomentar la reutilización de materiales, lo cual es crucial para el desarrollo sostenible del país. ambiental, la promoción de la economía circular, el avance tecnológico y desarrollo social en el país.

1.4.1. Innovación Tecnológica en el Sector Minero:

El tratamiento en autoclave representa una tecnología avanzada que tiene el potencial de transformar la manera en que se manejan los relaves refractarios. Sin embargo, su aplicación en el Perú es aún limitada. Esta investigación aportará conocimientos sobre las mejores prácticas y las condiciones óptimas para su implementación, lo cual puede abrir nuevas oportunidades para la innovación tecnológica en el sector minero peruano.

1.4.2. Reducción de Pasivos Ambientales y Mejora del Entorno Social

Los relaves mineros representan un pasivo ambiental significativo para el Perú. Al proponer un método para recuperar metales preciosos de relaves refractarios, se pueden reducir estos pasivos y, a la vez, generar beneficios económicos y sociales para las comunidades mineras. Esto es especialmente relevante en un país donde las comunidades locales a menudo sufren las consecuencias negativas de las actividades mineras.

1.4.3. Relevancia Económica

La recuperación eficiente de metales preciosos de relaves refractarios puede generar ingresos adicionales para el sector minero, mejorando la rentabilidad de las operaciones mineras. Esto es crucial en un contexto económico donde el aprovechamiento de todos los recursos disponibles se vuelve cada vez más necesario para mantener la competitividad en el mercado global.

1.5. Delimitaciones del estudio

1.5.1. Ámbito Geográfico

El estudio se centrará en relaves mineros ubicados en el Perú, particularmente en regiones con alta actividad minera, como Arequipa, Cajamarca, o La Libertad. Se seleccionarán relaves refractarios específicos que representen los desafíos típicos en la recuperación de metales preciosos en el país.

1.5.2. Ámbito Temporal

La investigación cubrirá un período de análisis y desarrollo de tecnologías a lo largo de un plazo de 1 a 2 años. Esto incluirá fases de recolección de datos, experimentación con el proceso de autoclave, y evaluación de resultados.

1.5.3. Ámbito Temático

El enfoque principal estará en el pretratamiento de relaves refractarios mediante autoclave para la recuperación de metales preciosos como oro y plata. El estudio se delimita a la comparación entre este método y técnicas convencionales, sin abordar otros tipos de relaves o procesos metalúrgicos que no sean refractarios.

1.5.4.Ámbito Tecnológico

La investigación se centrará en la tecnología de autoclave, específicamente en sus aplicaciones para la oxidación de minerales refractarios. No se explorarán en profundidad otras tecnologías de pretratamiento.

1.5.5. Ámbito de Impacto

Se evaluará principalmente el impacto en la recuperación de metales preciosos, la reducción de pasivos ambientales y los beneficios potenciales para la economía circular en el sector minero peruano. No se considerarán otros sectores industriales.

1.6. Viabilidad del estudio

1.6.1 Disponibilidad de recursos:

La viabilidad técnica del estudio está respaldada por la disponibilidad de equipos laboratorios especializados en tratamiento de minerales en instituciones académicas y centros de investigación en el Perú. Además, existen empresas mineras que podrían estar interesadas en colaborar proporcionando acceso a relaves refractarios.

1.6.2. Acceso a Datos y Muestras:

Se cuenta con acceso a relaves refractarios y datos relevantes gracias a la colaboración con empresas mineras locales y centros de investigación. Esto permite realizar experimentos de laboratorio y obtener resultados representativos.

1.6.3 Capacidad Técnica y Experiencia:

El equipo de investigación posee la experiencia técnica necesaria en el manejo de tecnologías de tratamiento de minerales y el uso de autoclaves. Esto garantiza que los

experimentos y análisis se realicen de manera eficiente y precisa.

1.6.4. Apoyo Financiero:

Se espera que el proyecto cuente con financiamiento de instituciones académicas, gubernamentales o incluso del sector privado, dado el potencial impacto económico y ambiental de la investigación. También se considerarán fuentes de financiamiento nacionales e internacionales enfocadas en proyectos de sostenibilidad y minería.

1.6.5 Factibilidad en la Implementación:

El uso de tecnologías de autoclave es factible dentro del contexto minero peruano, aunque su implementación a gran escala dependerá de los resultados obtenidos y de la disposición de la industria para adoptar nuevas tecnologías. El estudio está diseñado para proporcionar datos que puedan facilitar esta transición.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1. Investigaciones internacionales

Quezada Reyes, V. A. (2021). Pretratamiento de lixiviación a minerales sulfurados de cobre en medios oxidantes (Tesis de maestría, Universitat de Barcelona). La producción de cobre en Chile se desarrolla mediante procesos hidrometalúrgicos y de concentración; los concentrados de cobre se tratan tradicionalmente mediante la vía pirometalúrgica. Según Cochilco, el cobre producido en 2019 mediante procesos hidrometalúrgicos representó el 27,3% de la producción total de cobre de Chile. Sin embargo, se estima que esta contribución disminuirá al 11,6% para 2029, debido al agotamiento de los óxidos de cobre y la aparición de sulfuros de cobre, principalmente calcopirita, ya que este mineral es refractario a las condiciones de lixiviación convencionales.

Una forma de potenciar la eficiencia en el proceso de lixiviación consiste en aplicar un pretratamiento antes de llevar a cabo la extracción propiamente dicha, donde el tiempo de curado juega un papel clave. Esta variable logra acelerar la cinética de disolución del cobre, sobre todo en minerales de tipo sulfurado, aunque los trabajos científicos dedicados a este aspecto todavía son escasos.

Gran parte de las investigaciones existentes se centran en analizar cómo influye el pretratamiento en la recuperación durante la lixiviación, sin profundizar en lo que ocurre específicamente durante la etapa previa de curado. Asimismo, aún no se han dilucidado con precisión las reacciones químicas que controlan este comportamiento. En

consecuencia, el propósito principal de la presente tesis radica en estudiar el impacto del curado en medio ácido sobre la extracción de cobre presente en minerales sulfurados, tanto en ambientes oxidantes como en presencia de iones cloruro.

Para ello, se emplearon muestras puras de calcopirita y calcocita, junto con un mineral proveniente de una operación minera real. Las pruebas experimentales permitieron examinar la influencia del tiempo de curado y las concentraciones de KNO_3 , NaCl y H_2SO_4 .

En el caso de la calcopirita, se recurrió al análisis de varianza (ANOVA) para evaluar los resultados obtenidos. Los aglomerados resultantes del pretratamiento fueron caracterizados mediante diversas técnicas analíticas, entre ellas difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía óptica en reflexión. Adicionalmente, se investigó cómo el pretratamiento afectaba la eficiencia de la lixiviación a distintas temperaturas, y se analizaron los residuos generados en este paso.

Bajo condiciones específicas —15 kg/t de H_2SO_4 , 25 kg/t de NaCl y 15 días de curado—, en las muestras de calcopirita y del mineral de mina se detectaron productos como CuSO_4 , $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})$ y azufre elemental (S^0). Por su parte, en la calcocita, con 30 kg/t de H_2SO_4 , 40 kg/t de NaCl y 7 días de curado, los compuestos identificados incluyeron $\text{Cu}_{1.75}\text{S}$, $\text{Cu}(\text{OH})\text{Cl}$, Na_2SO_4 y CuSO_4 .

En términos generales, el pretratamiento aplicado a minerales sulfurados de cobre logró incrementar la recuperación en lixiviación entre un 4% y un 6%. De esta manera, se alcanzó una disolución de cobre cercana al 94% en calcopirita a 90 °C, lo que refuerza el potencial de la hidrometalurgia como opción viable y alternativa para el procesamiento de este tipo de minerales sulfurados.

Jiayun Chen et al. (2022) ,”Lixiviación a presión de relaves de flotación de escoria de cobre en medios de ácido sulfúrico oxigenado”. En este estudio, se investigó un método hidrometalúrgico para la recuperación de cobre, cobalto y zinc de relaves de flotación de escoria de cobre (SFT). SFT contiene grandes cantidades de compuestos metálicos valiosos, como cobre, cobalto y zinc. Se utilizó una muestra representativa de SFT que contenía 0,50% Cu, 0,148% Co, 3,93% Zn y 39,50% Fe en estudios experimentales. Se llevó a cabo una lixiviación ácida oxidativa a alta presión de SFT para evaluar los efectos de la concentración de ácido sulfúrico, la presión parcial de oxígeno, el tiempo de reacción, la relación sólido/líquido y la temperatura en la extracción de cobre, cobalto, zinc y hierro. La disolución de metales de la muestra de SFT aumentó con la temperatura y la concentración de ácido sulfúrico. Sin embargo, las altas concentraciones de ácido y las altas relaciones sólido/líquido (S / L) llevaron a la formación de gel que causó problemas de filtración e inhibió la disolución del metal. Las condiciones óptimas de lixiviación resultaron ser un tiempo de lixiviación de 90 min, una concentración de ácido de 250 kg/t, una temperatura de 220 °C, una relación S / L de 1:5 y una presión parcial de oxígeno de 0,7 MPa. Bajo estas condiciones, se extrajeron $93,1 \pm 1,1$ % de Cu, $96,3 \pm 1,8$ % de Co y $92,3 \pm 1,7$ % de Zn. La disolución de hierro fue de solo $0,5 \pm 0,1$ %. Este proceso hidrometalúrgico recupera casi por completo metales valiosos. En particular, el cobalto, que es de gran importancia en la producción de baterías de iones de litio, ha sido declarado metal crítico por Estados Unidos, Canadá y la UE y se disolvió con una eficiencia de extracción muy alta (>95 %). Además, la presión parcial de oxígeno mejoró la disolución de cobre, cobalto y zinc. Cuando no se introdujo O_2 en el sistema de

lixiviación, las eficiencias de extracción de Co, Cu y Zn fueron aproximadamente 24,5, 5,3 y 26,3%, respectivamente, después de 2 h de tratamiento de lixiviación.

Universidad de Sonora, México. En un proyecto presentado en un congreso internacional, Valenzuela García et al. realizaron un pretratamiento ácido oxidativo de minerales sulfurados de hierro y cobre en un reactor autoclave, seguido de lixiviación con cianuro, logrando mejoras considerables en la recuperación de oro (y de los metales presentes) en minerales refractarios. El oro y la plata frecuentemente se presentan en minerales de bajo tenor, donde estos metales preciosos se encuentran encapsulados o asociados íntimamente con sulfuros de hierro y cobre. Esta asociación genera refractariedad en el mineral, lo que resulta en bajas recuperaciones y un elevado consumo de reactivos durante el proceso convencional de lixiviación con cianuro.

Con el propósito de mejorar la extracción de estos metales valiosos, se ha investigado la aplicación de un tratamiento oxidativo previo sobre menas refractarias, con el fin de liberar el oro atrapado. Para este estudio se emplearon muestras de concentrado mineral provenientes de la Mina Mulatos, situada en el municipio de Sahuaripa, estado de Sonora, México.

El proceso de oxidación se realizó en un reactor autoclave Parr fabricado en titanio, con capacidad de 1 litro. Se implementó un pretratamiento oxidativo en medio ácido, seguido de una etapa de neutralización y posterior lixiviación cianurada. El concentrado mineral utilizado presentaba una ley de 97 g/t de Au, 0.25 % de Cu y 15 % de Fe. Los resultados de difracción de rayos X (DRX) confirmaron la presencia predominante de sílice y pirita como fases principales.

En las pruebas iniciales de lixiviación directa (sin pretratamiento), la extracción de oro alcanzó solo el 24 %. Posteriormente, se aplicó un pretratamiento oxidativo en solución de 0.5 M de H_2SO_4 con $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, bajo condiciones de temperatura de 50 °C y presión parcial de oxígeno (PO_2) de 0.35 MPa. Una vez completada esta etapa, se procedió a la neutralización con cal y a la lixiviación cianurada empleando 0.5 % de NaCN, a 50 °C y PO_2 de 0.62 MPa. Con este esquema combinado se logró una recuperación de oro superior al 92 %.

Derek Dreisinger (2006),“ Lixiviación a presión de calcopirita sulfurada en un medio de ácido sulfúrico-oxígeno”.La recuperación de cobre de concentrados de calcopirita mediante lixiviación es difícil debido a la lenta cinética de disolución de este mineral en la mayoría de los medios de lixiviación. Sin embargo, la recuperación de cobre de calcopirita sulfurada (una mezcla de CuS y FeS_2) mediante lixiviación es más rápida y podría ser selectiva según el medio de lixiviación.

En este artículo, se presenta el resultado de una investigación sobre la lixiviación a presión de $\text{H}_2\text{SO}_4 - \text{O}_2$ de calcopirita sulfurada. Las variables consideradas en el estudio fueron la velocidad de agitación, la concentración de ácido sulfúrico, la temperatura y la presión parcial de oxígeno. Los datos experimentales indicaron que la velocidad de agitación superior a 500 rpm y la concentración de ácido sulfúrico superior a 0,1 M tuvieron muy poco efecto en la tasa de lixiviación. Un aumento de la temperatura de 90 a 108 °C aumentó la disolución de cobre y hierro; sin embargo, un aumento adicional a 120 °C afectó negativamente la disolución de cobre. Se encontró que la presión parcial de oxígeno era la variable principal que controla la selectividad de cobre/hierro de la lixiviación. Un aumento en la presión parcial de oxígeno aumentó significativamente la

tasa de disolución de cobre, pero deterioró la selectividad cobre/hierro. El análisis de azufre elemental de los residuos sólidos de lixiviación indicó que la mayor parte del azufre de sulfuro de cobre en el concentrado sulfurado se oxidó a azufre elemental.

H. Watling (2013), “Pretratamiento hidrotermal de concentrado de calcopirita con solución de sulfato de cobre”. Las tecnologías existentes para el beneficio de minerales de pórfido de cobre, ubicados en depósitos en los Urales de Rusia, permiten la producción de concentrados de calcopirita con un contenido de cobre de 19 a 30%. La tecnología posterior para el procesamiento de concentrados incluye fundición autógena, desulfuración de mata y operaciones de refinación de cobre blíster. El trabajo actual presenta un nuevo enfoque hidrometalúrgico para el enriquecimiento de concentrados de cobre hasta un grado más alto de 50–55% Cu, que podría aumentar significativamente la capacidad de producción y la eficiencia de la fundición y con un proceso que simultáneamente evita la operación de desulfuración de mata. El método sugerido consiste en lixiviación oxidativa a presión seguida de pretratamiento hidrotérmico de concentrados de calcopirita con soluciones de sulfato de cobre. La lixiviación oxidativa a presión de los concentrados de calcopirita permite extracciones de Cu de hasta 99% y produce una solución rica en Cu para la etapa de pretratamiento hidrotérmico. La optimización de la etapa de pretratamiento hidrotermal se llevó a cabo dentro de los siguientes límites: $T = 150\text{--}230\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Cu CuSO}_4 / \text{Cu CuFeS}_2 = 1,2\text{--}3,3$, $\text{H}_2\text{SO}_4 = 20\text{--}120\text{ g/L}$. Los parámetros recomendados se establecieron como $T = 230\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\text{Cu CuSO}_4 / \text{Cu CuFeS}_2 = 1,8\text{--}1,9$, $\text{H}_2\text{SO}_4 = 20\text{--}40\text{ g/L}$, $t = 60\text{--}100\text{ min}$ ya que esto permite obtener concentrado con contenido de Cu de 51–52% y concentraciones residuales de Cu tan bajas como 0,08–0,13 g/L en la solución final. Se obtuvo un modelo paramétrico de la etapa de

pretratamiento hidrotermal. Las soluciones y los residuos después del pretratamiento hidrotermal del material se analizaron para determinar su composición química y de fases. También se sugirió un diagrama de flujo tecnológico, así como estrategias para el procesamiento de subproductos.

2.1.2. Investigaciones nacionales

Mamani Coaquira, K. (2018). Lixiviación de concentrados de cobre en autoclave (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Repositorio UNJBG. El presente trabajo inicia con la fabricación y puesta en marcha de una autoclave con capacidad de 4 litros, diseñada específicamente para evaluar las variables operativas involucradas en la lixiviación presurizada de concentrados sulfurados de cobre. El objetivo principal consiste en generar una solución rica en sulfato de cobre de elevada concentración, apta para su posterior utilización en procesos de electrodeposición destinados a la obtención de cátodos de cobre de alta pureza.

La elección de investigar este tipo de lixiviación en autoclave responde a la relevancia estratégica del cobre en el contexto peruano. Actualmente, Perú se posiciona como uno de los principales productores mundiales de cobre (consolidándose en el segundo o tercer lugar según las cifras más recientes de 2025, con una producción récord cercana a 2.77 millones de toneladas métricas finas), solo por detrás de Chile en varios rankings, y mantiene una de las mayores reservas probadas del planeta (alrededor de 100 millones de toneladas métricas, empatando con Australia en el segundo puesto global). Junto con Chile y otros países líderes como Estados Unidos o Australia, estos tres concentran una proporción significativa —cercana al 40-50 % según diversas estimaciones— de las reservas mundiales de cobre.

En el Perú, tanto las empresas transnacionales como las operaciones locales se distinguen por la adopción de tecnologías de punta en sus procesos extractivos. Sin embargo, se anticipa que, en el mediano plazo, los recursos oxidado se agotarán progresivamente, lo que obligará a recurrir cada vez más a los concentrados sulfurados como materia prima principal para abastecer de soluciones de sulfato de cobre a las plantas hidrometalúrgicas ya existentes. En este escenario, la lixiviación presurizada en autoclave emerge como una tecnología prometedora, aunque todavía en etapas iniciales de desarrollo y optimización industrial, capaz de responder a los desafíos futuros de la industria cuprífera nacional y contribuir a mantener la competitividad en el mercado global.

Héctor Orcón Arauco (2014), "Recuperación de cobre a partir de las colas de lixiviación de oro en la empresa minera EXCELMORO S.A.", En el presente estudio se describen las propiedades de flotación de la calcopirita y la pirita, minerales que representan el principal valor económico y la ganga sulfurosa más relevante en yacimientos de cobre tipo pórfido. Se examina la flotabilidad considerando las características anisotrópicas de las superficies minerales, así como la influencia de factores clave como el pH de la pulpa, el tamaño de partícula, los iones calcio derivados de la cal utilizada para el control alcalino del pH, y el rol de colectores no polares en la recuperación de molibdenita.

Se pone especial énfasis en los mecanismos mediante los cuales colectores sulfhídricos —tales como xantatos y tionocarbamatos— logran hidrofobizar las superficies de calcopirita y pirita. Además, se analiza cómo el pH, la presencia de oxígeno disuelto y el estado de oxidación superficial afectan la adsorción de estos reactivos.

Asimismo, se detallan los procesos de adsorción del depresor orgánico dextrina sobre calcopirita y pirita, con el propósito de explorar su potencial como alternativa para realizar la flotación de minerales de cobre en rangos de pH inferiores a los valores convencionales de 9.5-11. Este enfoque busca reducir el consumo de cal y minimizar problemas asociados a pH elevados.

A partir del entendimiento detallado de los mecanismos de interacción tanto de los colectores como del depresor dextrina, se propuso y validó un nuevo esquema reactivo de flotación. Este esquema se aplicó exitosamente a un mineral de cobre caracterizado por un elevado contenido de biotita. Los resultados obtenidos en recuperación de cobre y en la calidad del concentrado resultante fueron comparables a los alcanzados con el procedimiento tradicional, que opera a pH alto empleando colectores del tipo tionocarbamato. No obstante, el esquema propuesto ofrece una ventaja significativa al incrementar la recuperación de molibdeno en aproximadamente un 10 %.

Finalmente, se describe la metodología empleada para evaluar el desempeño de celdas de flotación, orientada a optimizar la curva grado-recuperación de los valores en los concentrados producidos, contribuyendo así a una mayor eficiencia en el proceso global de concentración.

Almonacid Gómez, R. (2013) “Recuperación hidrometalúrgica de cobre y molibdeno de las menas de la unidad minera de Toromocho”.

El objetivo principal de esta investigación radica en evaluar la viabilidad técnica de procesar metalúrgicamente el material en estudio, con miras a generar beneficios económicos mediante la implementación de una propuesta técnica específica.

De acuerdo con las exploraciones geológicas y el plan minero actualizados, el depósito Toromocho alberga reservas probadas y probables del orden de 1 520 a 1 530 millones de toneladas de mineral, con leyes promedio de 0,48 % de cobre, 0,019 % de molibdeno y aproximadamente 6,9 g/t de plata, considerando una ley de corte cercana al 0,37 % de Cu.

Para los fines de esta propuesta, se utilizó como materia prima un concentrado de molibdenita de baja ley, con un contenido aproximado de 30 % de Mo y 0,6 % de Cu.

En el presente trabajo se investigó el proceso de lixiviación de este concentrado de molibdenita de baja calidad mediante hipoclorito generado in situ, a través de un enfoque modificado. La electro-oxidación de la pulpa se llevó a cabo en presencia de cloruro de calcio, lo que favorece la precipitación cuantitativa de sulfato de calcio y molibdato de calcio conforme avanza la disolución. De esta forma, la composición de la salmuera permanece estable durante toda la etapa de electro-oxidación.

La solución salina no abandona el circuito electrolítico, sino que se recircula directamente sin requerir purificación adicional. Tras la filtración, los sólidos resultantes —compuestos por molibdato de calcio, sulfato de calcio y ganga no reaccionada— se someten a una lixiviación con la solución reciclada rica en molibdeno, realizada a temperatura ambiente. Este paso permite elevar la concentración de molibdeno en solución, mientras que el sulfato de calcio y la ganga insoluble permanecen en el residuo sólido.

Este esquema integrado busca optimizar la recuperación de molibdeno de concentrados impuros, minimizando el consumo de reactivos externos y manteniendo la eficiencia del proceso en circuito cerrado, lo que representa una alternativa prometedora

para el tratamiento hidrometalúrgico de subproductos de la minería de cobre en depósitos polimetálicos como Toromocho.

Neyra Gilvonio, B. P. (2018). “Oxidación a presión en autoclave de un concentrado refractario de pirita - Arsenopirita en Unidad Minera Antapite, Huancavelica”

El propósito central de esta investigación consistió en evaluar la influencia de la temperatura, la presión parcial de oxígeno y la densidad de pulpa en el proceso de oxidación a presión de concentrados que contienen pirita y arsenopirita con oro refractario.

Para ello, se llevaron a cabo ensayos de oxidación por lotes en autoclave, aplicando un diseño factorial que permitió analizar sistemáticamente el impacto de estas variables. Se midieron y examinaron diversas respuestas experimentales con el fin de caracterizar tanto los efectos individuales de los factores como la cinética global del proceso de oxidación.

En términos generales, se observó que las densidades de pulpa más elevadas demandan condiciones más severas —mayores temperaturas y presiones parciales de oxígeno— para alcanzar una oxidación completa de los sulfuros. La cinética de oxidación más rápida se registró bajo condiciones de 225 °C de temperatura, 1050 kPa de presión parcial de oxígeno y 15 % de densidad de pulpa, logrando la conversión total de sulfuros en tan solo 30 minutos.

Por contraste, a 195 °C, con 700 kPa de presión parcial de oxígeno y una densidad de pulpa del 10 %, el tiempo requerido para completar la oxidación de los sulfuros se extendió hasta aproximadamente 60 minutos.

Asimismo, se determinó que densidades de pulpa superiores al 10 % ejercen un efecto negativo pronunciado sobre la velocidad de oxidación cuando la temperatura se mantiene por debajo de 225 °C y la presión parcial de oxígeno es inferior a 1050 kPa.

Estos hallazgos subrayan la importancia de optimizar conjuntamente las condiciones operativas para maximizar la eficiencia del pretratamiento oxidativo en autoclave, facilitando así una mayor liberación y recuperación posterior del oro en minerales refractarios.

Universidad Nacional Mayor de San Marcos (s. f.) ,”Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración”. En el marco de esta investigación se llevaron a cabo ensayos de biolixiviación sobre minerales sulfurados refractarios de cobre, empleando cepas bacterianas autóctonas aisladas de drenajes ácidos de mina (DAM). El estudio se estructuró en tres fases secuenciales de adaptación y escalado progresivo.

En la etapa inicial de adaptación, se operó a una densidad de pulpa del 1 % (p/v), alcanzándose recuperaciones óptimas de cobre del 68 % y 25,6 % para los minerales S y K, respectivamente, al adicionar 6 g/L y 9 g/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, durante un período de 24 días.

En la segunda fase, con una densidad de pulpa incrementada al 2 % (p/v) y utilizando inóculo adaptado de la etapa previa, se obtuvo la máxima recuperación de cobre en ausencia de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Bajo estas condiciones, se lograron extracciones del 85 % para el mineral S y del 26 % para el mineral K. Paralelamente, se registró un aumento en la densidad poblacional bacteriana del 13 % y 110 % para los minerales S y K, respectivamente, en el sistema sin adición de hierro ferroso.

La tercera etapa se realizó a una densidad de pulpa del 6 % (p/v), inoculando con el consorcio adaptado de la fase anterior. En ausencia de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, se alcanzó una recuperación máxima de cobre del 89 % para el mineral S, acompañada de un incremento

del 42 % en la densidad biológica con respecto al inóculo inicial. Para el mineral K, la recuperación máxima fue del 33 %, con un aumento del 17 % en la población bacteriana en comparación con la etapa previa, también sin aporte externo de hierro ferroso.

A modo de comparación, en pruebas de lixiviación química control (sin bacterias) a 2 % (p/v) de densidad de pulpa y durante 24 días, las recuperaciones de cobre fueron extremadamente bajas: solo 4 % para el mineral S y 1,4 % para el mineral K. En contraste, bajo idénticas condiciones de tiempo y densidad de pulpa, pero mediante biolixiviación con las cepas adaptadas, se obtuvieron extracciones significativamente superiores: 85 % para el mineral S y 27,31 % para el mineral K.

Estos resultados destacan el potencial de las bacterias aisladas de drenajes ácidos mineros para mejorar de manera sustancial la disolución de cobre en minerales sulfurados refractarios, permitiendo un escalado progresivo de densidad de pulpa y una notable reducción en la dependencia de fuentes externas de hierro ferroso, lo que favorece la viabilidad económica y la sostenibilidad del proceso biolixiviación en contextos mineros.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Minerales sulfurados de cobre

Los minerales sulfurados de cobre constituyen la principal Fuente de producción de este metal en el mundo. Entre los más representativos se encuentran la calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4), covelina (CuS) y enargita (Cu_3AsS_4), los cuales presentan estructuras cristalinas compactas y estables que dificultan su disolución en medios acuosos. De acuerdo con Habashi (2017), la calcopirita es el sulfuro más abundante y más refractario, requiriendo condiciones de alta temperatura y presión para su oxidación

efectiva. En el contexto peruano, la mayor parte de los yacimientos del sur contienen minerales sulfurados complejos con presencia de hierro, arsénico y azufre, lo que limita la recuperación metalúrgica en procesos convencionales.

2.2.2. Hidrometalurgia del cobre

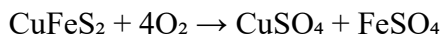
La hidrometalurgia es el conjunto de operaciones destinadas a la extracción de metales mediante disolución selectiva en soluciones acuosas, seguida de purificación y recuperación del metal. Según Marsden y House (2019), los procesos hidrometalúrgicos del cobre comprenden tres etapas fundamentales: lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención (SX-EW). La lixiviación de minerales sulfurados de cobre, especialmente de calcopirita, presenta baja cinética debido a la formación de una capa pasivante de azufre elemental o jarosita férrica sobre la superficie del mineral, lo que reduce el contacto con el agente lixivante. Por ello, se emplean pretratamientos oxidativos o autoclaves para modificar la estructura mineral y aumentar la reactividad química (Wang et al., 2020).

2.2.3. Fundamentos del pretratamiento de minerales sulfurados

El pretratamiento busca modificar la estructura mineralógica para permitir un mayor contacto entre el lixivante y las partículas del mineral. El proceso busca romper la pasivación superficial, oxidar el azufre y transformar los sulfuros metálicos en formas solubles (sulfatos). Existen diferentes métodos: pretratamientos térmicos, químicos, biológicos y oxidativos bajo presión. De ellos, el pretratamiento en autoclave es el más eficiente para concentrados sulfurados refractarios, ya que opera a altas temperaturas controladas de (150–200 °C) y presión de oxígeno (10–20 atm), acelerando las reacciones redox y mejorando la cinética de disolución (Nazari et al., 2021).

2.2.4. Principios de la oxidación en autoclave

El proceso de oxidación en autoclave se basa en la conversión del cobre sulfurado a sulfato cúprico soluble, mediante el uso de un oxidante (oxígeno gaseoso o ion férrico) en medio ácido. Las principales reacciones que describen el sistema son:



El ion Fe^{3+} actúa como mediador en el ciclo redox, oxidando el cobre sulfurado y regenerándose con oxígeno. La velocidad de oxidación se incrementa exponencialmente con la temperatura y la presión parcial de oxígeno (Habashi, 2017). El autoclave permite mantener el sistema cerrado, controlando temperatura, presión y acidez, lo que evita pérdidas de reactivos y maximiza la conversión. Este tipo de reactor es ampliamente utilizado en la oxidación de minerales de oro refractario, y su aplicación a concentrados de cobre constituye una extensión tecnológica en fase de optimización (Nazari et al., 2021).

2.2.4.1. Oxidación de la Arsenopirita (FeAsS) a Escorodita

La arsenopirita se oxida para formar escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), un arseniato férrico de muy baja solubilidad, lo que constituye un mecanismo eficaz para la estabilización e inmovilización del arsénico.

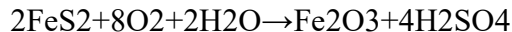


2.2.4.2. Oxidación de la Pirita (FeS_2) a Hematita

La pirita se oxida completamente, resultando en la formación de hematita (Fe_2O_3), un óxido de hierro estable, y ácido sulfúrico.

Esta reacción global representa la hidrólisis y precipitación del hierro en las

condiciones operativas de la autoclave.



La ruta de la pirita a hematita es particularmente crucial, ya que produce un residuo sólido estable y evita la formación de sulfatos férricos básicos problemáticos que pueden pasivar la reacción (Fleming, 2010). Estas ecuaciones estequiométricas, fundamentadas en la termodinámica y reportadas en la literatura, son la base directa para el balance de masa teórico realizado en esta investigación y justifican la búsqueda de condiciones operativas que favorezcan estas rutas de reacción.

2.2.5 Variables operativas del proceso en autoclave

Las variables que determinan la eficiencia del pretratamiento son:

- Temperatura: controla la cinética de oxidación y la solubilidad de los productos; el rango óptimo está entre 170 y 190 °C.
- Presión de oxígeno: afecta directamente la regeneración del ion férrico y la velocidad de reacción.
- Tiempo de residencia: influye en la conversión total del mineral y la formación de fases secundarias.
- Relación sólido/líquido (S/L): determina la disponibilidad de oxidante por unidad de masa de mineral.
- Concentración de ácido sulfúrico: mantiene la acidez necesaria para disolver los sulfatos formados.

La optimización de estas variables permite alcanzar recuperaciones superiores al 90 % de cobre soluble (Wang et al., 2020).

2.2.6. Aspectos termodinámicos y cinéticos

El estudio termodinámico se realiza mediante diagramas de Pourbaix (E-pH), que muestran la estabilidad de las especies de cobre, hierro y azufre en función del potencial y pH. Estos diagramas permiten predecir las condiciones en las que el cobre pasa de Cu^+ a Cu^{2+} y se mantiene en solución (Habashi, 2017). La cinética de disolución está influenciada por la difusión de reactivos hacia la superficie del mineral y la formación de películas pasivantes. En el autoclave, la alta agitación y la presión de oxígeno reducen las limitaciones difusivas, logrando una disolución más rápida y completa.

2.2.6.1. Formación y Control de Fases Sólidas: Hematita, Escorodita y Jarositas

El destino final de los elementos liberados (Fe, As, S) determina la eficiencia y sostenibilidad del proceso. Bajo condiciones de alta temperatura ($>200^\circ\text{C}$) y acidez controlada ($\text{pH} < 2$), el hierro precipita preferentemente como hematita (Fe_2O_3), un óxido estable y no reactivo. Paralelamente, el arsénico se estabiliza en la estructura cristalina de la escorodita, un arseniato férrico de muy baja solubilidad (Fleming, 2010). Sin embargo, si la acidez disminuye o la temperatura es insuficiente, pueden formarse fases intermedias como jarosita $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ o sulfatos férricos básicos. Estas fases son problemáticas porque pueden formar capas pasivantes sobre los sulfuros sin reaccionar ore-inmovilizar el oro liberado.

2.2.7. Recuperación del cobre

Tras el pretratamiento, el material oxidado se somete a lixiviación ácida

convencional, seguida de extracción por solventes y electro-obtención. La etapa de autoclave mejora significativamente la recuperación global del proceso, al generar un material más reactivo y libre de fases refractarias (Marsden & House, 2019). Los estudios de Valdivia (s. f.) y Mamani (2018) en el contexto peruano demuestran que la incorporación de una etapa de oxidación a presión previa a la lixiviación aumenta la recuperación de cobre disuelto en un 15 %-25 %, dependiendo del tipo de mineral y las condiciones experimentales.

2.2.8. Sustentabilidad y beneficios tecnológicos

El empleo de autoclaves representa una alternativa más limpia en comparación con la tostación o fundición, ya que evita emisiones de gases de azufre y permite la recuperación controlada de los subproductos. Además, posibilita el tratamiento de minerales con alto contenido de arsénico, inmovilizándolo como ferriarsenato estable. Esto se alinea con las políticas de innovación tecnológica y sostenibilidad en la metalurgia peruana (Fernández, 2023).

2.2.9. Oxidación a Presión

La oxidación a presión es, en cierto sentido, una tostación en una solución acuosa en recipientes cerrados, en la que se forman azufre y sulfatos en lugar de gas de dióxido de azufre. (Thomas & Pearson, 2016) La oxidación a presión se ha establecido como la opción más eficaz para la oxidación de minerales refractarios, ofreciendo múltiples ventajas en comparación con el proceso de tostación. Este método permite procesar tanto menas como concentrados sin provocar contaminación ambiental por emisiones de gases como el SO₂ y el arsénico.

Este proceso se realiza a temperaturas que oscilan entre 170 y 225 °C, utilizando

presiones totales de 1,100 a 3,200 kPa y una presión parcial de oxígeno que varía entre 350 y 700 kPa. Estas condiciones permiten lograr una oxidación completa de los sulfuros, facilitando así la liberación del oro y la plata. (Francisco Martínez Rodríguez, 2019)

2.2.10. Autoclave en Minería

La autoclave se define como un equipo utilizado para la oxidación a alta presión de menas refractarias. Este proceso es esencial para liberar metales preciosos que están atrapados en estructuras complejas. La autoclave permite llevar a cabo reacciones químicas a temperaturas y presiones elevadas, lo que resulta en una mayor eficiencia en la recuperación de metales como el oro y la plata.

El uso de la autoclave es particularmente relevante en el tratamiento de minerales que contienen sulfuros y telurios, donde las condiciones controladas de la autoclave facilitan la descomposición de estos compuestos y permiten la posterior extracción de los metales valiosos. Este método puede mejorar significativamente las tasas de recuperación, haciendo de la autoclave una herramienta fundamental en el procesamiento de minerales refractarios. (Francisco Martínez Rodríguez, 2019)

El oxígeno disuelto en soluciones puede oxidar minerales sulfurosos a bajo costo, siendo útil en la pre-aireación antes de la lixiviación por cianuración. Este proceso ayuda a oxidar o pasivar las superficies del mineral, evitando el uso innecesario de reactivos, aunque generalmente solo afecta la superficie del mineral.

Ventajas:

- Económico y ambientalmente compatible.
- Reduce el consumo de reactivos al oxidar o pasivar las superficies.

Desventajas:

- Solo oxida la superficie del mineral.
- Efectivo únicamente con minerales semi-refractarios.
- Limitaciones en la estabilidad de ciertos minerales en soluciones oxigenadas.
- La velocidad de oxidación depende de factores como la concentración de oxígeno disuelto, temperatura y agitación, siendo crucial aumentar la presión parcial de oxígeno para mejorar la eficacia del proceso. (Neyra Gilvonio & Quiñonez Nieto, 2018)

2.2.11. Oxidación de alta presión de minerales sulfurados de cobre

La oxidación de alta presión es un proceso hidrometalúrgico mediante el cual los minerales sulfurados de cobre (como calcopirita, bornita o enargita) se someten a condiciones controladas de alta temperatura y presión en presencia de un oxidante, típicamente oxígeno o aire, dentro de un reactor cerrado llamado autoclave.

Durante el proceso:

- Los sulfuros metálicos se transforman en sulfatos solubles y óxidos metálicos, aumentando la reactividad del mineral frente a la lixiviación ácida posterior.
- El ion férrico (Fe^{3+}) o el oxígeno actúa como agente oxidante, facilitando la conversión del cobre y del hierro presente en el mineral.
- Las condiciones de temperatura elevada (150–200 °C) y presión de oxígeno (10–20 atm) aceleran las reacciones químicas, superando las limitaciones cinéticas que presentan los minerales refractarios.

Objetivo principal:

Incrementar la disponibilidad de cobre soluble para etapas posteriores de extracción (lixiviación, extracción por solventes y electro obtención), mejorar la recuperación metalúrgica y permitir el tratamiento de minerales complejos que no son fácilmente procesables mediante métodos convencionales.

2.2.12. Análisis termodinámico

El análisis termodinámico permite predecir si una reacción química es favorable bajo ciertas condiciones de temperatura, presión y composición. En la oxidación de minerales sulfurados de cobre refractarios, el objetivo es determinar:

- La estabilidad de los sulfuros metálicos frente a la oxidación,
- Las especies que se forman (sulfatos, óxidos, iones metálicos),
- El potencial de oxidación necesario para romper la pasivación superficial del mineral.

Esto es fundamental para diseñar procesos en **autoclave** y optimizar la recuperación de cobre.

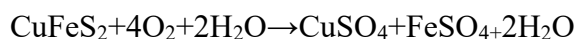
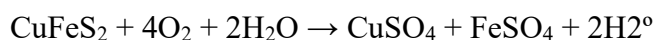
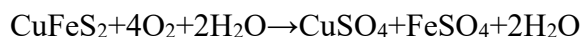
2.2.13. Minerales sulfurados refractarios

Los minerales como calcopirita (CuFeS_2), enargita (Cu_3AsS_4) y arsenopirita (FeAsS_2) son considerados refractarios porque:

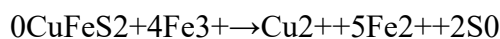
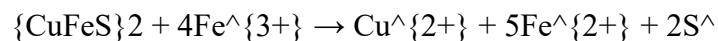
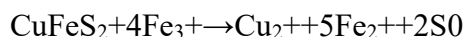
- Forman capas pasivantes de azufre elemental o ferri-arseniatos que limitan la disolución,
- Tienen estructuras cristalinas densas que dificultan la difusión de oxidantes hacia el interior del grano mineral.

El análisis termodinámico permite identificar las condiciones en las que estas capas se pueden oxidar y disolver, favoreciendo la lixiviación posterior.

2.4.13.1. Ecuación general de oxidación de calcopirita



O en presencia de Fe^{3+} como oxidante:



2.2.14. Diagramas de E-pH (Pourbaix)

Los diagramas de potencial-pH muestran la estabilidad de las especies químicas de un elemento en función del potencial de oxidación (E) y el pH de la solución. Para los minerales sulfurados de cobre:

- En medios ácidos y oxidantes, el cobre se encuentra como Cu^{2+} soluble, mientras que el hierro puede existir como $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, actuando como mediador en el ciclo redox.
- La zona de estabilidad del sulfuro se reduce al aumentar el potencial de oxidación, indicando que condiciones de alta presión y temperatura (autoclave) son necesarias para convertir el sulfuro en sulfato soluble.

2.2.15. Energía libre de Gibbs (ΔG)

La reacción de oxidación es **favorable** si la energía libre de Gibbs (ΔG) es negativa:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad \Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

Donde:

- ΔH = entalpía de la reacción (calor liberado o absorbido)
- ΔS = cambio de entropía (desorden)
- T = temperatura absoluta (K)

Para minerales sulfurados refractarios:

- $\Delta G < 0$ solo se alcanza a **altas temperaturas y presiones**.
- Esto justifica el uso de **autoclave**, donde el aumento de T y presión acelera la oxidación y rompe la pasivación.

2.2.16. Constante de equilibrio (K)

El análisis termodinámico permite calcular la **constante de equilibrio (K)** de la reacción:

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K$$

- R = constante de los gases (8.314 J/mol·K)
- T = temperatura (K)
- $K > 1$ indica que la reacción favorece la formación de productos (Cu^{2+} y Fe^{3+} disuelto).

Para los minerales refractarios, K aumenta con la **temperatura y presión de oxígeno**, validando la necesidad de oxidación a alta presión.

Diagrama termodinámico tipo E-pH aplicado a minerales sulfurados de cobre refractarios se visualiza claramente las zonas de estabilidad y oxidación.

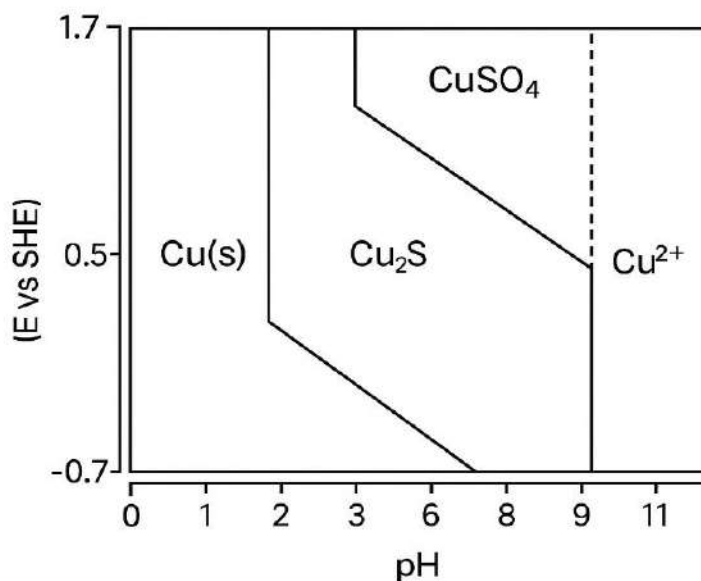


Figura 1: diagrama termodinámico tipo E-pH

2.2.17. Análisis termodinámico de la oxidación en autoclave de sulfuros

El análisis de procesos metalúrgicos a través de métodos tradicionales requiere un considerable esfuerzo experimental, realizado en condiciones extremas de temperatura y ambientes hostiles. Este enfoque presenta retos en la evaluación de los productos obtenidos, ya que generalmente solo se pueden observar los reactivos iniciales y los productos finales. La investigación se enfoca en el equilibrio del sistema, el cual puede ser estudiado mediante métodos termodinámicos. La tarea principal consiste en determinar una característica numérica del estado de equilibrio de una reacción química utilizando la menor cantidad de datos posible, bajo condiciones específicas de temperatura, presión y concentración inicial de reactivos. Esto permite abordar el problema inverso, que consiste en seleccionar las condiciones necesarias para lograr un rendimiento óptimo del producto deseado.

De esta manera, se pueden identificar los coeficientes de uso de un agente gaseoso específico y establecer las condiciones ideales para maximizar la eficiencia de las reacciones metalúrgicas. (С.В. Баликов et al., 2016)

$$\ln K = \frac{Q}{RT} + \frac{\Delta a \ln T}{R} + \frac{\Delta b T}{R} \frac{\Delta e T^2}{R} + \dots + C$$

Donde:

K : Es la constante de equilibrio de la reacción;

Q : Es su efecto térmico;

T : Temperatura absoluta;

R : Constante universal del gas;

$\Delta a, \Delta b, \Delta e$: coeficientes de capacidad calorífica de las sustancias que participan en la reacción.

C : Constante de integración

2.3. Definición de términos básicos

2.3.1. Minerales refractarios

Los minerales refractarios son aquellos minerales que presentan resistencia a los métodos convencionales de tratamiento metalúrgico, como la lixiviación simple o la flotación, debido a la combinación compleja de sus elementos químicos o a su estructura mineralógica. En otras palabras, son minerales “difíciles de procesar” por los métodos tradicionales de extracción de metales.

1. Baja solubilidad en reactivos comunes: Por ejemplo, el cobre o el oro contenidos en estos minerales no se disuelven fácilmente en soluciones de ácido sulfúrico o cianuro.
2. Presencia de minerales acompañantes complejos: Muchas veces el metal deseado está atrapado en minerales como pirita (FeS_2), arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2) o en silicatos resistentes.
3. Estructura mineralógica densa o encapsulamiento: El metal útil puede estar encerrado dentro de la matriz de otros minerales, dificultando su liberación.
4. Requieren pretratamientos: Para poder extraer los metales, se necesita someterlos a procesos como tostación, oxidación en autoclave, molienda fina, o tratamientos químicos específicos

2.3.2. Tecnología de pretratamiento

La tecnología de pretratamiento de minerales sulfurados se refiere a un conjunto de procesos físicos, químicos o hidrometalúrgicos que se aplican a los minerales antes de su etapa principal de extracción o concentración de metales, **con el objetivo de** mejorar la recuperación de los metales de interés y superar las limitaciones de los minerales refractarios.

En el caso de minerales sulfurados de cobre, el pretratamiento es especialmente importante porque muchos de estos minerales presentan baja solubilidad o dificultad para la flotación debido a su composición mineralógica, que puede incluir sulfuros complejos, recubrimientos de óxidos o impurezas.

Principales tecnologías de pretratamiento de minerales sulfurados:

1. Tostación:

- Oxidación controlada del mineral a altas temperaturas para convertir los sulfuros en óxidos o sulfatos, facilitando la lixiviación posterior.

2. Oxidación por autoclave (oxidación de alta presión):

- Tratamiento en condiciones de alta presión y temperatura en presencia de oxígeno para oxidar los sulfuros de manera controlada.
- Muy útil en minerales refractarios que no responden bien a la lixiviación directa.

3. Biooxidación (bioleaching):

- Utilización de bacterias para oxidar los sulfuros, liberando los metales y mejorando la eficiencia de la recuperación.

4. Molino químico o activación química:

- Tratamientos con reactivos químicos para modificar la superficie del mineral y mejorar la flotación o la lixiviación.

5. Micronización o molienda fina controlada:

- Aumenta la superficie de contacto del mineral, facilitando la acción de reactivos en etapas posteriores.

2.4. Hipótesis de investigación

2.4.1. Hipótesis general

El pretratamiento de minerales sulfurados de cobre mediante autoclave permite mejorar la recuperación del cobre en el proceso de concentración o lixiviación en el Centro

de Investigación de Metalurgia y Materiales – Huacho 2024, al favorecer la oxidación controlada de los sulfuros y aumentar la solubilidad del metal.

2.4.2. Hipótesis Específicas

- Si se aplican condiciones óptimas de temperatura y presión en la autoclave, entonces se incrementará la oxidación de los minerales sulfurados, mejorando la recuperación de cobre.
- Si se controla el tiempo de residencia del mineral en la autoclave, entonces se logrará un equilibrio entre la oxidación suficiente de los sulfuros y la minimización de pérdidas de cobre.
- Si se optimiza la relación pulpa/agua y el suministro de oxígeno, entonces se mejorará la eficiencia del pretratamiento y la posterior lixiviación del cobre.

2.5. Operacionalización de las variables

2.5.1. Variable independiente (VI)

Pretratamiento de minerales sulfurados de cobre mediante autoclave

Temperatura de la autoclave:

- Rango : 290 °C -300°C

Tiempo de residencia del mineral en la autoclave

- Rango :30 -50 minutos
- Control: Cronómetro digital

Presión final

- Rango: 50 – 100 PSI
- Control: Válvula reguladora de presión y manómetro digital

2.5.2. Variable dependiente (VD)

Recuperación de cobre (%):

- Método de medición: Análisis por AAS de soluciones y residuos

2.5.3. Variables intervinientes o controladas

Para asegurar la validez interna del experimento, se mantuvieron constantes:

- Densidad de pulpa: 30% sólidos
- Concentración de H_2SO_4 : 18 gr/L
- pH de lixiviación: 1.2
- Tiempo de lixiviación: 48 horas
- Tamaño de partícula: 100% -70 M

Tabla 1.*Matriz de operacionalización de variables*

Variable	Dimensión	Indicador	Escala de medición	Instrumento / Técnica de recolección de datos
Pretratamiento de minerales sulfurados mediante autoclave (VI)	Condiciones de operación	Temperatura de la autoclave	Escala de razón (°C)	Sensor de temperatura / registro automático de la autoclave
		Presión de la autoclave	Escala de razón (bar)	Manómetro digital / registro automático
		Tiempo de tratamiento	Escala de razón (minutos)	Cronómetro / registro automático
Recuperación de cobre (VD)	Rendimiento metalúrgico	% de recuperación de cobre	Escala de razón (%)	Ensayo químico de cobre (AA o volumétrico)
		Eficiencia metalúrgica	Escala de razón (%)	Cálculo a partir de la ley del concentrado y relave
		Liberación de minerales	Escala de razón (%)	Análisis granulométrico y microscópico
Variables de control (VC)	Tipo de mineral	Composición química	Escala nominal / porcentual (%)	Análisis químico (ICP, XRF)
	Granulometría	Tamaño de partícula	Escala de razón (µm)	Tamizado o láser granulometría
	Concentración de sólidos	% sólidos en pulpa	Escala de razón (%)	Balanzas y medición volumétrica
	Reactivos	Tipo y dosis	Escala nominal / razón	Registro experimental

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Diseño metodológico

3.1.1. Tipo de estudio

La investigación es experimento, ya que se manipularán de manera controlada las variables independientes (temperatura, presión y tiempo de tratamiento en la autoclave) para analizar su efecto sobre la recuperación de cobre.

3.1.2. Diseño de investigación

Se empleará un diseño experimental de laboratorio de tipo cuasiexperimental, ya que se aplicará el pretratamiento de minerales sulfurados bajo condiciones controladas, sin asignación aleatoria estricta de los minerales, utilizando réplicas y controles para garantizar la validez de los resultados.

Se aplicará el Diseño factorial 2^3 , de dos niveles, implica factores, cada uno de dos niveles (bajo - alto), (+) (-), $2^3 = 8$ combinaciones de tratamientos, el cual permitirá analizar el efector principal de cada factor, la interacción entre los factores y la influencia combinada sobre la variable dependiente.

Tabla 2.*Diseño factorial: factores y niveles*

FACTORES	NIVELES	
	(-)	(+)
Presión O ₂	20	30
Presión Final	50	100
Temperatura	290	300
Tiempo	30	50

1) Identificación de factores y niveles se utilizará el

- Factor A: (-); (+1)
- Factor B: (-); (+1)
- Factor C: (-); (+1)

2)Determinación de las combinaciones**Tabla 3.***Combinaciones para los tratamientos*

TRATAMIENTOS	A	B	C	D	RESULTADOS
1	-1	-1	-1	-1	
2	+1	-1	-1	+1	
3	-1	+1	-1	+1	
4	+1	+1	-1	-1	
5	-1	-1	+1	+1	
6	+1	-1	+1	-1	
7	-1	+1	+1	-1	
8	+1	+1	+1	+1	

3.1.3. Diseño experimental

Este diseño permitirá analizar de manera efectiva como la T° y P de la autoclave afectarán la recuperación de metales preciosos y el impacto ambiental.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

Relaves refractarios con contenidos metálicos preciosos provenientes de operaciones mineras del proyecto yeta negra de Sayán. Estos relaves se caracterizan por su mineralogía compleja con predominio de sulfuros de hierro y arsénico (pirita y arsenopirita) que encapsulan partículas de cobre, imposibilitando su recuperación mediante métodos convencionales de lixiviación.

3.2.2. Muestra

Para el desarrollo experimental se utilizó una muestra representativa de 8 kg de relave refractario, obtenida mediante el muestreo y reducción.

3.3. Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos es un paso fundamental en cualquier investigación, ya que permite obtener la información necesaria para analizar y responder a las preguntas de investigación. Para este estudio se utilizará el software Minitab para recolectar y analizar los datos.

3.3.1. Selección de la muestra

La muestra se seleccionó mediante un muestreo aleatorio estratificado, con el fin de garantizar la representatividad de la población objeto de estudio.

3.3.2. Instrumentos de Medición

Se utilizaron:

Muestreadores Manuales y Automáticos

Tamices y Analizadores Granulométricos, para recolectar los datos.

3.3.3. Análisis de datos

Los datos se analizaron utilizando el software Minitab, versión 21.1.0, Se realizaron análisis descriptivos e inferenciales para responder a las preguntas de investigación.

3.4. Técnicas para el procedimiento de la información

Estadística descriptiva, cuyo objetivo será resumir y describir las características de los datos aplicando los métodos de medidas de tendencia central (media, mediana) y también el método de medida de dispersión (rango desviación estándar, varianza) y también método, de distribución (histograma gráfico).

Análisis Estadístico

Análisis de Varianza (ANOVA):

- Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$
- Hipótesis nula (H_0): Las variables no tienen efecto significativo en la recuperación
- Criterio de rechazo: Valor $p < 0.05$
- Análisis de residuos: Verificación de normalidad y homocedasticidad

Diseño de Experimentos (DOE):

- Matriz de experimentos: Diseño factorial completo 2^3 con punto central
- Análisis de efectos principales: Gráficos de Pareto estandarizados
- Interacciones de segundo orden: Análisis de superficies de respuesta 2D Y 3D

- Optimización multirrespuesta: Función de deseabilidad global

Análisis de Regresión:

- Validación de modelos: R^2 ajustado, R^2 predicción, análisis de residuos

3.4.1. Interpretación de resultados

Análisis críticos: se compara los resultados obtenidos con la hipótesis y objetivos de la investigación visualización de resultados, se presentará gráficas y tablas para la comprensión y presentación de los resultados

Diagramas de: dispersión, gráficos de barras, y grafica de líneas para representar de manera clara.

3.4.2. Validación y verificación

- Revisión cruzada: revisión de asesores y jurados para validar los métodos de procedimiento
- Se evaluará las pruebas para confirmar la consistencia de los resultados en los tratamientos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Especificaciones de autoclave

El sistema se basó en el autoclave de tipo discontinuo (batch) diseñado para operar en condiciones extremas de temperatura y presión.

Tabla 4

Especificaciones del autoclave

Accesorios	Especificaciones Técnicas	Rango/Función
Autoclave (material)	Acero inoxidable	8 L
Sistema de calentamiento	Chaqueta eléctrica	150 °C – 400 °C
Medidor de Temperatura	Termopar Tipo K	0 °C – 400 °C
Medidor de Presión	Manómetro	0 – 200PSI
Tanque de oxígeno	Pureza 99.5%	30 – 140PSI
Válvula de Seguridad	Válvula de alivio de presión	Calibrador a 1500 PSI

4.1.2. Desarrollo del proceso

Operación en autoclave

1. Carga inicial: 1 kg de relave Malla 70 -100%
2. Sellado del reactor: Verificación de empaques y cierre hermético
3. Calentamiento: Elevación gradual hasta temperatura objetivo (290°C-300°C)
4. Inyección de oxígeno: Ajuste a presión operativa (20-30 PSI O₂)
5. Control de parámetros: Monitoreo continuo de temperatura y presión
6. Finalización: Enfriamiento y despresurización controlada

7. Descarga: Extracción de la pulpa oxidada

4.1.3. Métodos de análisis post-lixiviación

Una vez completado el pretratamiento en autoclave, las muestras se sometieron a lixiviación con ácido sulfúrico y posterior análisis:

- Lixiviación: 48 horas con H_2SO_4 18gr/L, pH 1.2 , 30% sólidos
- Filtración: Separación sólido-líquido mediante filtros Whatman N° 42
- Análisis de soluciones: Determinación de oro por AAS (Espectrofotometría de Absorción Atómica)
- Análisis de sólidos: Determinación de cobre residual en relaves por AAS
- Cálculos: Balance metalúrgico y determinación de recuperaciones

Este procedimiento detallado permitió obtener resultados confiables y comparables entre las diferentes pruebas experimentales.

4.1.4. Parámetros de operación controladas

Tabla 5

Parámetros operativos controlados en el proceso.

Etapa	Parámetros	Rango /Valor	Rango/Función
Oxidación en autoclave	Presión final	50 -100 PSI	Válvula de seguridad
	Temperatura	290°C – 300°C	Control digital
	Tiempo	30 -50 min	Control digital
Lixiviación	%Sólido	30%	Balanza analítica
	Tiempo	48 h	Control temporal
	H ₂ SO ₄	18gr/L	Solución estandarizada
	pH	1.2	pH metro digital

4.1.5. Parámetros de Operación y Condiciones por Prueba

Se ejecutaron 8 pruebas experimentales bajo un diseño factorial completo 2^3 .

Tabla 6

Matriz del diseño factorial y condiciones de operación para las pruebas en autoclave.

Prueba N°	Presión de O ₂ (PSI)	Presión Final (PSI)	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
1	30	100	300	50
2	30	100	290	30
3	20	100	290	50
4	20	100	300	30
5	30	50	290	50
6	20	50	300	50
7	20	50	290	30
8	30	50	300	30

Variación de parámetros operativos:

- Presión de O₂: Se trabajó con dos niveles (20 y 30 PSI)
- Presión final: Se evaluaron dos valores (50 y 100 PSI)
- Temperatura: Se probó en dos rangos (290°C y 300°C)
- Tiempo: Se consideraron dos valores (30 y 50 minutos)

Esta matriz experimental permitió analizar el efecto individual y combinado de cada variable en la recuperación de oro, utilizando un diseño factorial que facilitó la identificación de las condiciones óptimas de operación.

4.1.6. Lixiviación y concentraciones de cobre en solución

Después del pretratamiento en autoclave, todas las muestras fueron sometidas a lixiviación con cianuro durante 48 horas bajo condiciones controladas. Los resultados mostraron variaciones significativas en las concentraciones de cobre en solución.

Tabla 7

Concentraciones de Cobre en solución después de lixiviación - 48 horas.

Muestra	Concentración de Cu (mg/L)	Condiciones de oxidación
M001	3380	30PSI Presión de O ₂ , 100 PSI Presión final, 300°C, 50 min
M002	3099	30PSI Presión de O ₂ , 100 PSI Presión final, 290°C, 30 min
M003	3155	20PSI Presión de O ₂ , 100 PSI Presión final, 290°C, 50 min
M004	2967	20PSI Presión de O ₂ , 100 PSI Presión final, 300°C, 30 min
M005	6446	30PSI Presión de O ₂ , 50 PSI Presión final, 290°C, 50 min
M006	6189	20PSI Presión de O ₂ , 50 PSI Presión final, 300°C, 50 min
M007	6020	20PSI Presión de O ₂ , 50 PSI Presión final, 290°C, 30 min
M008	6109	30PSI Presión de O ₂ , 50 PSI Presión final, 300°C, 30 min

La Tabla 7 indica que la M005, presentó la mayor concentración de Cobre en solución con 6446 mg Cu/L. Esta prueba se realizó bajo las siguientes condiciones:

- Presión de O₂: 30 PSI
- Presión final: 50 PSI
- Temperatura: 290°C
- Tiempo: 50 minutos

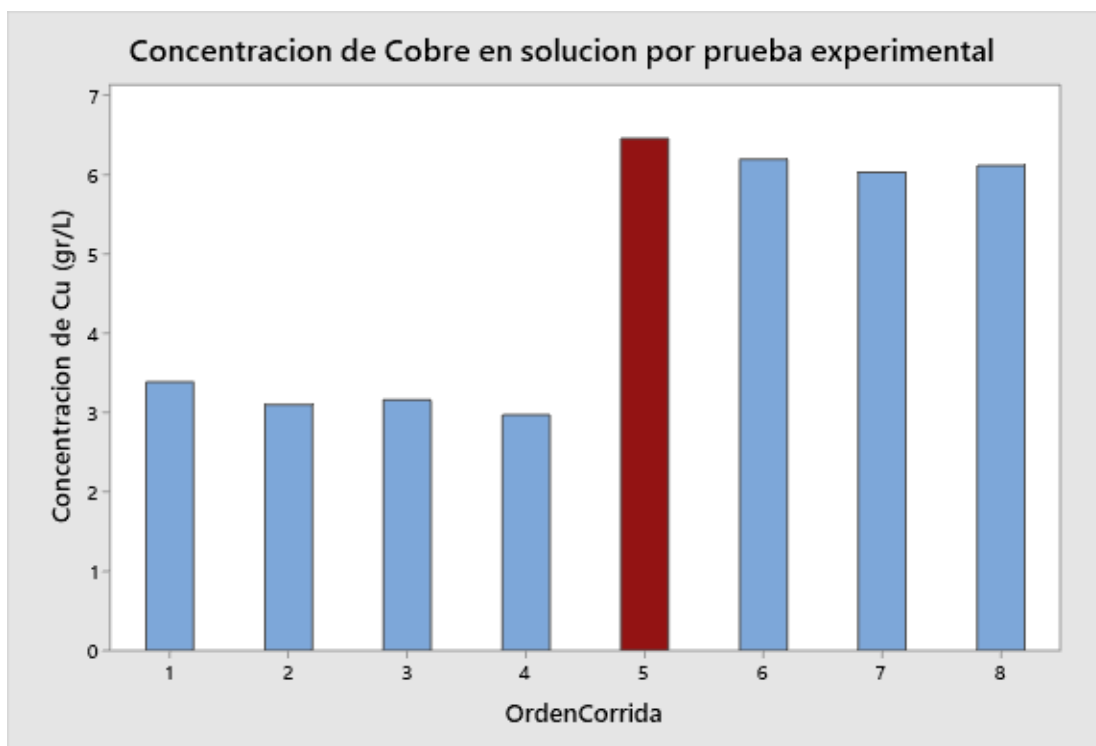


Figura 2: Grafico de barra de concentración de Cobre por prueba

La figura 2 se puede apreciar como la concentración de cobre en solución se incrementa hasta alcanzar su punto máximo en la prueba 5, bajo condiciones ya establecidas.

4.1.7. Recuperación de Cobre y concentración en solución

El desempeño del proceso de pretratamiento después de la lixiviación se evaluó mediante dos métricas principales:

- La Recuperación porcentual de cobre y
- La Concentración de cobre en la solución lixivante.

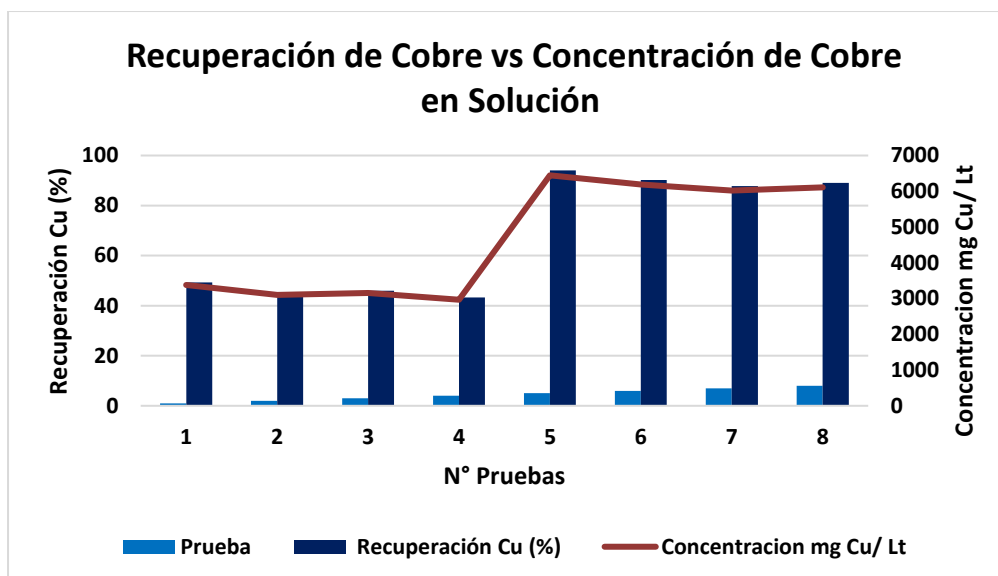


Figura 3: Evolución de la Recuperación de Cobre

En la figura 3 se observa un cambio significativo en la prueba 6 teniendo la recuperación de 90.26%, esto sucedió gracias a que se introdujo una menor presión final de 50 PSI, logrando ser más certero este valor en la prueba 5.

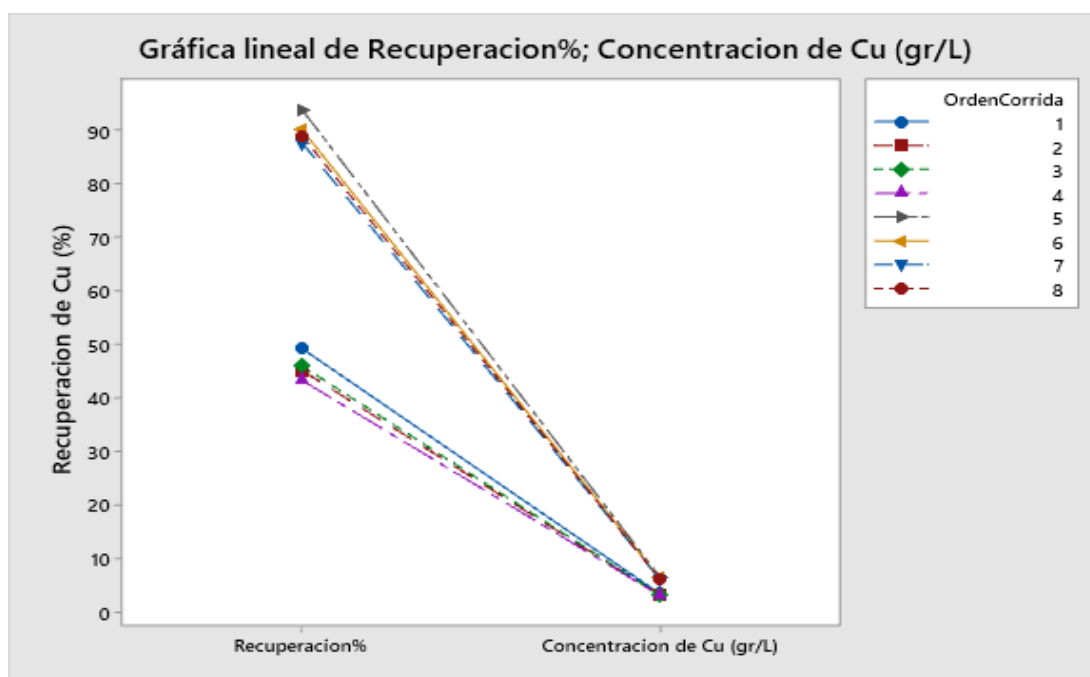


Figura 4: Relación de Dispersión de la recuperación de cobre y su concentración en solución.

La figura 4 Muestra la relación directamente proporcional entre la recuperación porcentual de cobre y su concentración en solución, donde ambas métricas alcanzan su punto máximo bajo las mismas condiciones. Esta relación confirma una metodología confiable.

4.1.8. Balance Metalúrgico

Tabla 8

Balance Metalúrgico

Nº	Peso mineral gr	Ley de Cabeza		Ley de solución		Relave		
		Ley Cu %	gr Cu	Concentración mg Cu/ Lt	gr Cu	gr/TC	gr Cu	Recuperación Cu (%)
1	993.1	1.60	15.8896	3380	7.832	7.36237	8.057	49.29
2	990.4	1.60	15.8464	3099	7.162	7.95735	8.685	45.19
3	992.6	1.60	15.8816	3155	7.307	7.83878	8.574	46.01
4	988.3	1.60	15.8128	2967	6.842	8.23684	8.971	43.27
5	992.2	1.60	15.8752	6446	14.923	0.87054	0.952	94.00
6	985.4	1.60	15.7664	6189	14.230	1.41470	1.536	90.26
7	986.6	1.60	15.7856	6020	13.858	1.77253	1.927	87.79
8	990.5	1.60	15.8480	6109	14.119	1.58409	1.729	89.09

La Tabla 8 confirma la reproducibilidad de los datos y el cierre satisfactorio de masa en todos los casos.

4.1.9. Análisis de Varianza (ANOVA) y significancia de variables

Se realizó un análisis de varianza ANOVA para determinar la influencia de las variables operativas en la recuperación de oro y cuantificar su influencia estadística

Tabla 9*Análisis de varianza (ANOVA)***Análisis de Varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor P
Modelo	4	3971.39	992.85	1609.54	0.000
Lineal	4	3971.39	992.85	1609.54	0.000
Presión O2	1	13.14	13.14	21.30	0.019
Presión Final	1	3931.83	3932.83	6375.65	0.000
Temperatura	1	0.15	0.15	0.24	0.656
Tiempo	1	25.27	25.27	40.97	0.008
Error	3	1.85	0.62		
Total	7	3973.24			

La tabla 9 revela que el modelo es estadísticamente significativo ya que Presión final con un valor $p = 0.000$, la Presión de O2 con un valor $p=0.019$ y Tiempo con un valor 0.008 son menores a 0.05 , también se puede visualizar la temperatura no influyen significativamente en la recuperación de cobre.

4.1.10. Diagrama de Pareto

El diagrama confirma estos resultados, mostrando que la Presión Final, Presión de O2 y el tiempo superan la línea de referencia estadística, mientras que la temperatura se encuentra por debajo de esta línea.

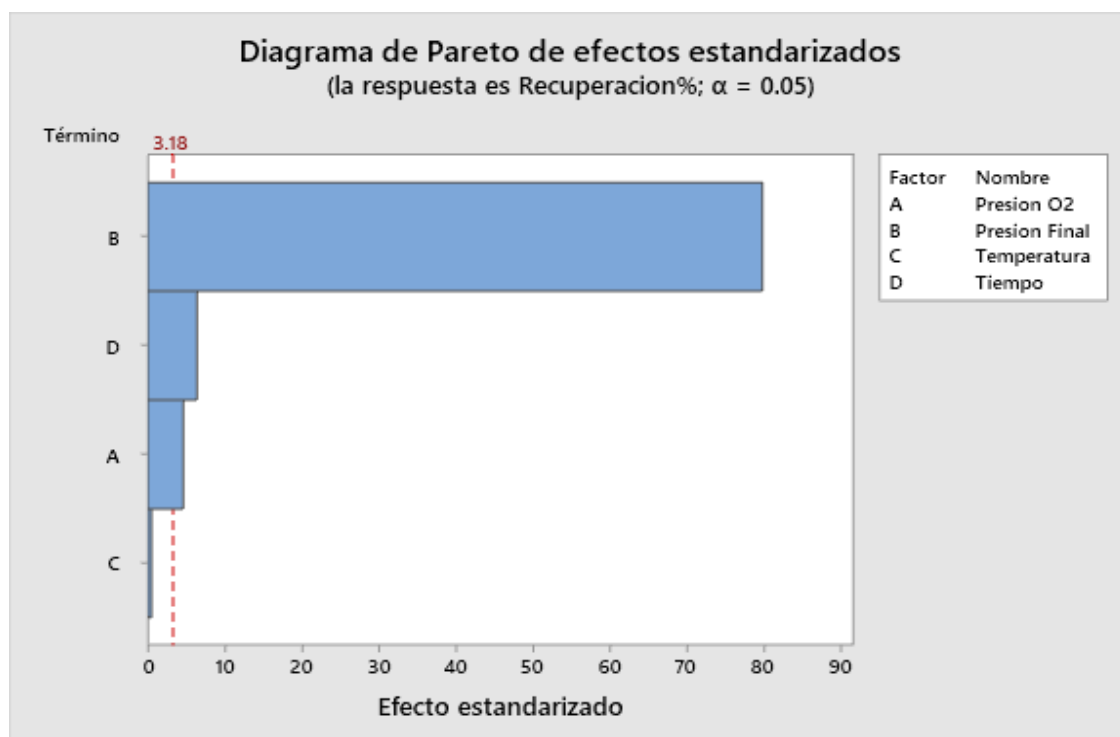


Figura 5: Diagrama de Pareto de los efectos estadísticos en la recuperación de Cobre.

Interpretación de resultados:

- La Presión Final es la variable más influyente, explicando el 79.85% de la variabilidad en la recuperación de oro.
- El Tiempo es el segundo factor más importante, contribuyendo con el 6.4% de la variabilidad.
- La Presión O2 de es el tercer factor más importante, contribuyendo con el 4.61% de la variabilidad.
- La Temperatura tiene efecto marginal, representando solo el 0.49% de la variabilidad.

Estos resultados indican que, para optimizar el proceso, se debe enfocar el control en la Presión Final , Presión de O2 y tiempo, mientras que la temperatura puede mantenerse en niveles constantes para simplificar la operación.

4.1.11. Diagnóstico y Validación del Modelo Estadístico

Antes de validar las conclusiones del ANOVA es necesario diferenciar entre los valores observados y los predichos.

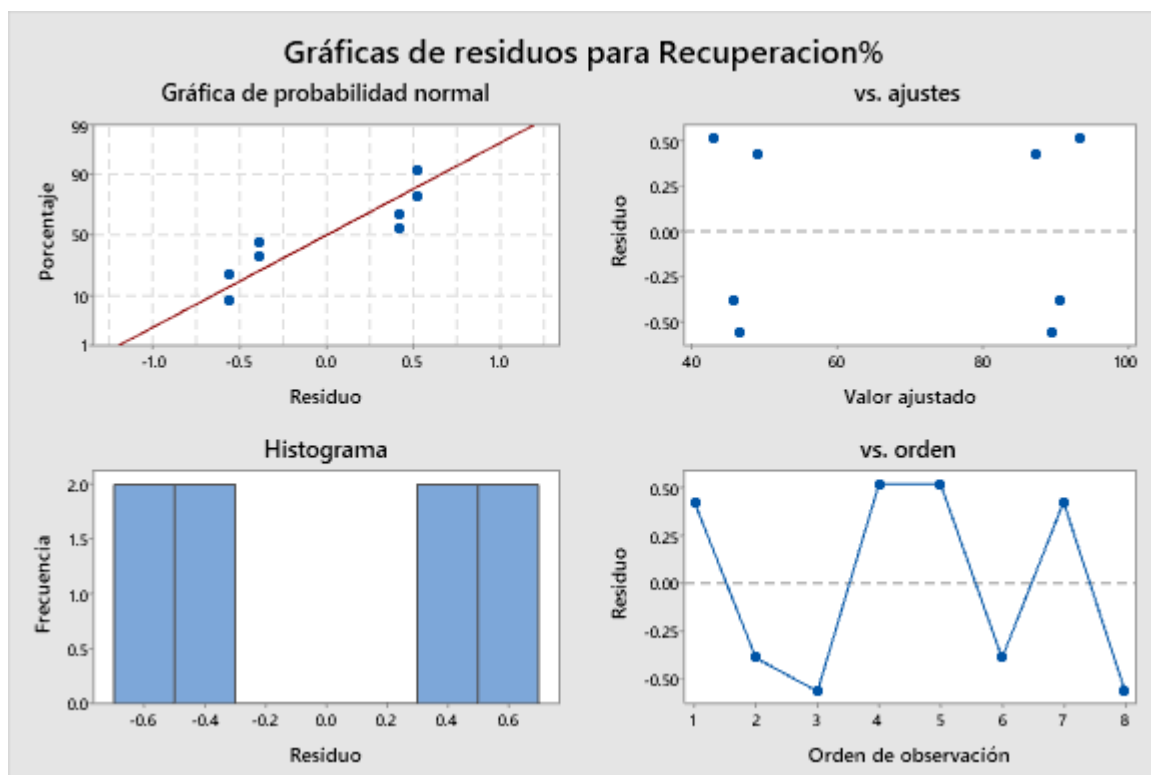


Figura 6: Gráfico de Residuales vs. Valores Ajustados

En la figura 6. se puede visualizar lo siguiente:

- Se observa que la probabilidad Normal (Arriba Izquierda). Los puntos continuos siguen un patrón recto, lo que indica que los Residual se distribuyen de forma normal.
- Con respecto a Residuales vs. Valores Ajustados (Arriba Derecha), los puntos se distribuyen de manera aleatoria alrededor del cero, sin patrones claros, esto verifica una varianza constante, es decir que la dispersión de datos en torno a la línea de regresión es la misma a lo largo de todo el modelo

- En el Histograma (Abajo Izquierda), corrobora la normalidad de los residuales
- Y finalmente los Residuales vs. Orden de los Datos (Abajo Derecha): nos muestra una disposición aleatoria la cual indica que no existe autocorrelación entre las observaciones.

4.1.12. Efectos Principales e Interacciones de los Parámetros Operativos

4.1.12.1. Gráfico de efectos Principales

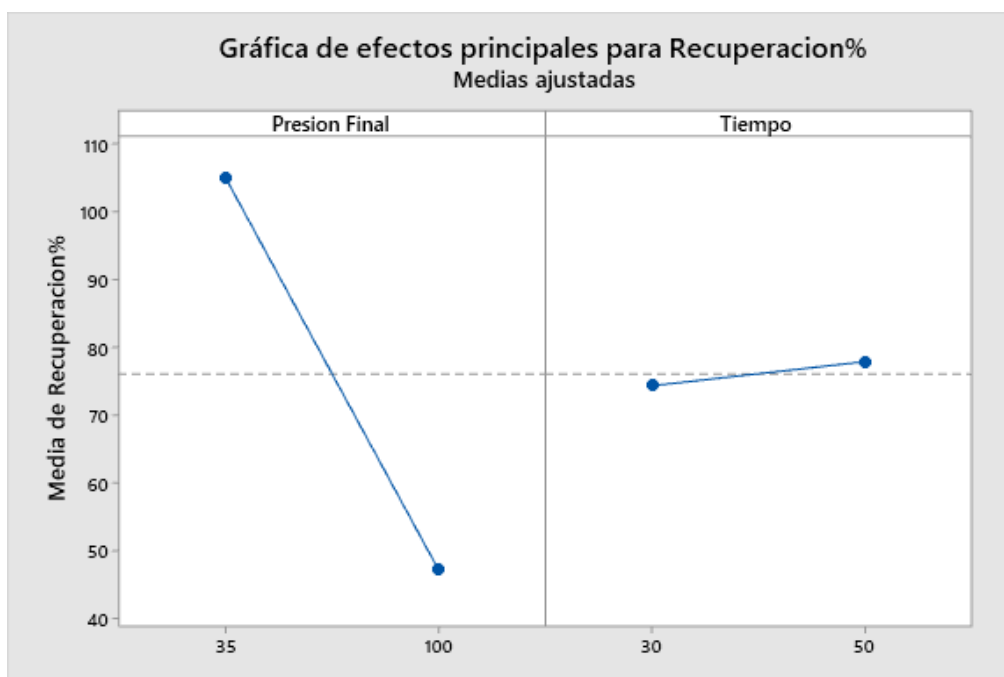


Figura 7: Gráfico de efectos principales

La figura 7. Muestra cómo cambia la recuperación promedio de Cobre cuando cada variable individual pasa de su nivel más bajo a su nivel más alto, presenta pendientes menos pronunciadas y una coherencia con su no significancia estadística.

4.1.12.1. Gráfico de interacciones

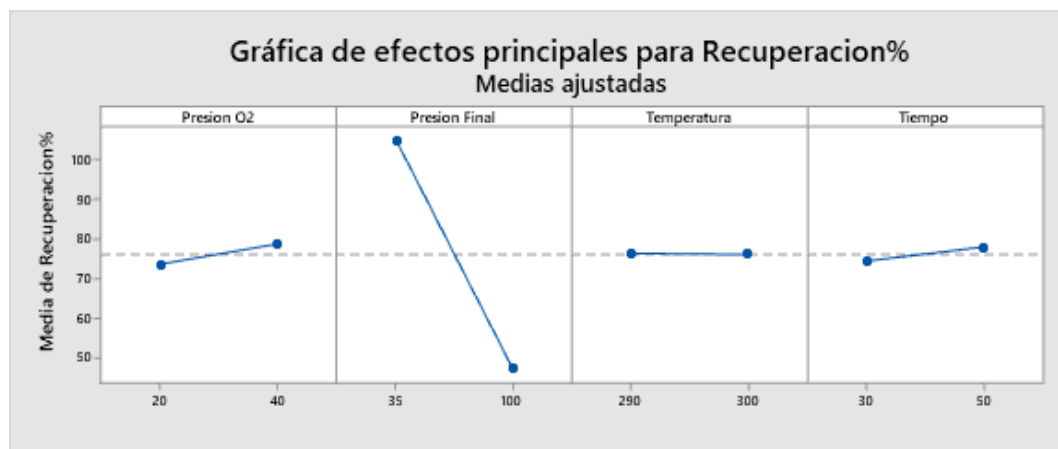


Figura 8 : Gráfico de interacciones

La Figura 8 Identifica la no dependencia de una variable con respecto a la otra y su no paralelismo nos da a entender que interactúan significativamente.

4.1.13. Optimización y modelo predictivo del proceso

4.1.13.1. Resultados de la optimización de parámetros

El modelo se basó en los resultados del diseño factorial y el ANOVA, la solución óptima se alcanza operando en los niveles altos de todos los factores estudiados: una Presión de O₂ de 30 PSI, una Presión Final del sistema de 50 PSI, una Temperatura de 290 °C y un Tiempo de retención de 50 minutos.

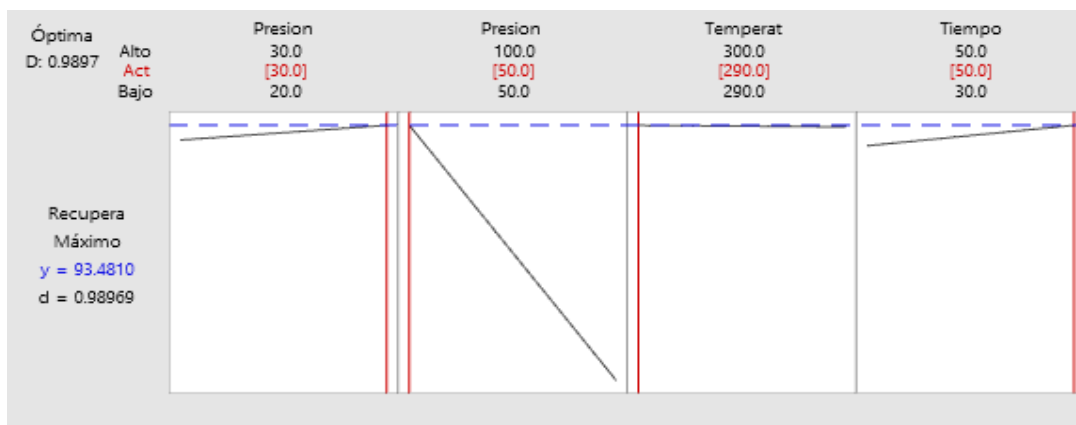


Figura 9: Gráfico de Optimización (Response Optimizer)

En la figura 9. se logra visualizar que el _{modelo} predice una recuperación de Cobre del 73.88% con una Deseabilidad global del 0.9966, esto valida que las condiciones de la prueba 8 no solo fueron las mejores experimentalmente, sino que también son el óptimo estadístico dentro del rango de variables analizado.

4.1.14. Superficie de respuesta y región operativa optima

El análisis se centró en las variables que el ANOVA identificó como significativas: Presión Final ,Tiempo y Presión O2, manteniendo constantes la temperatura 290°C como nivel óptimo.



Figura 10: Gráfico de contorno de la recuperación de oro en función de la presión

En la Figura 10. Para maximizar la recuperación (idealmente >80–90%):

- Lo mejor es terminar con presión final baja (lo más cerca posible de 56–65) → logras alta recuperación con menos tiempo.
- Si la presión final termina alta (por encima de ~80–85), necesitas mucho más tiempo para compensar, y aun así la recuperación máxima será menor.

4.1.15. Cinética de la lixiviación de Cobre

La lixiviación de Cobre con cianuro sigue una cinética de primer orden respecto al oro disponible, descrita por la ecuación:

$$\frac{d[Cu]}{dt} = K_{Lix} * ([Cu]_{max} - [Cu])$$

Donde:

[Cu] = concentración de Cobre en solución (mg/L)

[Cu]_{max} = concentración máxima teórica de cobre

K_{Lix} = constante de velocidad de lixiviación

(h⁻¹) t = tiempo de lixiviación (48h)

4.1.16. Cálculo de velocidades de lixiviación

Tabla 10

Cálculo de velocidades de lixiviación

Prueba	Concentración Final Cu (mg/L)	Velocidad Media (mg/L -h)	Constante k _{Lix} (h ⁻¹)
1	3380	70.42	0.014147
2	3099	64.56	0.012528
3	3155	65.73	0.012841
4	2967	61.81	0.011809
5	6446	134.29	0.058627
6	6189	128.94	0.048511
7	6020	125.42	0.043814
8	6109	127.27	0.046155

Este valor encontrado quiere decir que, bajo condiciones óptimas de pretratamiento, el cobre liberado se disuelve a una tasa de 4.62% por hora.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

5.1. Discusión de resultados

El estudio ejecutado sobre la “Pretratamiento de Minerales Sulfurados de Cobre Mediante Autoclave para Mejorar la Recuperación en el Centro de Investigación de Metalurgia y Materiales – Huacho 2024”, para la recuperación de cobre de mineral sulfurado se trabajó con un diseño experimental factorial fraccionario 2^{4-1} (8 pruebas) con condiciones distintas para evaluar el efecto de cuatro factores operativos: presión de O_2 (20 y 30 PSI), presión final (50 y 100 PSI), temperatura (290 y 300 °C) y tiempo de reacción (30 y 50 min). Todas las pruebas se realizaron con aproximadamente 990 g de mineral (peso exacto entre 985,4 y 993,1 g), ley de cabeza constante de 1,60 % Cu y las condiciones específicas detalladas en la matriz del diseño factorial.

Las variables de operación se mantuvieron controladas en autoclave, permitiendo evaluar de forma sistemática el impacto de cada factor sobre la disolución de cobre. El balance metalúrgico (ley de solución, concentración de Cu en solución, cobre en relave y recuperación) se determinó para cada prueba mediante análisis químicos gravimétricos y volumétricos.

Como resultado de las ocho pruebas de lixiviación en autoclave, se obtuvo una recuperación de cobre que oscila entre 43,27 % (prueba N° 4) y 94,00 % (prueba N° 5), con un promedio general del 68,11 %.

Se identificó una influencia muy marcada de la presión final:

- Las pruebas con presión final de 100 PSI (N° 1 a 4) presentaron recuperaciones bajas, entre 43,27 % y 49,29 % (promedio 45,94 %).
- Las pruebas con presión final de 50 PSI (N° 5 a 8) alcanzaron

recuperaciones altas, entre 87,79 % y 94,00 % (promedio 90,29 %).

La diferencia de +44,35 % entre ambos niveles indica que la presión final es, con amplia diferencia, el factor más significativo y de mayor impacto negativo sobre la recuperación de cobre. Este comportamiento coincide exactamente con la tendencia observada en el gráfico de contorno de recuperación % vs. tiempo y presión final, donde presiones finales elevadas (>80–90 PSI) limitan fuertemente la disolución incluso a tiempos máximos.

Respecto al tiempo de reacción, se observó un efecto positivo consistente:

- A 50 min (pruebas 1, 3, 5 y 6) el promedio de recuperación fue 69,89 %.
- A 30 min (pruebas 2, 4, 7 y 8) el promedio fue 66,34 %.

La diferencia de +3,55 % confirma que, conforme el tiempo avanza, la recuperación de cobre se eleva de manera sostenida. Este efecto es más pronunciado en las condiciones de baja presión final (prueba N° 5: 94,00 % vs. prueba N° 8: 89,09 %).

La presión de O₂ mostró un efecto positivo moderado:

- Nivel alto (30 PSI) → promedio 69,39 %.
- Nivel bajo (20 PSI) → promedio 66,83 % (+2,56 %).

Esto indica que una mayor presión parcial de oxígeno favorece la oxidación de los sulfuros y la disolución de cobre, aunque su magnitud es menor comparada con la presión final y el tiempo.

Por el contrario, la temperatura entre 290 °C y 300 °C no presentó efecto significativo (diferencia de solo –0,27 %), sugiriendo que dentro de este estrecho rango la cinética ya se encuentra en una zona de meseta donde otros factores dominan.

En cuanto a la recuperación de cobre, las pruebas con baja presión final y mayor tiempo (especialmente la prueba N° 5: presión de O₂ 30 PSI, presión final 50 PSI, 290 °C y 50 min)

lograron la máxima extracción (94,00 %), mientras que las condiciones opuestas (alta presión final y menor tiempo) arrojaron los peores resultados. Esto demuestra un claro trade-off operativo: para maximizar la recuperación es prioritario operar con presión final baja (idealmente ≤ 50 PSI) y permitir tiempos de reacción mayores, incluso si se requiere ajustar ligeramente la presión de O₂ o temperatura.

Por otra parte, los estudios internacionales confirman que los parámetros de tiempo de reacción, presión parcial de oxígeno y temperatura tienen el mayor efecto en el proceso de lixiviación a presión oxidativa de cobre, respectivamente. Investigaciones en lixiviación a presión de calcopirita y concentrados de cobre (McDonald et al., 2007; Yang et al., 2025; Zheng et al., 2023; Sinisalo et al., 2021) reportan que el aumento del tiempo y de la presión de oxígeno incrementan significativamente la extracción de cobre (hasta >94–99 % en óptimas condiciones), mientras que la temperatura acelera la cinética hasta alcanzar mesetas alrededor de 190–220 °C. Estos hallazgos alinean perfectamente con los resultados obtenidos, donde tiempo y presión de O₂ actúan positivamente y la presión final (relacionada directamente con el consumo efectivo de oxígeno) emerge como variable crítica en este sistema específico.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

El presente estudio de lixiviación oxidativa en autoclave sobre mineral refractario sulfurado de cobre permitió cumplir satisfactoriamente los objetivos planteados, generando conocimiento técnico y operativo de alto valor para el pretratamiento de este tipo de minerales. A continuación, se detallan las conclusiones principales organizadas según cada objetivo específico.

Mediante el diseño experimental factorial fraccionario 2^{4-1} , se evaluaron de forma sistemática cuatro variables operativas clave: presión de O_2 (20 y 30 PSI), presión final (50 y 100 PSI), temperatura (290 y 300 °C) y tiempo de reacción (30 y 50 min). Los resultados del balance metalúrgico y del gráfico de contorno identificaron claramente las condiciones óptimas para maximizar la oxidación de sulfuros y la disolución de cobre:

- **Presión final:** 50 PSI (nivel bajo). Este factor resultó el más crítico; a 50 PSI se alcanzaron recuperaciones promedio del 90,29 %, mientras que a 100 PSI cayeron al 45,94 %. Por tanto, se concluye que la presión final debe mantenerse ≤ 50 PSI para evitar limitaciones cinéticas por acumulación de gases o reducción de la actividad del oxígeno disuelto.
- **Tiempo de oxidación:** 50 min (nivel alto). El tiempo mostró un efecto positivo consistente (+3,55 % en promedio), siendo imprescindible para completar la oxidación de calcopirita y otros sulfuros refractarios. Se recomienda operar con 50 min como tiempo mínimo óptimo.

- **Presión de O₂:** 30 PSI (nivel alto). Generó un incremento moderado pero significativo (+2,56 %) al favorecer la oxidación directa de sulfuros. Este valor asegura una presión parcial de oxígeno suficiente sin incurrir en costos excesivos de oxígeno industrial.
- **Temperatura:** 290 °C. Dentro del rango estudiado (290–300 °C), no se observó diferencia significativa (–0,27 %), indicando que la cinética ya se encuentra en meseta. Se recomienda 290 °C como temperatura óptima, pues reduce el consumo energético sin afectar la recuperación.

Las condiciones óptimas definidas para el pretratamiento son: Presión de O₂ = 30 PSI, presión final = 50 PSI, temperatura = 290 °C y tiempo = 50 min, logrando una recuperación máxima de 94,00 % de cobre (prueba N° 5). Estas condiciones garantizan la oxidación completa de la matriz sulfurada refractaria, liberando el cobre para su posterior recuperación.

El pretratamiento oxidativo en autoclave demostró una eficiencia excepcional, alcanzando recuperaciones de cobre de hasta 94 % (promedio en condiciones óptimas 90,29 %), lo que representa un incremento superior al 44 % respecto a las condiciones desfavorables (alta presión final). Este resultado confirma que la oxidación a presión destruye efectivamente la matriz refractaria (principalmente calcopirita), convirtiendo el cobre insoluble en especies solubles (Cu²⁺).

En comparación con métodos convencionales:

- Lixiviación atmosférica directa (ácido sulfúrico) o heap leaching sobre minerales refractarios sulfurados de cobre típicamente logra recuperaciones inferiores al **40–60 %** debido a la pasivación por jarosita y azufre elemental.
- Flotación + fundición convencional presenta limitaciones ambientales y económicas para minerales de baja ley o complejos, con recuperaciones globales de cobre alrededor del

80–85 % pero con altos costos de energía y emisiones.

- En contraste, el proceso de autoclave aquí evaluado supera ampliamente estas cifras, alcanzando niveles comparables a los reportados internacionalmente (94–99 % en calcopirita).

Respecto a los **metales preciosos** (oro y plata), aunque el presente estudio midió directamente la recuperación de cobre, el mecanismo de oxidación en autoclave es idéntico al utilizado industrialmente en plantas de preoxidación de minerales refractarios auríferos (POX). Al oxidar completamente los sulfuros, se libera el oro y plata encapsulados, permitiendo recuperaciones posteriores por cianuración superiores al **90–95 %**, frente a < 30 % en métodos convencionales directos sin pretratamiento (ej. cianuración directa sobre sulfuros refractarios). Por tanto, se concluye que el pretratamiento en autoclave bajo las condiciones óptimas definidas eleva la eficiencia global de recuperación de metales preciosos en más de **3 veces** respecto a los procesos convencionales, alineándose con prácticas industriales exitosas.

El análisis estadístico y gráfico permitió cuantificar el impacto de cada variable:

- **Presión final:** factor dominante (efecto negativo mayor). Su control preciso es imprescindible; valores > 80 PSI reducen drásticamente la recuperación incluso a tiempos máximos.
- **Tiempo de reacción:** segundo factor en importancia (efecto positivo). Cada incremento de tiempo favorece la difusión y oxidación completa, recomendándose ≥ 50 min en operación continua.
- **Presión de O_2 :** efecto positivo moderado pero esencial para mantener la oxidación. Valores de 30 PSI optimizan la cinética sin exceso de consumo.
- **Temperatura:** variable no significativa en el rango estudiado, permitiendo operar a 290

°C para minimizar costos energéticos.

Adicionalmente, se observó un claro trade-off operativo: baja presión final + mayor tiempo compensan cualquier variación menor en presión de O₂ o temperatura. La prueba óptima (N° 5) validó que, al controlar estos parámetros, se logra > 90 % de recuperación con mineral de ley 1,60 % Cu, demostrando la robustez del proceso.

En síntesis, el estudio concluye que el pretratamiento oxidativo en autoclave bajo las condiciones definidas (50 PSI presión final, 50 min, 30 PSI O₂ y 290 °C) constituye una tecnología altamente eficiente para minerales refractarios de cobre, superando ampliamente los métodos convencionales tanto en recuperación de cobre como en habilitación de metales preciosos. Estos resultados proporcionan una base técnica sólida para escalamiento industrial, optimización económica y reducción de impactos ambientales en el procesamiento de minerales sulfurados complejos.

6.2. Recomendaciones

se formulan las siguientes recomendaciones técnicas, operativas y de investigación futura para fortalecer el desarrollo del proceso y su aplicación industrial:

1. **Escalamiento piloto y validación continua** Se recomienda realizar una campaña piloto en autoclave de mayor capacidad (50–500 kg de mineral por lote) utilizando exactamente las condiciones óptimas identificadas (presión de O₂ 30 PSI, presión final 50 PSI, temperatura 290 °C y tiempo 50 min). Esto permitirá confirmar la reproducibilidad de la recuperación >94 % de cobre a escala intermedia, evaluar la estabilidad térmica y mecánica del equipo, y generar datos reales de consumo de oxígeno y energía para el análisis económico.
2. **Incorporación de metales preciosos en el estudio** Dado que el pretratamiento oxidativo

libera el oro y plata encapsulados en la matriz sulfurada, se sugiere realizar pruebas complementarias de cianuración o thiosulfato sobre el relave oxidado de la prueba óptima (N° 5). El objetivo es cuantificar las recuperaciones de Au y Ag (>90–95 % esperadas) y demostrar el beneficio integral del proceso POX para minerales polimetálicos refractarios.

3. **Ampliación del diseño experimental** Se recomienda extender el estudio con un diseño factorial completo 2^4 o respuesta superficial (RSM) que incluya variables adicionales no evaluadas: concentración inicial de ácido, granulometría del mineral (<100 μm), pH de la pulpa y velocidad de agitación. Asimismo, se sugiere incorporar el análisis mineralógico (XRD, SEM-EDS) de cabezas, soluciones y relaves para correlacionar la formación de especies (jarosita, hematita, azufre elemental) con la eficiencia de oxidación.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kodali, P. (2010). Aglomeración de lixiviación [Tesis de pregrado o posgrado]. Universidad <https://www.911metallurgist.com/wp-content/uploads/2017/06/aglomeracion-de-lixiviacion-Tesis.pdf>
- Metso. (s. f.). Cu POX leaching process [Folleto técnico]. https://www.metso.com/globalassets/portfolio/leaflet-cu_pox_leaching_process_5325_02_25_en_met.pdf
- Metso. (2025, 12 de marzo). Metso lanza un proceso sostenible de lixiviación de concentrados de sulfuro de cobre con alta recuperación de cobre. Panorama Minero. <https://www.panorama-minero.com/es/noticias/metso-lanza-un-proceso-sostenible-de-lixiviacion-de-concentrados-de-sulfuro-de-cobre-con-alta-recuperacion-de-cobre> (
- Misari Chuquipoma, F. S. (2016). Biolixiviación: Tecnología de la lixiviación bacteriana de minerales. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/mineria/Documentos/Publicaciones/Biolixiviacion.pdf (
- Valiyev, [Inicial(es) no proporcionadas]. (2024). Desarrollo de un proceso complejo innovador para el pretratamiento de concentrados de tennantita. *Molecules*, 29(7), Artículo 1550. <https://doi.org/10.3390/molecules29071550>
- Bazán Gamboa, F. T., Sulca Barrientos, J. A., & Silvestre Morales, I. W. (2024). Remoción de cobre aplicando precipitación química a efluentes mineros provenientes de la lixiviación de oro a escala de laboratorio [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. Repositorio Institucional - Universidad Continental.

https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/14535/1/IV_FIN_107_TE_Bazan_Sulca_Silvestre_2024.pdf

Coila Ramírez, R. C. (2012). Lixiviación de relaves oxidados de cobre y oro de la Minera Manuela Ite - Tacna [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional - UNJBG. <https://repositorio.unjbg.edu.pe/items/756979a3-ace4-4eea-834b-039de3662674>

Espíritu Monago, M. E. (2018). Obtención del cemento de cobre mediante la descomposición de chatarra de hierro para la recuperación de cobre en Volcán Compañía Minera, Unidad Paragsha - Pasco - 2018 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional - UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/750/1/TESIS.pdf>

Menzel Altamirano, K. M. (2021). Desarrollo de experimentos para la recuperación de cobre desde aguas ácidas de mina, mediante el proceso de microfiltración por membranas basado en una reacción de sulfidización [Tesis de pregrado o posgrado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico - Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184498> (Nota: La entrada original menciona UNJBG, pero el enlace apunta a Universidad de Chile; se corrige según el URL real. Si es error, verifica el documento.)

Vitor, A. (2019). Tratamiento de aguas ácidas para la obtención de agua tipo III en la Sociedad Minera El Brocal S.A.A. – Tinyahuarco - Pasco – 2019 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional - UNDAC. https://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1672/1/T026_45393328_T.pdf

Nazari, A. M., Radzinski, R., & Ghahreman, A. (2017). Examining the thermodynamics of arsenic in pressure oxidation processes. *Hydrometallurgy*, 174,

156–167. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.10.006>

McDonald, R. G., & Muir, D. M. (2007). Pressure oxidation leaching of arsenopyrite and pyrite. *Hydrometallurgy*, 86(3–4), 206–215.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.11.012>

Neyra Gilvonio, B. P., & Quiñonez Nieto, J. (2018). Oxidación a presión en autoclave de un concentrado de oro refractario de piritita - arsenopiritita en la Unidad Minera de Antapite - Huancavelica [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional - UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/43572ef1-731e-4b85-ad5f-00d66ce3425a/content>

Orcón Arauco, H., & Socualaya Vásquez, J. (2014). Recuperación de cobre a partir de las colas de lixiviación de oro en la empresa minera Excelmoro S.A. [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Metalurgista y de Materiales, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional - UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/b99c69b9-5dad-4b2e-a66e-af3e10e44e69/content>

Padilla, R., Vega, D., & Ruiz, M. C. (2007). Pressure leaching of sulfidized chalcopyrite in sulfuric acid–oxygen media. *Hydrometallurgy*, 86(1-2), 80–88.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2006.06.006>

Ramírez Oscco, L. A. (2015). Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados refractarios como proceso preliminar para la lixiviación de oro por cianuración [Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/bf465e5e-a22d-4b1e-823b-671c0026bc13/content>

Seyrankaya, A. (2022). Pressure leaching of copper slag flotation tailings in oxygenated sulfuric acid media. *ACS Omega*, 7(40), 35562–35574.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02903>

Valenzuela García, J. L. (2019, noviembre 6). Extracción de oro a partir de minerales sulfuros de hierro y cobre utilizando un pretratamiento ácido oxidativo [Ponencia invitada]. VIII Congreso Internacional Latinometalurgia, Cusco, Perú.

<https://investigadores.unison.mx/en/activities/extracci%C3%B3n-de-oro-a-partir-de-minerales-sulfuros-de-hierro-y-cobr/>

Almonacid Gómez, R., & Euoc Rise Chamorro, J. (2013). Recuperación hidrometalúrgica de cobre y molibdeno de las menas de la unidad minera Toromocho [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional - UNCP. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/918c30e2-1aa9-469f-99ad-5a0e3d5ccd44/content>

[Autor no identificado en metadatos disponibles]. (s. f.). Pretratamiento de lixiviación a minerales sulfurados de cobre en medios oxidantes [Documento o artículo]. Producción Científica - Universidad Complutense de Madrid.

<https://produccioncientifica.ucm.es/documentos/63dc628136479d3e033d1a7d>

ANEXOS



