

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Evaluación de la cinética de lixiviación a diferentes profundidades, para determinar la recuperación de cobre

Para obtener el título profesional de Ingeniero Metalurgista

Elaborado por

Richard Orlando Paredes Fernández

 [0009-0001-4959-4044](https://orcid.org/0009-0001-4959-4044)

Asesora

Mg. María Flor Suarez Sánchez

 [0000-0002-7271-6687](https://orcid.org/0000-0002-7271-6687)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Paredes Fernández [1]
Referencia/Reference	[1] R. Paredes Fernández, <i>“Evaluación de la cinética de lixiviación a diferentes profundidades, para determinar la recuperación de cobre”</i> [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Paredes, 2025)
Referencia/Reference	Paredes, R. (2025). <i>Evaluación de la cinética de lixiviación a diferentes profundidades, para determinar la recuperación de cobre</i> . [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*El presente trabajo de suficiencia está dedicada a mis
padres quienes me brindaron todo su apoyo en mi
desarrollo personal y profesional.*

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme la sabiduría para desarrollar este Trabajo de Suficiencia
A los docentes de la universidad por transmitirme sus conocimientos, en especial a los asesores quienes me dieron el soporte necesario para culminar este trabajo
Finalmente, a mi familia que me brindo la motivación para desarrollarme profesionalmente.

Resumen

El presente trabajo de investigación analizó la cinética de recuperación a diferentes profundidades para determinar la recuperación de cobre en procesos de lixiviación en pilas.

La investigación surgió debido a que, en operaciones hidrometalúrgicas, la altura de apilamiento del mineral cambia por condiciones operativas y se incrementa para optimizar el espacio; sin embargo, este cambio afecta la cinética de recuperación del cobre.

Para abordar esta problemática se empleó un enfoque cuantitativo y experimental que permite evaluar la cinética de recuperación a diferentes alturas. La metodología incluye la construcción de un módulo experimental, con puntos de muestreo que permiten obtener datos sobre la recuperación de cobre a diferentes profundidades y a lo largo de un periodo de lixiviación. Entre los principales resultados, se observó que incrementar la altura de la pila de mineral reduce la recuperación de cobre debido al mayor consumo de ácido del lixivante.

La investigación está dirigida a empresas mineras que realicen lixiviación en pilas de óxidos de cobre, proporcionando el desarrollo de un trabajo de investigación que sustente el ajuste de parámetros operativos y proyectar con más precisión la producción de cobre. En conclusión, el presente trabajo contribuye a la mejora de las operaciones de lixiviación mediante el control de las variables del proceso tales como la altura de apilamiento del mineral, ciclo de lixiviación.

Palabras claves — Cinética de lixiviación, apilamiento de mineral, recuperación de cobre, lixiviación en pilas, acidez de lixivante, altura de capa.

Abstract

The present research study analyzed the recovery kinetics at different depths to determine the copper recovery in heap leaching processes. The investigation arose because, in hydrometallurgical operations, the stacking height of the ore changes due to operational conditions and is increased to optimize space; however, this change affects the kinetics of copper recovery.

To address this issue, a quantitative and experimental approach was employed to evaluate the recovery kinetics at different heights. The methodology includes the construction of an experimental module, with sampling points that allow data collection on copper recovery at different depths and over a leaching period. Among the main results, it was observed that increasing the height of the ore heap reduces copper recovery due to the higher acid consumption of the leaching solution.

The research is aimed at mining companies that conduct heap leaching of copper oxides, providing the development of a research study that supports the adjustment of operational parameters and more accurate projection of copper production.

In conclusion, this work contributes to the improvement of leaching operations by controlling process variables such as ore stacking height and leaching cycle.

Keywords — Leaching kinetics, ore stacking, copper recovery, heap leaching, leaching solution acidity, layer height.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	1
1.3 Objetivo del estudio	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Antecedentes investigativos	5
1.5.1 Antecedentes internacionales.....	5
1.5.1 Antecedentes nacionales	8
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual.....	11
2.1 Marco teórico.....	11
2.1.1 Procesos unitarios.....	11
2.1.2 Métodos de lixiviación	12
2.1.3 Variables del proceso de lixiviación	14
2.1.4 Cinética de disolución de óxidos de cobre.....	15
2.1.5 Influencia de ganga	16
2.2 Marco conceptual	17
2.2.1 Muestra	17
2.2.2 Ganga	17
2.2.3 Composito	17
2.2.4 Recuperación	17
2.2.5 Pad.....	17
2.2.6 Pila	17
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	18

3.1	Recolección de datos	18
3.1.1	Descripción de la muestra mineral.....	18
3.1.2	Parámetros de operación	18
3.1.3	Ubicación de puntos de muestreo	20
3.1.4	Procedimiento de muestreo	20
3.2	Procesamiento de la información.....	22
3.2.1	Caracterización de la muestra	22
3.2.2	Evaluación de resultados de análisis químico.....	26
3.2.3	Cinética de recuperación por punto de muestreo	27
3.2.4	Cinética de recuperación por metro de profundidad	28
3.3	Análisis de la información	31
	Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados	36
	Conclusiones	44
	Recomendaciones	45
	Referencias bibliográficas.....	46
	Anexos	49

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Especies mineralógicas y su porcentaje en masa de la muestra de análisis	23
Tabla 2: Especies mineralógicas que aportan cobre y su porcentaje de aporte	24
Tabla 3: Distribución granulométrica de mineral	25
Tabla 4: Cálculo de recuperación a diferentes condiciones operativas	41
Tabla 5: Cálculo de tonelaje y libras de cobre de un módulo a diferentes alturas de apilamiento	42
Tabla 6: Costos para el armado de un módulo de apilamiento.....	42
Tabla 7: Estimación de costos de \$/tm y \$/lb a diferentes alturas de apilamiento	43

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Cinética de lixiviación de cobre para diferentes concentraciones de ácido en solución lixivante.....	3
Figura 2 : Riego por goteo con marco de riego de 40 cm x 20 cm.	19
Figura 3 : Evolución de la tasa de riego	19
Figura 4 : Ubicación de puntos de muestreo de Ripios a diferentes periodos de tiempo	20
Figura 5 : Muestreo de ripios a diferentes profundidades con moto perforadora.	21
Figura 6 : Especies mineralógicas y su porcentaje en masa de la muestra de análisis. .	23
Figura 7 : Diagrama de Pareto de Arcillas Totales	24
Figura 8 : Especies mineralógicas que aportan cobre y su porcentaje de aporte.	25
Figura 9 : Distribución granulométrica de la muestra analizada.	26
Figura 10: Leyes de CuT de puntos de muestreo a diferentes periodos de tiempo.	27
Figura 11: Cinética de recuperación del composito de los puntos de muestreo.	28
Figura 12: Leyes promedios de CuT – Metros de profundidad.....	29
Figura 13 : Leyes promedios de CuT realizando el filtrado de datos	30
Figura 14: Cinética de recuperación a diferentes profundidades.....	30
Figura 15: Matriz de las cinéticas de recuperación de los puntos de muestreo.....	31
Figura 16: Cinética de recuperación de cobre por caracterización mineralógica.....	32
Figura 17: Cinética de recuperación de la especie mineralógica Chrysocolla.	32
Figura 18: Cinética de recuperación de la especie mineralógica Cu/Fe Oxide	33
Figura 19: Cinética de recuperación de la especie Mineralógica Cu/Micas	33
Figura 20: Cinética de recuperación a diferentes alturas de apilamiento.....	34
Figura 21: Recuperación a diferentes alturas de apilamiento y diferentes periodos de tiempo.	35
Figura 22: Proyección de recuperación a diferentes alturas de apilamiento y diferentes periodos de tiempo	36
Figura 23: Recuperación de CuT real vs recuperación de CuT modelada	37

Figura 24: Ciclo de lixiviación a diferentes alturas de apilamiento.....	37
Figura 25: Ciclo de lixiviación a diferentes alturas de apilamiento.....	38
Figura 26: Costo de armado (\$/tm) a diferentes alturas de pilas de lixiviación	39
Figura 27: Costo de armado (\$/lb) a diferentes alturas de pilas de lixiviación	39
Figura 28: Plan de apilamiento con altura de apilamiento de 7.0 metros.....	40
Figura 29: Plan de apilamiento con altura de apilamiento de 8.5 metros.....	41

Introducción

El presente trabajo de suficiencia tiene como aporte principal determinar la recuperación de cobre a diferentes alturas de apilamiento a través de la evaluación de la cinética de lixiviación a diferentes profundidades, lo que permite realizar una proyección de producción en el tiempo

En el trabajo de suficiencia se describe el efecto del incremento de la altura de la capa de apilamiento de mineral en la recuperación de cobre, a través de una evaluación experimental, donde se realizó el muestreo de ripios a diferentes periodos tiempos para evaluar la recuperación a diferentes profundidades

El contenido de la investigación está estructurado en cuatro capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo I, se detalla las generalidades, la descripción del problema, el objetivo de estudio y los antecedentes investigativos que describen el alcance y aportes del trabajo de suficiencia.

En el capítulo II, se presenta el marco teórico, donde se explica los procesos y las principales variables que afectan al proceso de lixiviación y el marco conceptual, donde se describe los diferentes conceptos clave utilizados en la investigación

En el capítulo III, se presenta el desarrollo del trabajo de investigación desde la recolección de datos a partir de los instrumentos de recolección de datos, el procesamiento de datos se realizó en Excel de análisis químico de cobre total y el análisis de los datos donde se evalúa el efecto de la altura de apilamiento en la recuperación a partir de los datos procesados.

En el capítulo IV, se realiza el análisis y discusión de los resultados en función del efecto de la altura de apilamiento en la recuperación de cobre para contrastar la hipótesis a partir de los resultados obtenidos de la prueba experimental.

Se plantea finalmente las conclusiones y recomendaciones en función al análisis de resultados del presente trabajo de suficiencia.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Generalidades

El alcance del trabajo de suficiencia realizado tiene el potencial de transformar una problemática operativa en una solución estratégica para las empresas mineras orientadas a la hidrometalurgia, optimizando el proceso de recuperación de cobre mediante la lixiviación en pilas de mineral aglomerado.

Analizar cómo la altura de la capa de apilamiento influye en la cinética de recuperación de cobre, permitirá desarrollar modelos de apilamiento que maximicen la eficiencia de extracción sin incurrir en costos adicionales por consumo de ácido o disminución de la permeabilidad de la pila.

Con los resultados de esta investigación, las empresas mineras establecerán prácticas de apilamiento más eficientes, optimizando los insumos y mejorando la recuperación final de Cu. Esto no solo se traduce en una mayor rentabilidad económica, sino que contribuye a la sostenibilidad de los recursos, al reducir la necesidad de insumos químicos.

El trabajo de investigación permitirá a la industria minera adaptarse a un entorno de producción más competitivo. Los resultados obtenidos pueden utilizarse para establecer criterios operativos que respondan mejor a las condiciones operativas de cada sitio de operación, mejorando la producción de cobre y asegurando el cumplimiento de los planes de producción a largo plazo. De este modo, la investigación contribuye a transformar la problemática actual en una realidad futura más eficiente y rentable para la minería del cobre.

1.2 Descripción del problema de investigación

La lixiviación en pilas, requiere apilar mineral aglomerado por capas, la altura de la capa es ajustada por condiciones operativas, la modificación de la altura de la capa es respaldado por un estudio geotécnico. Sin embargo, no se evalúa la reducción de la cinética de recuperación.

Según López (2012), afirma que, “Para minerales de mejor calidad desde el punto de vista metalúrgico, se pueden seleccionar alturas sobre 6 m. normalmente la altura de los niveles para estas pilas varía entre 2,5 m y 10,0 m.” (p. 72)

Para el diseño de pad de lixiviación se requiere evaluar el periodo del primer ciclo de lixiviación, el flujo de apilamiento y la altura de apilamiento, para estimar los tiempos de armado de zonas, riego por goteo, riego por aspersión, periodo de percolación, desarmado de zonas, conformación y ripeo de zonas para poder encimar la siguiente capa de apilamiento.

A medida que crecen los pads de lixiviación, el área disponible de apilamiento se reduce, mientras que la planta de chancado y aglomeración mantiene su producción constante, lo que implica una reducción en los periodos de tiempo disponible para el armado, riego, lavado y percolación necesaria para encimar la siguiente capa, lo que conlleva tomar una decisión que es reducir el periodo del primer ciclo de lixiviación o aumentar la altura de apilamiento y la acción operativa más común para mitigar el avance rápido del apilamiento es aumentar la altura de la capa.

La altura optima de la capa afecta directamente la eficiencia y la cinética de lixiviación, pilas más altas generan zonas secas, donde la solución no accede, disminuyendo la recuperación final del ciclo de lixiviación.

En la operación de lixiviación se planifica el arranque de riego de nuevas zonas a través de un programa de producción para mantener una concentración de Cu en la Solución de Lixiviación Cargada (PLS) estable, para evitar inconvenientes en la etapa de Extracción por Solventes (SX) por requerimiento de extractante disuelto en el orgánico, a medida que aumenta la concentración de Cu en el PLS se requiere mayor concentración de extractante en el orgánico, si se reduce la concentración de Cu con una alta concentración de extractante, se reducirá la eficiencia de extracción debido a la reducción de selectividad del orgánico (Transferencia de Cu / Transferencia de Fe), el extractante trasfiere selectivamente el cobre al orgánico, si se reduce la concentración de Cu en el PLS, aumentara la transferencia de trazas de Fe.

Variar la altura de la capa provoca cambios en la cinética de lixiviación, generando un desbalance en la concentración de Cu del PLS proyectado y reduciendo la eficiencia de extracción en SX.

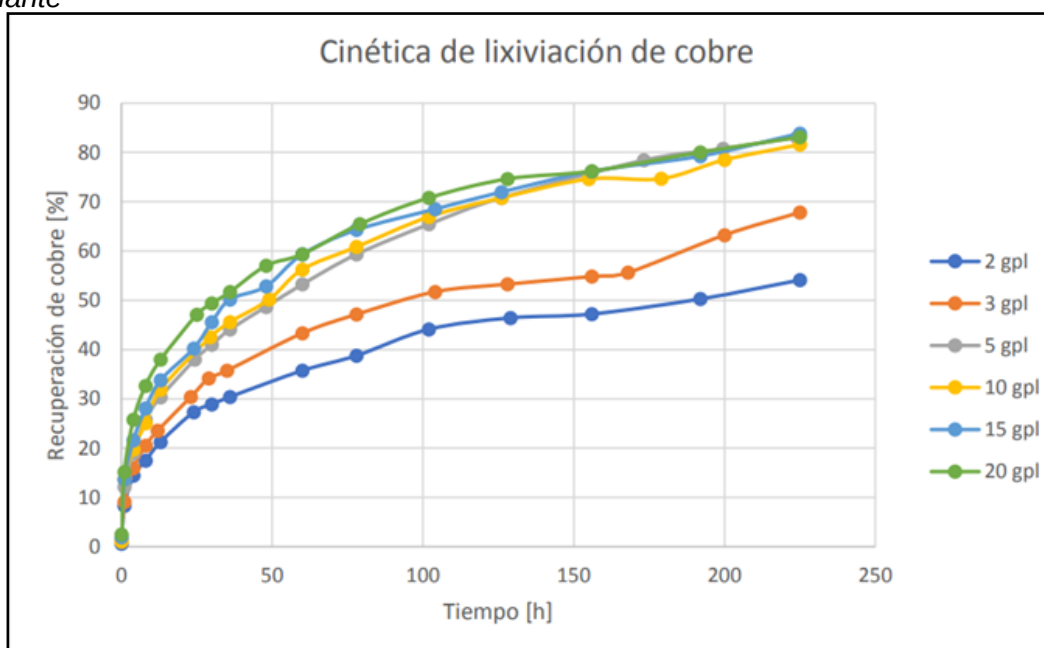
Según López (2012), “el tiempo de lixiviación dependerá fuertemente de las siguientes variables: granulometría del mineral; altura de apilamiento; tasa de riego; ácido en la aglomeración; permeabilidad de la pila; y concentración de ácido en las soluciones de lixiviación.” (p. 73)

La solución lixivante atraviesa el lecho de la pila y el ácido del lixivante se va consumiendo a medida que lo atraviesa, por tanto, el lixivante contendrá menos ácido en los niveles inferiores de la capa, la reducción de la concentración de ácido en el lixivante lo que produce una reducción en la cinética de lixiviación.

La concentración de ácido del lixivante está relacionada directamente con la cinética de recuperación del cobre hasta una concentración optima de ácido, posterior a eso el ácido principalmente lixiviara ganga.

Figura 1

Cinética de lixiviación de cobre para diferentes concentraciones de ácido en la solución lixivante



Nota: Evaluación experimental de la lixiviabilidad de roca mineralizada mediante técnicas de lixiviación in situ. Valdés (2018).

En la Figura 1 se evidencia que cuando se reduce la concentración de ácido sulfúrico en el lixivante la cinética de recuperación se reduce y cuando aumenta la concentración de ácido sulfúrico, la recuperación aumenta hasta cierto punto, el exceso de consumo de ácido es para disolver los demás contaminantes.

El corte de ácido es la diferencia entre la concentración de ácido en la solución lixivante y la concentración de ácido en solución de PLS, está directamente relacionado con la altura de la capa, un corte de ácido alto producirá un PLS con ácido bajo, en consecuencia, genera un aumento del pH de la solución, lo que aumentará la probabilidad de precipitación del Cu, reduciendo la recuperación de Cu.

A mayor altura de la capa de lixiviación requerirá mayor corte de ácido por tanto el lixivante debe tener más ácido, este aumento del ácido implicará una mayor disolución de la ganga, generando un mayor consumo de ácido y presencia de metales disueltos no deseados.

Problema general:

¿Cómo afecta el aumento en la altura de la capa de apilamiento de mineral en la recuperación de cobre al final del ciclo de lixiviación, considerando la formación de zonas secas y la reducción de la concentración de ácido en el lixivante conforme la solución penetra a mayores profundidades?

1.3 Objetivo del estudio

Evaluar la cinética de lixiviación a diferentes profundidades de una capa de apilamiento para determinar la recuperación de cobre

1.4 Hipótesis

La evaluación de la cinética de lixiviación de capas de mayor altura, generara una reducción en la recuperación de cobre

Variable independiente

Cinética de lixiviación a diferentes profundidades de capa de apilamiento.

Variable dependiente

Recuperación de cobre de un mineral aglomerado.

1.5 Antecedentes investigativos

1.5.1 Antecedentes internacionales

Ávila, C. (2024) en la tesis doctoral titulada "Caracterización, Distribución y Potencial de Recuperación de Minerales de Cobre de la Zona de Mixtos y de Enriquecimiento Secundario, División Gabriela Mistral, CODELCO, Chile", la investigación tuvo como finalidad proporcionar un análisis detallado sobre los desafíos y oportunidades en la recuperación de cobre en la División Gabriela Mistral de CODELCO, que actualmente procesa óxidos de baja ley mediante lixiviación ácida.

Se realizó la caracterización mineralógica a través de la microscopía óptica para la identificación de minerales y un análisis cuantitativo de los minerales identificados a través del microscopio electrónico de barrido, adicionalmente se realizó la estimación del potencial de recuperación a través del análisis de cobre soluble en diferentes tiempos de lixiviación.

El resultado de la investigación evidenció que en la zona de enriquecimiento secundario predominan minerales como la calcosina, mientras que la covelina, calcopirita y bornita no se disuelven en la lixiviación ácida, mientras la zona de mixtos presenta tres subpoblaciones controladas por parámetros estructurales asimismo se evidenció procesos de conversión de calcopirita por covelina y calcosina debido al enriquecimiento secundario, así como presencia de sericita y arcillas por efecto de la alteración.

En la zona de mixtos, el potencial de recuperación está asociado a la fracción oxidada y la presencia de calcosina. En la zona de enriquecimiento, la calcosina es el principal mineral recuperable, mientras que otros minerales como la covelina no se disuelve fácilmente con la lixiviación ácida.

Miño, N. (2021) en la tesis de pregrado titulada "Uso de aglomerantes en la lixiviación de Ripios" Este trabajo muestra una investigación de estudio bibliográfico, donde se revisó los aglomerantes y técnicas de aglomeración para llevar a cabo la lixiviación de ripios.

De la revisión realizada se determinó que los mejores resultados se obtuvieron cuando se usó aglomerantes entre ellos el estuco, poliacrilamida y metacaolin, sin embargo, cuando no se aglomera el material los resultados fueron imprevisibles.

A partir de los resultados de las pruebas, la permeabilidad y la recuperación de cobre incrementa con la aglomeración, para el estuco y la poliacrilamida incrementa la permeabilidad, sin embargo, con el metacaolin aumenta hasta cierto punto de ahí se reduce.

Valenzuela, N. (2020) en la tesis doctoral titulada "Caracterización y Modelamiento de Arcillas y su Impacto en el Proceso Hidrometalúrgico de Mina San Antonio Óxidos, Región de Atacama, Chile", Este trabajo ofrece una comprensión detallada de los desafíos que presentan las arcillas en las etapas de procesamiento, destacando su influencia en el consumo de reactivos y la recuperación de cobre.

Evaluar el efecto de presencia de minerales de arcillas en la cinética de lixiviación, a través de la identificación mineralógica de las arcillas y su porcentaje presente en la muestra, así mismo el impacto en el consumo de ácido por arcillas y se realizó un modelo tridimensional de la alteración argílica basado en datos sondeos, pozos y bancos mineros.

El resultado de la investigación evidencio un incremento en el consumo de ácido por la presencia de minerales de arcilla y crisocola, se evidencio que un porcentaje elevado de arcillas en el mineral lixiviado genero una reducción en la recuperación de cobre de hasta un 15 %, la presencia de arcillas afecto a los subprocesos de lixiviación como el chancado, aglomeración, curado y lixiviación.

El desarrollo de un modelo geológico facilito el entendimiento de la distribución de arcillas mejorando la planificación minera en la extracción y la disposición de mineral para evitar los efectos negativo del alto porcentaje de arcillas en la lixiviación.

Quispe, L. (2023), en la tesis de pregrado "Modelamiento matemático en función de los valores de Cobre secuencial en Lixiviación de Columnas", realizaron una revisión de varios modelos matemáticos. Su estudio resalta la importancia en la lixiviación de

yacimientos, donde el control de los costos operativos es crucial. Por ello, el modelamiento matemático es una herramienta importante para predecir la recuperación.

El análisis efectuado distingue dos tendencias principales en la modelación de la lixiviación: modelos empíricos y modelos deterministas. Los modelos empíricos, requieren grandes volúmenes de datos históricos y equipos especializados para monitorear variables. Por otro lado, los modelos deterministas se calculan a partir de los factores fisicoquímicos que gobiernan el proceso, lo que permite establecer ecuaciones más generalizadas y aplicables.

Destaca dos modelos cinéticos: el modelo de núcleo sin reaccionar (SCM, por sus siglas en inglés) y el modelo de conversión progresiva (MCP), se han propuesto modelos matemáticos más complejos como los modelos exponenciales inversos, y aquellos basados en regresión múltiple (lineales y no lineales).

La presente tesis evaluó el comportamiento cinético de un mineral oxidado de cobre, empleando un modelo matemático validado estadísticamente que incorpora los valores del análisis de cobre secuencial, obteniéndose una herramienta efectiva.

Torres, D. (2021) en la tesis doctoral titulada “Extracción de Cobre y Manganese mediante Procesos de lixiviación” Este trabajo ofrece evaluar la viabilidad de lixiviación de minerales no convencionales (módulos de manganeso y cobres negros con sulfuros de cobre) optimizando la recuperación de cobre.

El uso de salmuera y módulos de manganeso son importantes en la disolución de calcosita a corto plazo, alcanzando una recuperación de 71% en 48 horas con concentraciones de MnO_2 equivalentes a la mitad de la de mineral y acidez 0.5 mol/l de H_2SO_4 .

La lixiviación de óxidos de cobre negro genera la disolución de MnO_2 , el incremento de concentraciones de NaCl, permite una mayor disolución de Mn pero no de Cu, la disolución preliminar de MnO_2 , incrementa la recuperación.

1.5.1 Antecedentes nacionales

Guillen, J. (2022) en la tesis de pregrado titulada "Cinética de lixiviación de mineral oxidado de cobre en bateas; para la obtención de sulfato de cobre con mineral oxidado de unidad minera Chaspaya", la finalidad de la investigación fue evaluar la cinética de consumo de ácido durante la lixiviación de minerales de cobre por el método de lixiviación en bateas, se analizaron los efectos de la granulometría y la acidez sobre la recuperación de cobre, aspectos importantes para el mejoramiento de la lixiviación de minerales oxidados.

Se realizaron pruebas experimentales a pequeña escala para replicar condiciones industriales, a través de reactores que simulan bateas, se desarrollaron pruebas a diferentes granulometrías (1/4", 1/2", 3/4"), para evaluar el consumo de ácido la cinética de recuperación a diferentes periodos de tiempo.

El resultado de la investigación evidencio que la lixiviación de minerales con granulometría más fina acelera el consumo de ácido sulfúrico y mejora la recuperación de cobre, para mejorar el proceso de lixiviación es necesario optimizar la granulometría del mineral

Jarandilla, J. (2024) en la tesis de grado, titulada "Influencia de la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación de la bornita en presencia de compuestos de hierro", tuvo como fin evaluar la influencia de la concentración de ácido sulfúrico y la aplicación de un compuesto oxidante llamado sulfato férrico en el proceso de lixiviación del mineral bornita para evaluar su comportamiento.

Se realizo un diseño experimental de dos variables para evaluar la recuperación a diferentes periodos de tiempo a través de pruebas por agitación, la primera variable fue la concentración de ácido sulfúrico que su rango fue de 10%, 15% y 20%, y la concentración del sulfato férrico que su rango fue de 2%, 4%, 6%, 8% y 10%.

El resultado del estudio evidencio que la cinética de lixiviación de la bornita es lenta cuando en el lixivante no hay presencia de un agente oxidante, sin embargo, la adición del sulfato férrico mejoro significativamente la recuperación de cobre, adicionalmente la

sinergia que existe en la solución lixiviante entre la concentración de ácido sulfúrico y la concentración de sulfato férrico, el aumento de la concentración de ambas aceleró la recuperación de cobre para minerales de bornita.

Zanabria, E. (2021) en la tesis de maestría titulada “Evaluación de variables en el proceso de lixiviación de cobre en pilas para mejorar su extracción – Cuajone”, la investigación tuvo como fin la evaluación de variables críticas del proceso de lixiviación en pilas en la mina Cuajone, con el propósito de mejorar la extracción de cobre.

Se evaluó diferentes variables que afectan en la recuperación de cobre en las pilas de lixiviación entre ellas el consumo de ácido, la tasa de riego y la distribución granulométrica, con el objetivo de mejorar la recuperación de cobre.

Se realizó un estudio experimental para cuantificar el impacto de las variables en la recuperación de cobre para ello se evaluó diferentes aspectos como, el consumo de reactivos como el ácido sulfúrico en la etapa de curado del mineral durante la aglomeración y en la etapa de lixiviación del mineral, análisis de la cinética de lixiviación a diferentes condiciones de operación, la tasa de riego y su influencia en la recuperación.

El resultado de la investigación evidenció que un incremento de la tasa de riego mejoró la recuperación de cobre y la compactación de las pilas generó un impacto significativo en la permeabilidad y la recuperación de cobre., del mismo modo se evidenció el alto consumo de ácido requerido para lixiviar minerales oxidados de cobre y cinéticas de lixiviación rápidas que alcanzaron recuperaciones elevadas.

Vera, S. (2021) en la tesis de pregrado titulada “Evaluación metalúrgica de Lixiviación de Minerales Oxidados de Cobre de la Minera Eduvino 2” la investigación tuvo como fin evaluar factores como pH y tiempo de lixiviación en la recuperación de cobre.

La metodología de investigación implementada para evaluar variables en la lixiviación por agitación inicia con la preparación, distribución granulométrica y características del mineral, para evaluar las recuperaciones de cobre a diferentes pH y diferentes tiempos de lixiviación.

El resultado de la investigación proporciona una base sólida para mejorar los procesos de recuperación a través de un ajuste de parámetros de operación para alcanzar mejores recuperaciones de cobre.

Berdejo, F. (2023) en la tesis de pregrado titulado “Estudio comparativo de la lixiviación de óxidos de cobre utilizando medios ácidos y medios alcalinos”, la investigación tuvo como fin evaluar el desempeño de medios ácidos y alcalinos en la lixiviación de óxidos de cobre, comparando su recuperación de cobre, viabilidad operativa y aplicabilidad.

La tasa de consumo de ácido cuya función es disolver el cobre y disolver la ganga, el aumento de la concentración de ácido en el lixivante genera mayor consumo, por ello los estudios cinéticos de recuperación son importantes para variar la concentración de ácido de acuerdo al requerimiento, generando una reducción en el consumo de ácido.

La lixiviación en medio alcalino (reactivo Jinchan), generaron mejores recuperaciones de cobre, aún falta regular sus parámetros operativos para su correcto funcionamiento.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 *Procesos unitarios*

Guiachetti, D. (2011) enlista los procesos unitarios, que son las etapas requeridas para el acondicionamiento del mineral, teniendo el tamaño optimo, la adecuada humedad y acido durante la aglomeración, es requerida para su posterior etapa de lixiviación de minerales

Chancado

Realizar el proceso de chancado depende de la ley del mineral de cobre, si la ley es alta, es viable realizar un proceso de chancado, si la ley es baja, conviene apilar mineral ROM.

La decisión de realizar una pila de mineral chancado o ROM se evalúa económicamente, ya que reducir la granulometría maximiza la extracción de cobre

El chancado consiste en un proceso de fragmentación del mineral y se realiza, en general, en varias etapas: chancado primario, secundario, y en algunos casos terciario, con el objeto de obtener un material mineralizado de un tamaño máximo entre $\frac{3}{4}$ " y 1". Este tamaño es suficiente para dejar expuesta la superficie de las partículas de mineral a la infiltración de la solución ácida. Es importante notar que, desde el punto de vista hidrometalúrgico, la reducción de tamaño es favorable, ya que aumenta la superficie expuesta del mineral aumentando la recuperación de cobre, no obstante, disminuye la permeabilidad del mineral, afectando el drenaje de la pila y la recuperación de las soluciones.

Aglomeración

El proceso de aglomeración consiste en la formación de glómeros, mesclando mineral con Raff y ácido sulfúrico, de tal manera que las partículas finas se adhieran a las partículas gruesas, formando lo que se conoce como glómeros. La humedad y ratio Kg Acido / TM de mineral, son factores que influyen en conseguir un proceso óptimo. El Raff

adicionada en el proceso de aglomeración provee una cohesión aparente, que no tiene una gran consistencia mecánica.

La cantidad de agua que se debe agregar depende fuertemente de las características del mineral: contenido de finos, plasticidad de los finos, tamaño máximo de partículas, etc.

Lixiviación

La lixiviación de pilas es un proceso Hidrometalúrgico de extracción de metales, una vez culminado las etapas de chancado, aglomerado y curado, los glómeros son transportados a través de fajas transportadoras para evitar el transporte por camiones por el peso que reduce la percolación

Una vez apilado el mineral aglomerado, se instala el sistema de riego, se inicia el riego de pila a una tasa de riego y con una concentración de ácido óptimo.

Finalizado el ciclo de riego, se desinstala el sistema de riego para esperar el periodo de percolación y posterior a eso realizar la conformación y ripeo del mineral para encimar la siguiente capa de apilamiento.

Al inicio del ciclo de lixiviación la solución PLS presenta altas concentraciones de cobre que se dirigen al Pond donde la concentración de Cu es ponderada con la solución remanente del Pond, la solución de PLS se dirige a la planta SX donde se extrae el cobre selectivamente y retorna solución Raff, esta debe ser acondicionada reponiendo el agua evaporada y el ácido consumido para continuar el ciclo de lixiviación.

2.1.2 Métodos de lixiviación

Loredo, J. (2008) detalla los tipos de lixiviación

Tipos de Lixiviación:

La lixiviación de minerales tiene varios métodos de disposición del mineral que se caracterizan por los procesos unitarios asociados y la disposición a implementarse depende de las leyes del mineral por la viabilidad económica del proceso, los diferentes tipos de lixiviación son los siguientes:

- **Lixiviación in Situ**

Se caracteriza por el riego de soluciones directamente sobre el mineral sin realizar algún proceso de extracción de mineral, para la aplicación de este método se requiere realizar estudios geológicos, hidrológicos y metalúrgicos.

El método de lixiviación in situ está dirigida a yacimientos de muy baja ley menores a 0.5%, la cinética de lixiviación de este método es muy lenta en consecuencia los periodos de lixiviación son mayores a 10 años para obtener recuperaciones mayores a 40%.

- **Lixiviación en botaderos o por lotes (Dump Leaching)**

Se caracteriza por la disposición de mineral sobre geomembrana, donde el mineral es extraído de mina sin procesamiento (ROM= run of mine), el mineral es proveniente de tajos abiertos y ubicados cerca al tajo.

El método de lixiviación en botaderos está dirigida a minerales de baja ley, la cinética de lixiviación de este método es lenta en consecuencia los periodos de lixiviación son mayores a un año para obtener recuperaciones mayores en el orden de 40 a 60%

- **Lixiviación en pilas (Heap Leaching)**

Se caracteriza por que el mineral es sometido a varios subprocesos como chancado, aglomeración y curado antes de su disposición de los glómeros formando capas de lixiviación.

El método de lixiviación en pilas está dirigido a minerales con leyes superiores a los 0.4%, la cinética de recuperación es relativamente más rápida y alcanza a recuperaciones por encima al 70% en meses.

- **Lixiviación en pilas inundadas o en bateas (Vat Leaching)**

Se caracteriza se realiza en estanques o bateas, requiere un mayor nivel de inversión y requiere una operación más compleja

La lixiviación en bateas está dirigido a minerales de leyes alta, la cinética de lixiviación es más rápida y alcanza recuperaciones por encima de 70% en semanas.

- **Lixiviación por agitación**

Se caracteriza por que el mineral tiene que pasar por el subproceso de moliendo para formar una pulpa, manteniendo las partículas en suspensión durante la agitación.

La lixiviación por agitación está dirigido a minerales de leyes muy altas a través dos métodos de agitación, mecánica a través de hélices, paletas o turbinas y neumáticas por air lift o sistemas Pachuca (reactores).

En la lixiviación por agitación se alcanza a recuperaciones por encima del 80% en horas de agitación.

2.1.3 Variables del proceso de lixiviación

López, E. (2012), detalla las variables del proceso de lixiviación como granulometría, altura de la pila, tasa de riego, concentración de ácido y tiempo de lixiviación. (p10)

- **Granulometría**

La recuperación de cobre aumenta mientras más fino sea el mineral, el tamaño optimo está limitado por la permeabilidad del mineral.

- **Altura de la pila**

Cuando la altura de la capa es menor aumenta la cinética de lixiviación, pero aumenta los costos por apilamientos e irrigación, si la altura de la capa es mayor se reduce la aireación produciendo la reducción de recuperación.

- **Tasa de riego**

Depende de la capacidad de percolación del mineral apilado, la tasa de riego optima depende del ciclo de lixiviación, al inicio del ciclo de la lixiviación una mayor tasa permite aumentar la cinética de lixiviación, al término del ciclo, una tasa de riego alto solo diluirá la concentración de Cu y aumentará los costos por bombeo.

- **Concentración de ácido**

Depende de la ley y la mineralogía del mineral, la concentración de ácido optima, es la requerida para lixiviar el cobre presente disolviendo mínimamente la ganga, si

la concentración de ácido supera a la óptima, disolverá principalmente la ganga, si la concentración de ácido es menor a la óptima, la cinética de lixiviación se reducirá.

- **Tiempo de lixiviación**

Existe una relación inversa entre el tiempo de lixiviación y el tamaño de las partículas, la cinética de lixiviación va a determinar el tiempo de lixiviación optima en la pila, para mantener una operación económicamente rentable.

2.1.4 Cinética de disolución de óxidos de cobre

Guiachetti, D. (2011) detalla la cinética de disolución de óxidos, especie de mayor proporción del mineral evaluado en el siguiente trabajo, a través de la determinación de las velocidades y mecanismos de disolución o extracción de los metales de interés económico.

El estudio de la cinética entrega información vital desde el punto de vista práctico y conceptual, ya que por un lado, los estudios cinéticos proporcionan datos de ingeniería valiosos para el diseño y la evaluación de proyectos mineros, por el otro, permiten determinar las condiciones de operación y los mecanismos y etapas limitantes involucradas, además de predecir la velocidad de extracción del cobres en diversas condiciones de temperatura, concentración de agentes lixivante y oxidantes, etc.

Como es sabido, los minerales de cobre oxidados se lixivian rápidamente en ácido cuando son comparados con otros minerales de cobre, mientras que los sulfuros secundarios requieren de oxidación y se lixivian lentamente. No obstante, los sulfuros secundarios de cobre se oxidan y disuelven más rápidamente que la calcopirita, razón por la cual son a veces llamados “sulfuros lixiviables”.

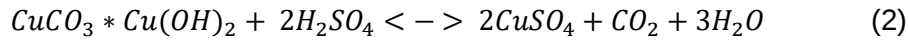
La química que involucra la disolución de los minerales de cobre es esencialmente una simple descomposición en el caso de los minerales oxidados, y una reacción de óxido-reducción para el caso de los minerales sulfurados, en donde los productos de las reacciones son solubles en agua. Lo mismo sucede en los variados óxidos, silicatos, carbonatos y sulfatos en la ganga que se someten en reacciones similares para formar sales solubles.

El autor indicado sostiene que la reacción general que describe la lixiviación es:

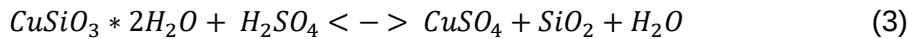


Algunos ejemplos específicos de óxidos de cobre, sulfuros y especies de la ganga

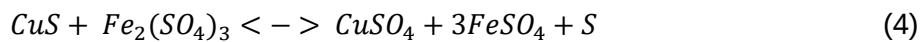
Malaquita:



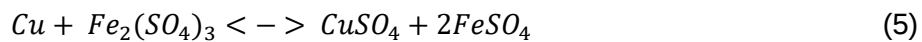
Crisocola:



Calcosina:



El cobre elemental residual debe ser disuelto con la ayuda de una especie oxidante, como el sulfato férrico:



2.1.5 Influencia de ganga

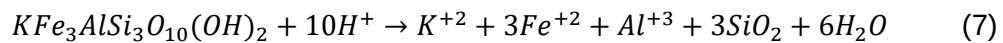
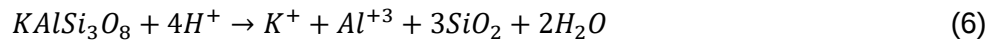
Suero, P. (2018) detalla la influencia de la ganga, factor importante para determinar el consumo de ácido requerido y cinética de disolución de cada punto muestreo.

La ganga de los minerales de yacimientos porfíricos de cobre más de 95% están constituidos por especies silicatadas; en consecuencia, su comportamiento en soluciones ácidas altera los resultados del proceso de lixiviación. La influencia de la ganga sobre el proceso de lixiviación de minerales de cobre puede manifestarse principalmente en el grado de consumo de ácido, cinética de disolución, y del grado de penetración de las partículas.

A medida que la ganga se toma más alterada aumenta su reactividad al ácido y puede seguir subiendo y de acuerdo a su reactividad, se tiene:

Ganga altamente reactiva, contiene minerales carbonatadas, calcita, dolomita y siderita, que reaccionan rápidamente con ácido, liberando un catión, agua y gas CO₂

Ganga moderadamente reactiva, conformada principalmente por ortoclasa, biotita, albita y cuarzo, minerales que se disuelven por hidrólisis.



Ganga no reactiva, las areniscas son casi inertes a las soluciones de lixiviación y la cinética de disolución del cobre tiende a ser perfecta.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Muestra

Fracción representativa de mineral que se obtiene mediante técnicas de muestreo adecuadas.

2.2.2 Ganga

Minerales o materiales no deseados en una muestra y que no tienen valor económico.

2.2.3 Composito

Muestra conformada por la combinación de dos o más muestras de mineral.

2.2.4 Recuperación

Porcentaje de cobre extraído del cobre total de una muestra durante un proceso hidrometalúrgico.

2.2.5 Pad

Es una superficie impermeable donde se apila el mineral, construida de geomembranas con un sistema de drenaje para recolectar solución enriquecida.

2.2.6 Pila

Es mineral apilado sobre el pad, formando capas con alturas determinadas y retiros.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

3.1 Recolección de datos

3.1.1 Descripción de la muestra mineral

El mineral empleado para la investigación fue extraído de un yacimiento de pórfido de óxidos de cobre proveniente de una pequeña unidad de producción en las alturas de Arequipa.

La recolección de datos se realizó a través del desarrollo de una prueba experimental, para la construcción de un módulo experimental, el mineral fue aglomerado y apilado en una pila de siete metros, donde se realizó el muestreo del mineral por cada metro de profundidad y a diferentes periodos de tiempo, para el cálculo de la cinética de recuperación a diferentes profundidades

3.1.2 Parámetros de operación

La solución lixivante que fue empleada para realizar la prueba experimental fue una solución Refino con una concentración de Cobre de 0.06 g/l y una concentración de ácido en el lixivante de 5 g/l.

En la Figura 2 se muestra el método de riego implementado en la prueba experimental que fue riego por goteo con un marco de riego de 40 cm x 20 cm, la distancia entre mangueras fue de 40 cm y la distancia entre goteros pertenecientes a la misma manguera fue de 20 cm, la tasa de riego empleada para todo el periodo de lixiviación fue de 0.13 l/min*m²

Figura 2

Riego por goteo con marco de riego de 40 cm x 20 cm.



Nota: Elaboración propia.

En la Figura 3 se muestra la estrategia de evolución de tasa de riego en el tiempo para mantener la estabilidad del glómero y reducir la migración de finos.

Figura 3

Evolución de la tasa de riego



Nota: Elaboración propia.

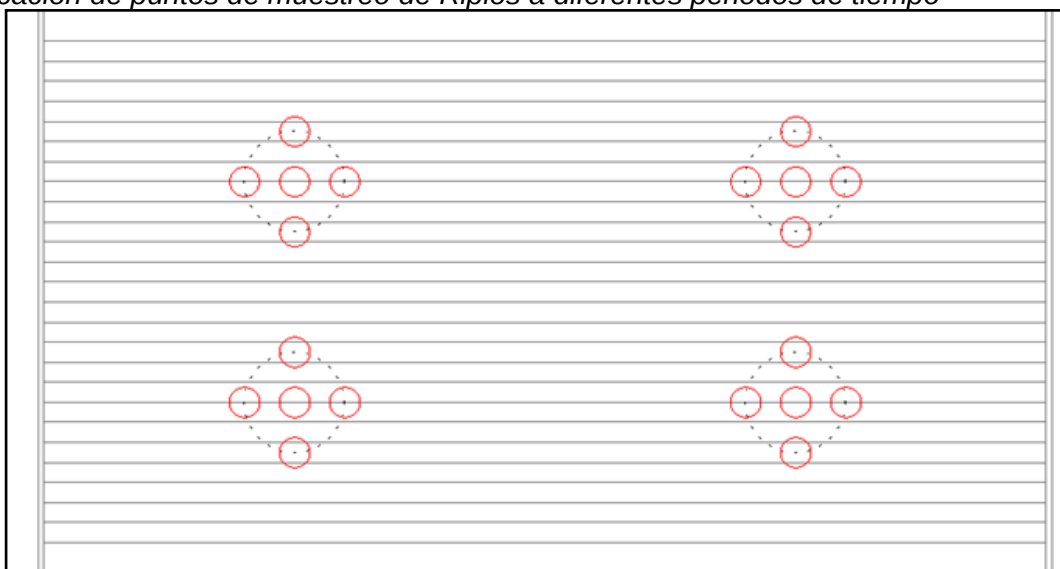
3.1.3 Ubicación de puntos de muestreo

En la Figura 4 se muestra la ubicación de cuatro puntos de muestreo, donde en cada punto fue demarcado con una rotulación que lo identifico para los muestreos posteriores, la zona de estudio de cada punto abarco un área de circulo de 1m².

Los muestreos posteriores de 30, 60, 90, 120, 140 días fueron alrededor de la ubicación del muestreo inicial para asegurar que sea la misma muestra y que los resultados obtenidos del análisis químico sean comparables.

Figura 4

Ubicación de puntos de muestreo de Ripios a diferentes periodos de tiempo



Nota: Elaboración propia.

3.1.4 Procedimiento de muestreo

El muestreo de los cuatro puntos se realizó el mismo día para que todas la muestras tengan el mismo periodo de lixiviación, el muestreo se realizó con una moto perforadora con barrenos de 3 pulgadas y de diferentes longitudes para realizar el muestreo por metro.

El muestreo se realizó progresivamente iniciando con el primer metro, obteniéndose un barreno de un metro relleno con mineral, el cual fue descargado sobre una manta, donde se homogenizo la muestra y se obtuvo una muestra de 8Kg aproximadamente que se almaceno en bolsas rotulados para su posterior análisis químico, después se realizó el mismo procedimiento para los siguientes metros de profundidad y para los otros puntos de análisis.

Figura 5

Muestreo de ripios a diferentes profundidades con moto perforadora



Nota: Elaboración propia.

En el laboratorio químico se realizó el procesamiento de muestras, se inició con la preparación mecánica que incluye chancado 100% menos malla 10, de la muestra se homogenizo y cuarteo hasta alcanzar una muestra representativa de 200 gramos, que fue pulverizado para realizar el análisis químico.

De la muestra resultante se composito una muestra de todos los metros de profundidad para realizar el análisis mineralógico, se obtuvo una muestra testigo de 6 a 7 kilos, la muestra fue rotulada y almacenada para su posterior repetición de análisis químico.

En la Figura 5 se muestra el equipo que realizo los muestreos a los 0, 30, 60 ,90,120 y 140 días, se mantuvo las mismas condiciones de riego para todo el ciclo de lixiviación, para obtener resultados a diferentes periodos de tiempo y desarrollar la cinética de recuperación.

Se realizó un formato de inspección de muestreo por cada periodo de muestreo, como se señala en los siguientes anexos: Anexo 4, Anexo 5, Anexo 6 , Anexo 7, Anexo 8 y Anexo 9, donde se registró el nombre del punto de muestreo, la rotulación de las muestras por cada metro de profundidad, el peso de la muestra y las observaciones que hubo durante el muestreo.

Se realizó un formato de registro de resultados, como se señala en el Anexo 1 y Anexo 2, donde se registrará los resultados de análisis químico de CuT de las muestras de cada punto de muestreo a diferentes profundidades por cada periodo de muestreo programado de la prueba experimental.

Se realizó un formato de registro de resultados, como se señala en la parte final en el Anexo 3, donde se registrará los resultados de la caracterización mineralógica de los minerales que aportan Cu del composito de todas las muestras a diferentes periodos de tiempo.

3.2 Procesamiento de la información

3.2.1 Caracterización de la muestra

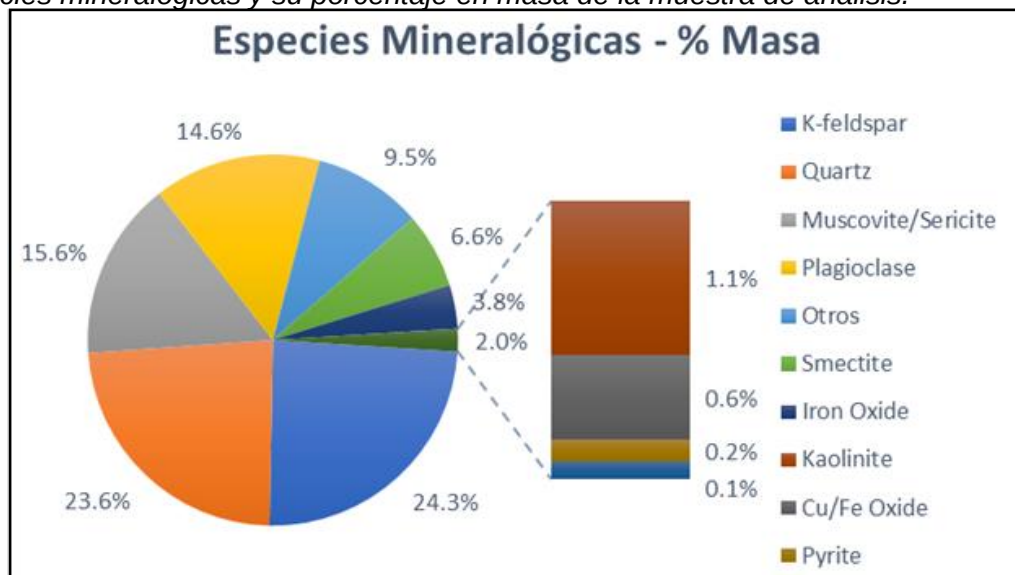
El procesamiento de resultados se realizó en hojas de cálculo (Excel) se evaluó el análisis de leyes químicas de Cobre Total y análisis mineralógico, los resultados de la caracterización del mineral de la prueba experimental se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1*Especies mineralógicas y su porcentaje en masa de la muestra de análisis*

ESPECIES MINERALÓGICAS	% MASA
K-feldspar	24.30
Quartz	23.60
Muscovite/Sericite	15.60
Plagioclase	14.60
Smectite	6.60
Iron Oxide	3.80
Kaolinite	1.10
Cu/Fe Oxide	0.60
Pyrite	0.15
Chrysocolla	0.13

Nota: Elaboración propia.

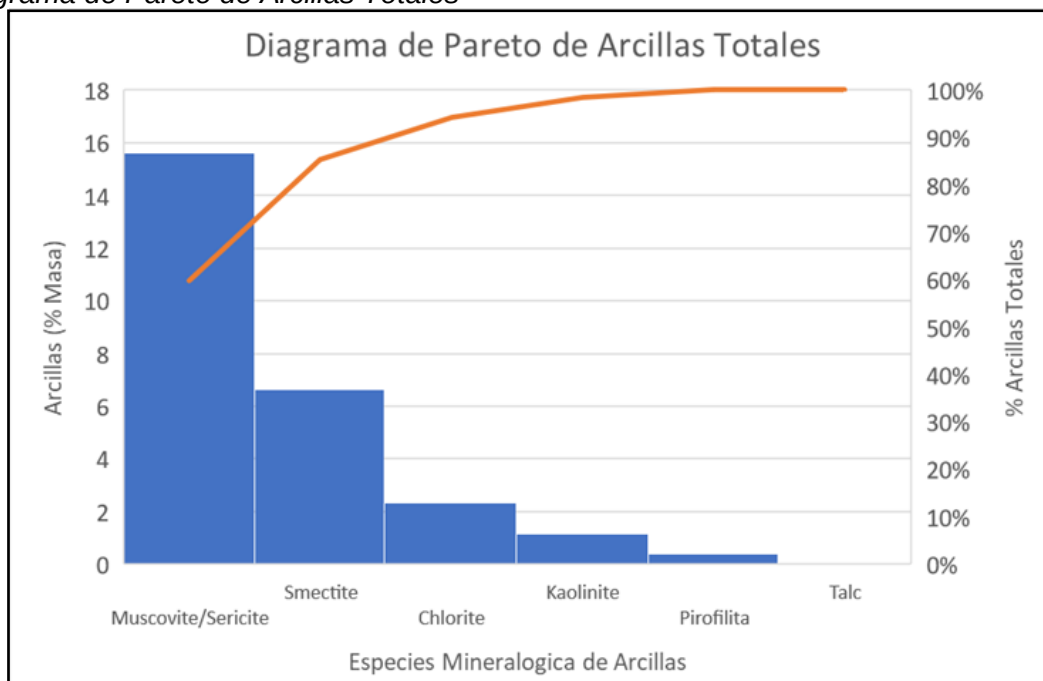
En la Figura 6 se muestra los minerales que tienen mayor porcentaje de masa para describir mineralógicamente la muestra de análisis.

Figura 6*Especies mineralógicas y su porcentaje en masa de la muestra de análisis.**Nota:* Elaboración propia.

En la Figura 7 se muestra el diagrama de Pareto del porcentajes de arcillas, entre ellas las arcillas expansibles como Smectita y Clorita, las arcillas no expansible como Caolinita, Muscovita/Sericita Pirofilita y Talco que reducen la capacidad de percolacion

Figura 7

Diagrama de Pareto de Arcillas Totales



Nota: Elaboración propia.

A partir de los resultados de la Tabla 2 se muestra que la especie mineralógica más predominante son los óxidos de Cu/Fe, con lo que se infirió que la muestra estudiada es un mineral oxidado.

Tabla 2

Especies mineralógicas que aportan cobre y su porcentaje de aporte

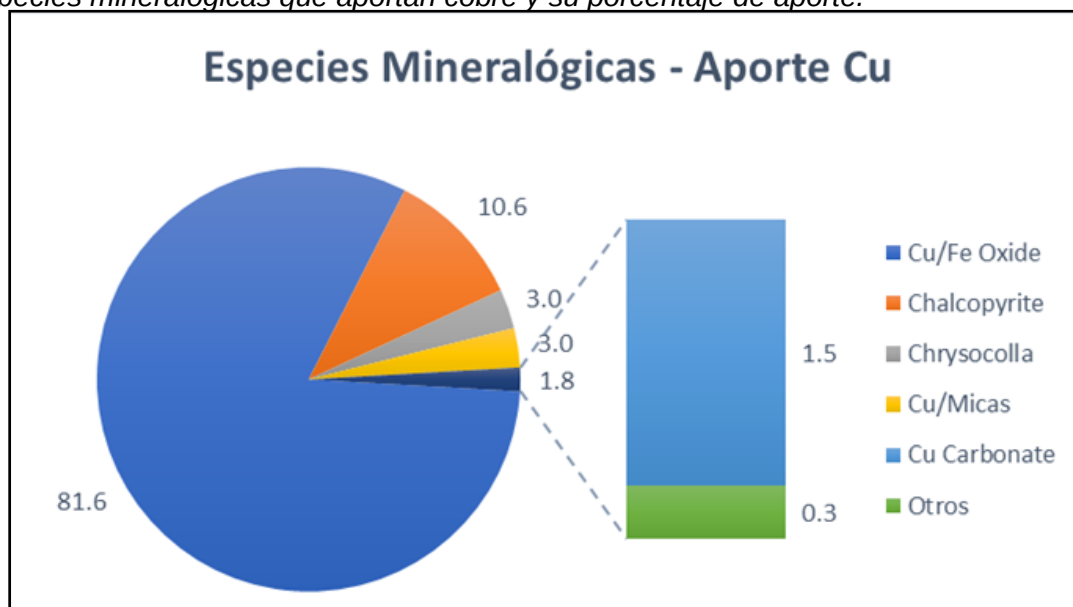
ESPECIES MINERALÓGICAS	% APORTE Cu
Cu/Fe Oxide	81.6
Chalcopryrite	10.6
Chrysocolla	3.0
Cu/Micas	3.0
Cu Carbonate	1.5

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 8 se muestra los minerales que contienen en su composición el elemento Cu y su porcentaje de aporte de Cu en el mineral empleado en la prueba experimental.

Figura 8

Especies mineralógicas que aportan cobre y su porcentaje de aporte.



Nota: Elaboración propia.

En la tabla 3 se muestra la tabla de la distribución granulométrica del mineral evaluado en el trabajo de suficiencia

Tabla 3

Distribución granulométrica de mineral

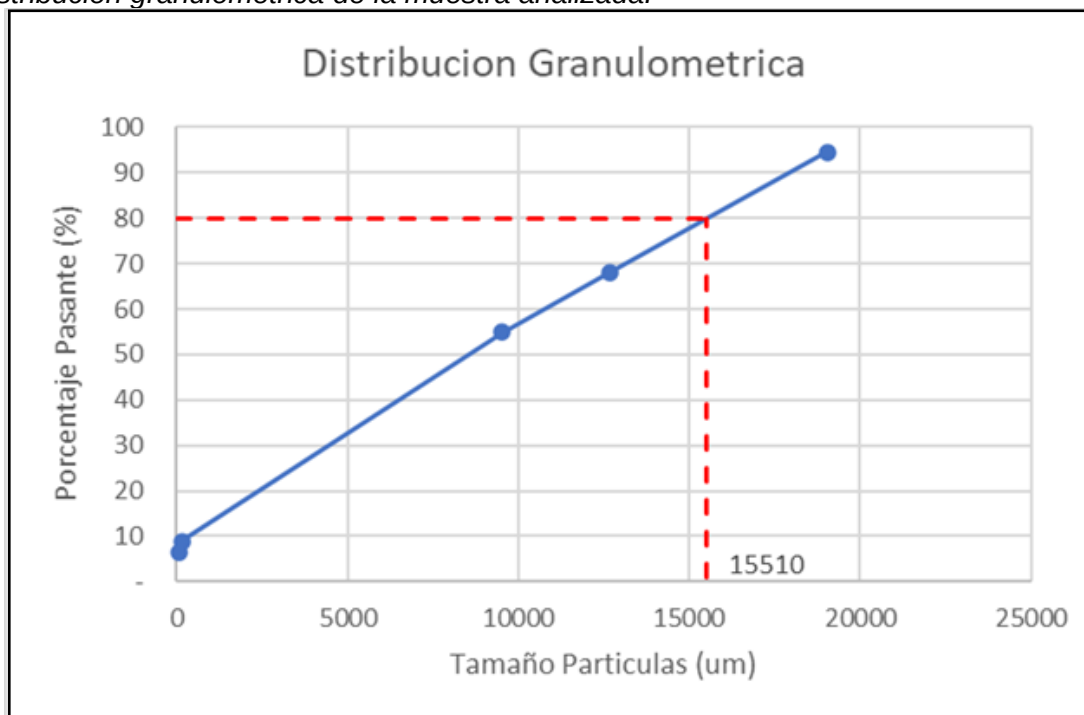
	Abertura (um)	% Peso	% Acumulado	% Pasante
+3/4"	19050	5.505	5.505	94.50
+1/2"	12700	26.44	31.95	68.05
+3/8	9525	13.12	45.07	54.93
+# 100	149	46.02	91.09	8.91
+# 200	74	2.560	93.65	6.35
-# 200		6.350	100.00	-

Nota: Elaboración propia.

En la Figura 9 se muestra la distribución granulométrica de la muestra de estudio para determinar el porcentaje de gruesos y finos como también el P80 de la muestra, que permitió completar la caracterización de la muestra.

Figura 9

Distribución granulométrica de la muestra analizada.



Nota: Elaboración propia.

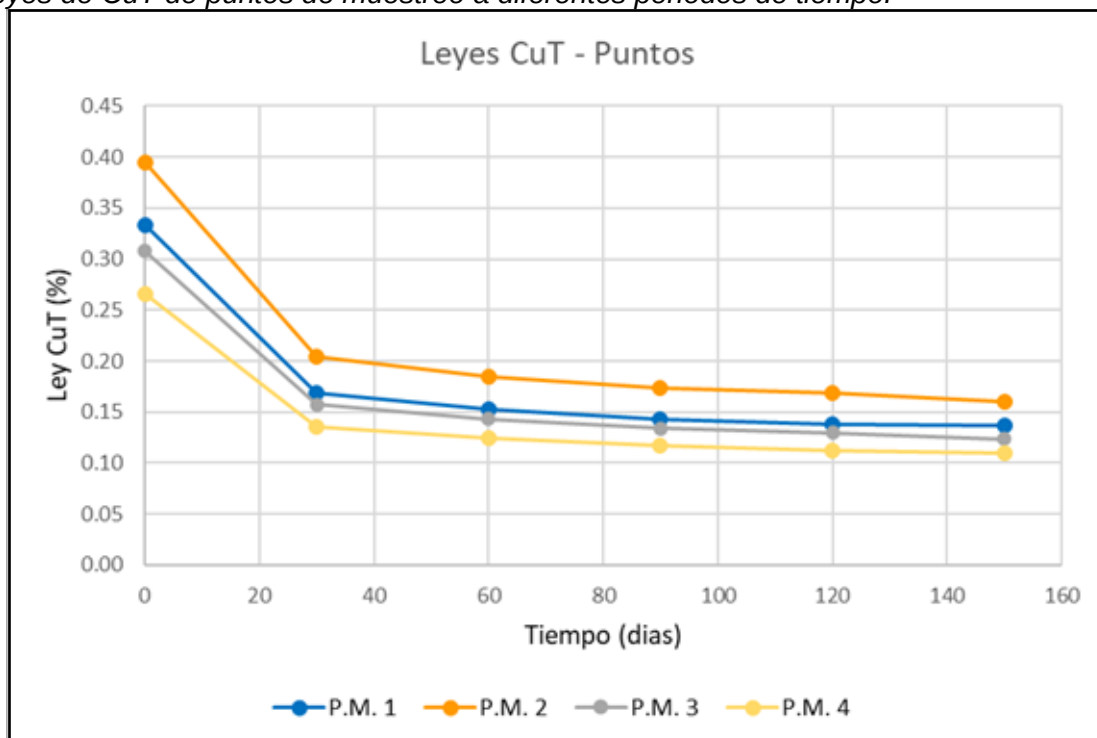
3.2.2 Evaluación de resultados de análisis químico

Para el procesamiento de datos de los análisis químicos, los datos fueron filtrados siguiendo el criterio de que el contenido de Cobre o ley en el ripio se reducirá a medida que transcurra el tiempo de lixiviación.

En la Figura 10 muestra el promedio de leyes de CuT de los diferentes puntos de muestreo que presentaron un comportamiento de reducción en el tiempo.

Figura 10

Leyes de CuT de puntos de muestreo a diferentes periodos de tiempo.



Nota: Elaboración propia.

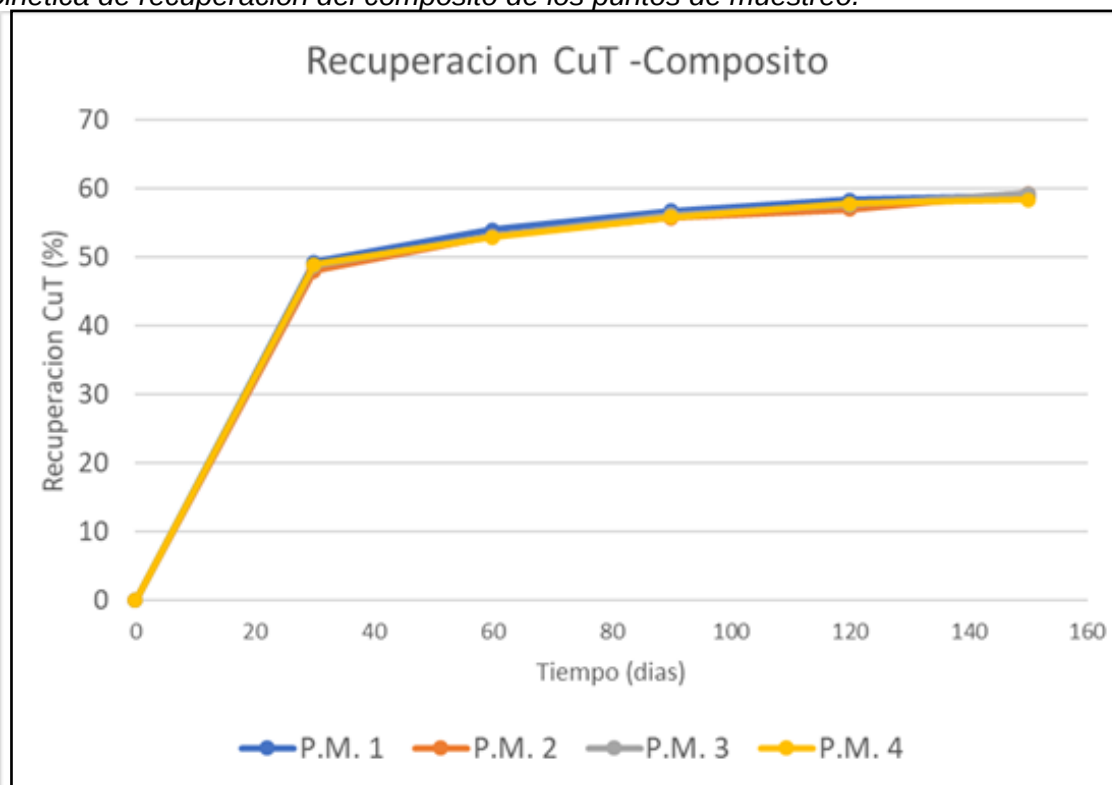
3.2.3 Cinética de recuperación por punto de muestreo

Los datos de resultados del análisis químico de Cobre fueron agrupados por punto de muestreo para evaluar la cinética de recuperación total de la capa, y asegurar que todos los puntos de muestreo sean de cinética similar.

En la Figura 11 muestra cinéticas de recuperación de cobre similares, debido a que el mineral de estudio presento mineralogías similares, lo que corroboro que la recuperación de los puntos de muestreo fue comparable.

Figura 11

Cinética de recuperación del compuesto de los puntos de muestreo.



Nota: Elaboración propia.

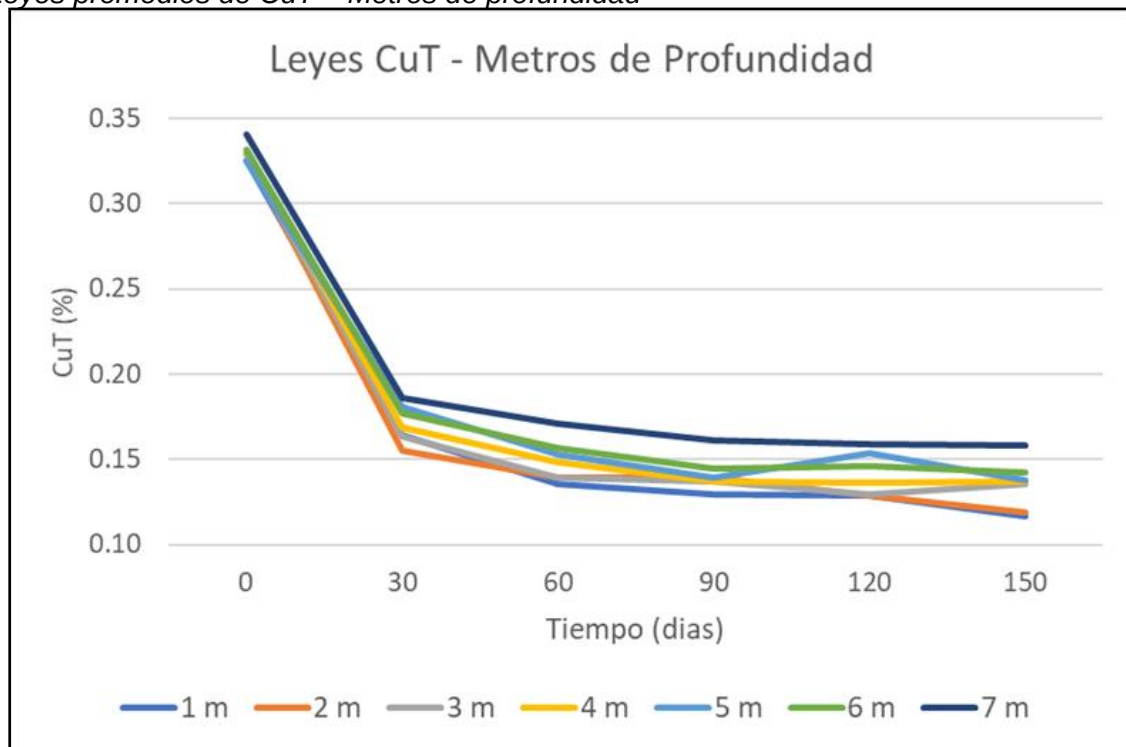
3.2.4 Cinética de recuperación por metro de profundidad

Los datos de resultados del análisis químico de Cobre fueron agrupados por metro de profundidad de muestreo y se evaluó los resultados de cinéticas de recuperación por cada metro de profundidad, donde se observó que a mayor profundidad genera menor recuperación de cobre.

En la Figura 12 se muestra las leyes promedios de CuT de los cuatro puntos de muestreo a diferentes periodos de tiempo y a diferentes profundidades, donde se analizó los datos y se observó algunos datos anómalos que deben ser anulados.

Figura 12

Leyes promedios de CuT – Metros de profundidad

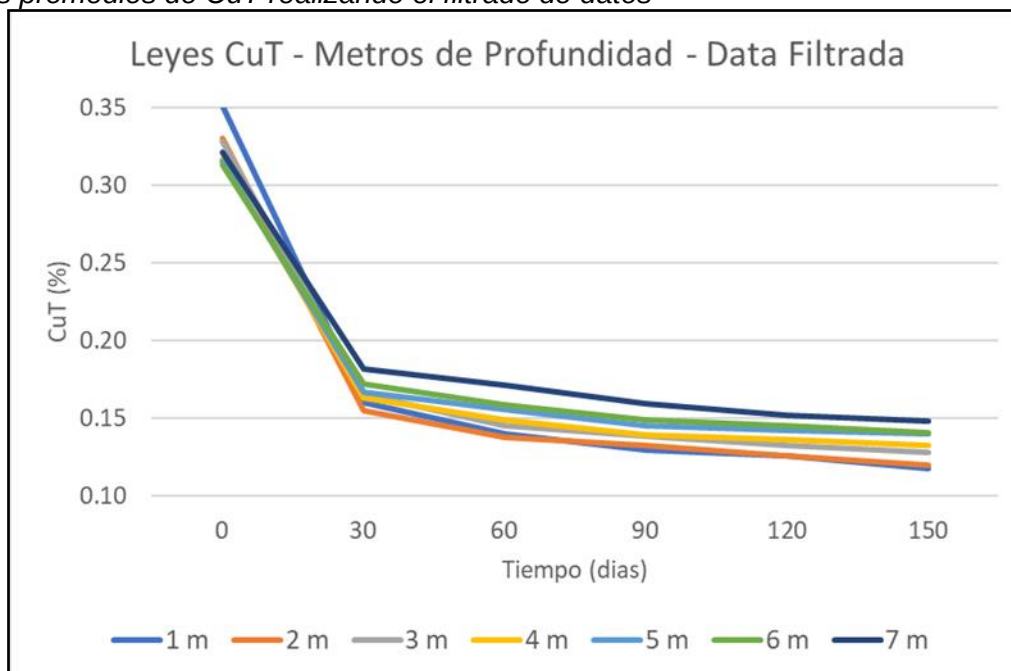


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 13 se muestra las leyes promedios de CuT realizando el filtrado de datos siguiendo el criterio que a medida que se incremente el periodo de lixiviación, la ley de cobre en el ripio se reduce, donde mejora la relación entre las leyes de CuT a diferentes tiempos y la profundidad de apilamiento.

Figura 13

Leyes promedios de CuT realizando el filtrado de datos

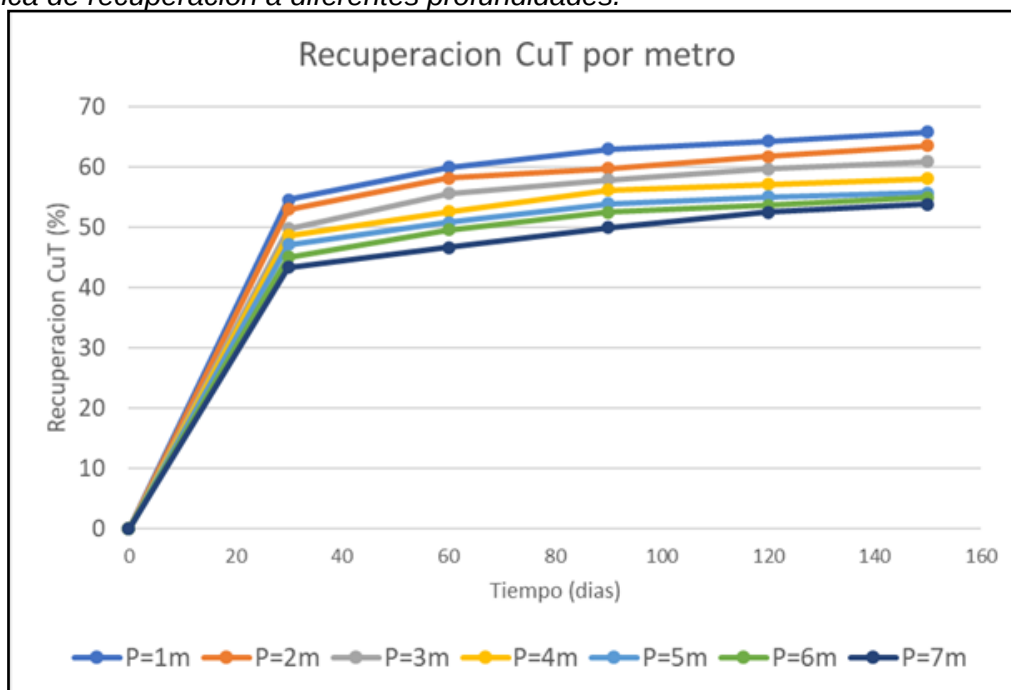


Nota: Elaboración propia.

En la figura 14 se muestra que la cinética de lixiviación se redujo en los niveles inferiores de la pila por la reducción del ácido en el lixiviante percolado debido al consumo en los niveles superiores.

Figura 14

Cinética de recuperación a diferentes profundidades.



Nota: Elaboración propia.

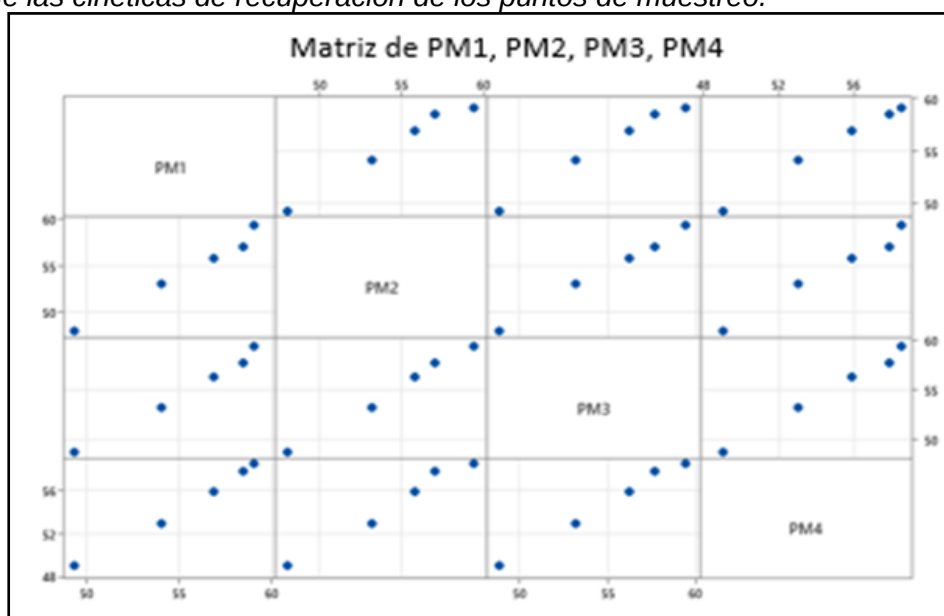
3.3 Análisis de la información

Se realizó el análisis estadístico de gráfica matriz con Minitab versión 21 para comparar las cinéticas de recuperación de los puntos de muestreo y corroborar que sean comparables, a partir de los resultados de análisis químico se determinó que los puntos de muestreo tienen leyes distintas, pero presentan cinéticas similares debido a que tienen mineralogías similares.

En la Figura 15 se muestra la correspondencia entre las cinéticas de recuperación de cobre de los puntos de muestreo.

Figura 15

Matriz de las cinéticas de recuperación de los puntos de muestreo.



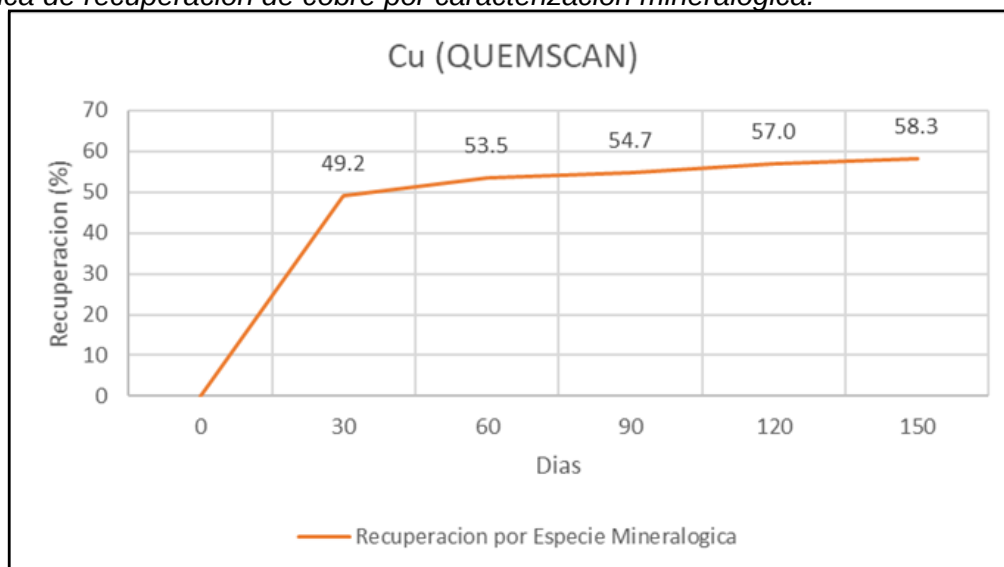
Nota: Elaboración propia.

Se realizaron los análisis mineralógicos del mineral apilado y del ripio a diferentes periodos de tiempo, para determinar cuantitativamente el porcentaje en masa y porcentaje de aporte de cobre, se evaluó la recuperación de cobre por especie mineralógica de los minerales que aportan cobre.

En la Figura 16 se muestra la cinética de Recuperación de cobre desde el análisis mineralógico

Figura 16

Cinética de recuperación de cobre por caracterización mineralógica.

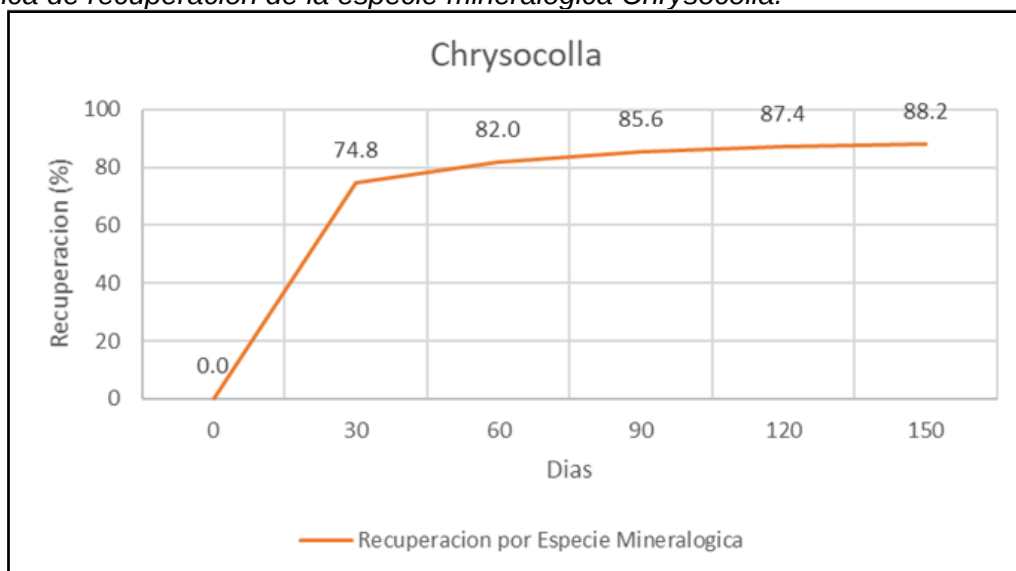


Nota: Elaboración propia.

En la figura 17 se muestra que la especie mineralógica de Crisocola presento una recuperación más alta debido a que la crisocola es un mineral oxidado, caracterizado por su rápida disolución en soluciones acidas.

Figura 17

Cinética de recuperación de la especie mineralógica Chrysocolla.

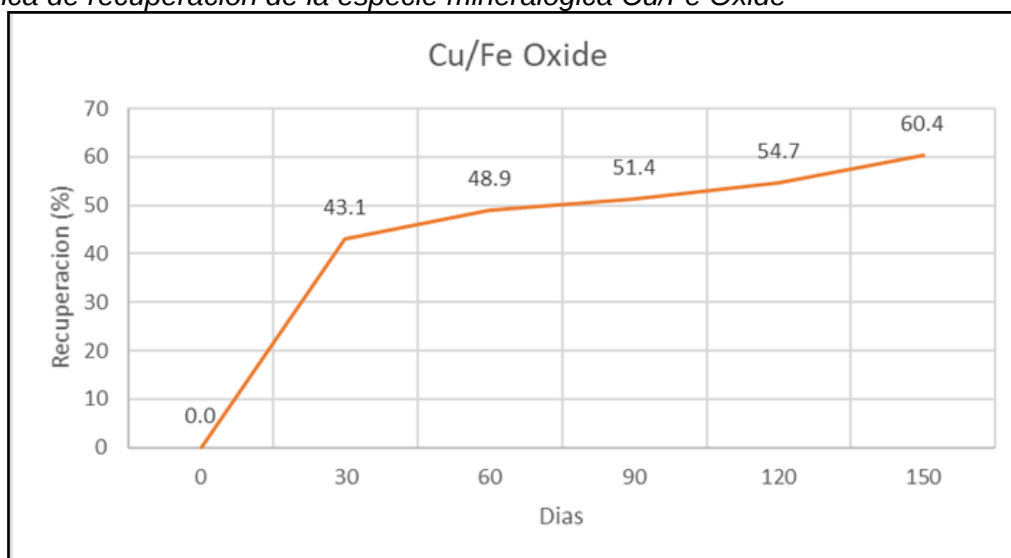


Nota: Elaboración propia.

En la figura 18 se muestra que las especies mineralógicas de Óxidos de Cu/Fe presento una recuperación alta debido a la facilidad de disolución de minerales oxidados.

Figura 18

Cinética de recuperación de la especie mineralógica Cu/Fe Oxide

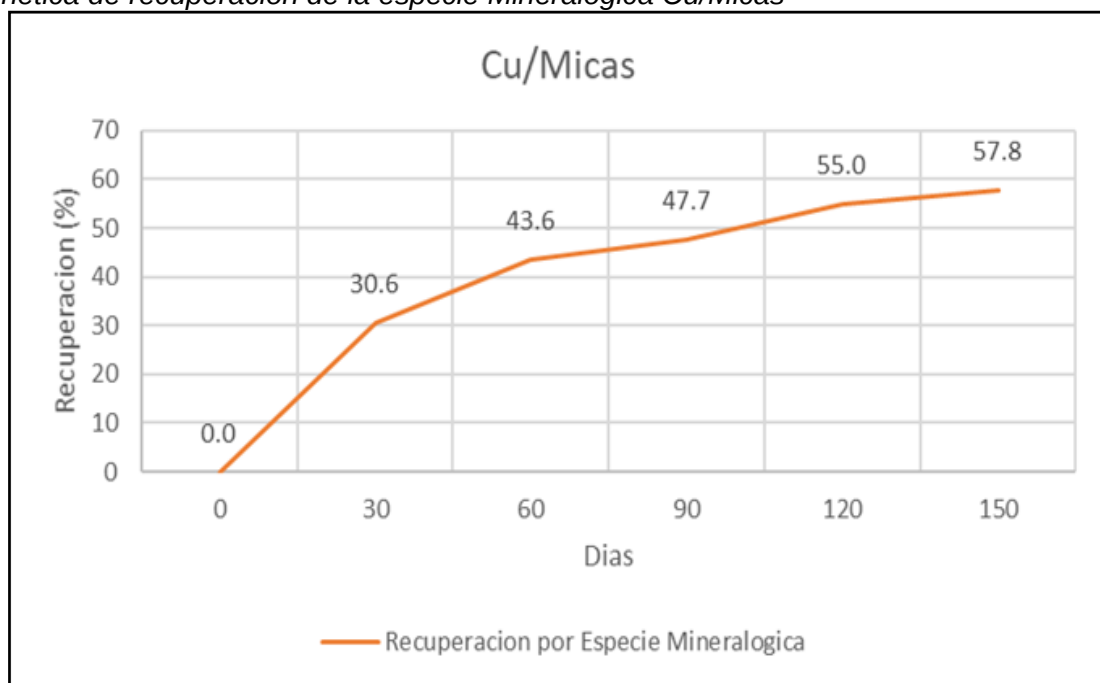


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 19 se muestra la cinética de lixiviación de las especies mineralógicas de Cu/Micas presento una recuperación alta

Figura 19

Cinética de recuperación de la especie Mineralógica Cu/Micas



Nota: Elaboración propia.

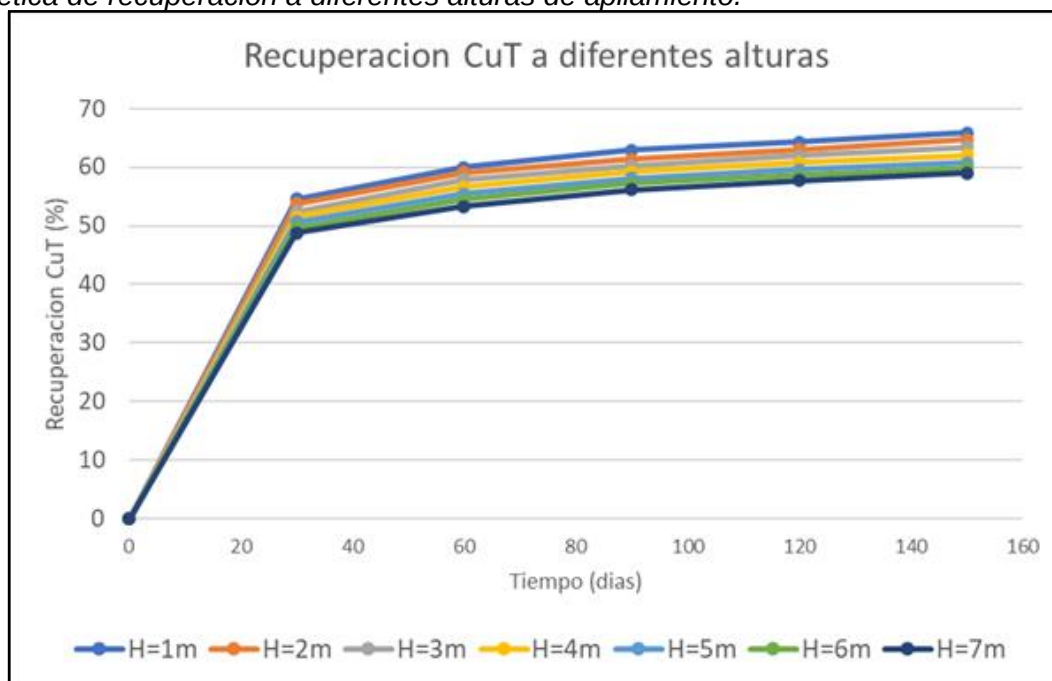
Con los resultados obtenidos se analizó la influencia de la altura de la pila de lixiviación en la recuperación de Cobre para minerales oxidados de cobre, la estimación de recuperación se realizó promediando la recuperación de las capas correspondientes, si se

requiere conocer la cinética de recuperación de una pila de seis metros de altura se requiere promediar los primeros seis metros desde la superficie.

En la Figura 20 se observa que la cinética de recuperación se redujo con el aumento de la altura de apilamiento.

Figura 20

Cinética de recuperación a diferentes alturas de apilamiento.



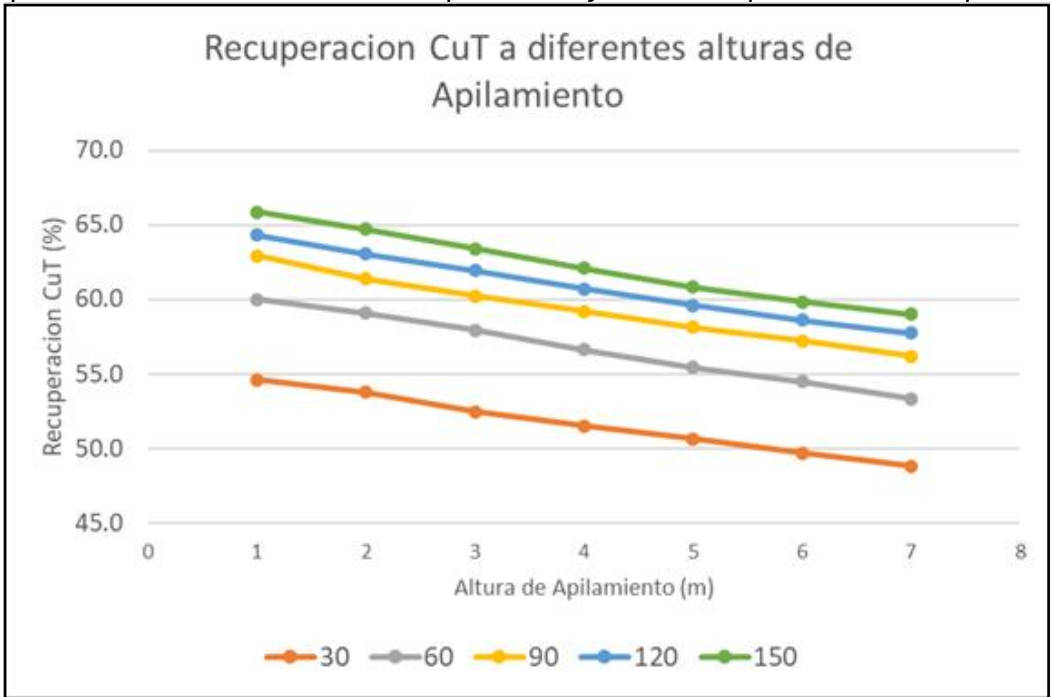
Nota: Elaboración propia.

Se analizó el efecto de la profundidad en la recuperación de cobre para evaluar cuanto se reduce la recuperación por cada metro de profundidad.

En la Figura 21 se observa que se reduce la recuperación de CuT proporcionalmente a la altura de apilamiento a diferentes tiempos de lixiviación, esta reducción de la recuperación es similar en los diferentes periodos de lixiviación, equivalente en promedio a 1% de reducción en la recuperación por el aumento de 1 metro en la altura de apilamiento.

Figura 21

Recuperación a diferentes alturas de apilamiento y diferentes periodos de tiempo.



Nota: Elaboración propia.

Capítulo IV. Análisis e interpretación de resultados

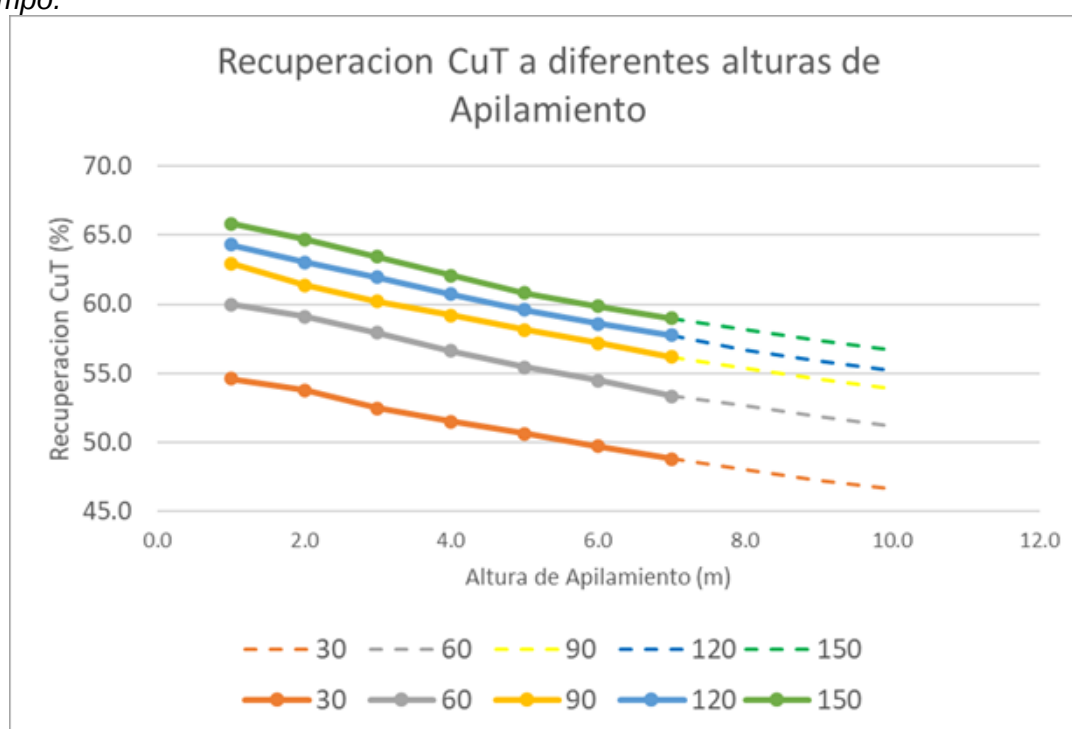
Los resultados obtenidos del trabajo de investigación confirman la hipótesis planteada: "Al evaluar la variación de la cinética de recuperación por el aumento de la altura de apilamiento generara una reducción en la recuperación de cobre". Esto confirma que operar con alturas de apilamiento más reducidas promueve el aumento de la recuperación de cobre.

Los resultados evidencian una disminución significativa en la recuperación de cobre a medida que aumenta la profundidad, evidenciando que los niveles inferiores de la pila están expuesta a soluciones lixiviante con bajas concentración de ácido sulfúrico.

En la Figura 22 se observa la proyección de la recuperación de CuT a diferentes alturas de apilamiento y a diferentes tiempos de lixiviación, la proyección permite estimar el efecto del aumento de la altura de apilamiento en los costos.

Figura 22

Proyección de recuperación a diferentes alturas de apilamiento y diferentes periodos de tiempo.

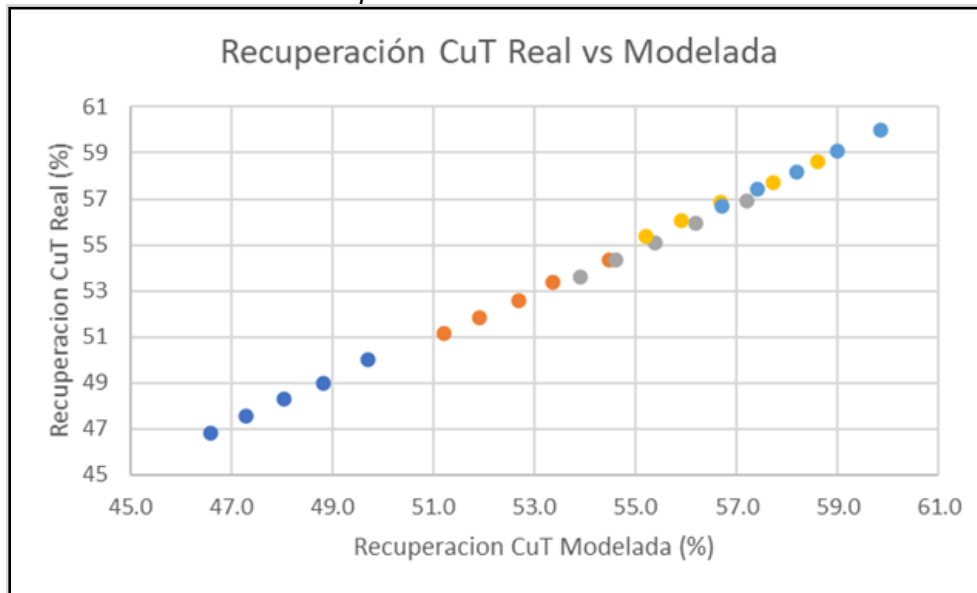


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 23 se observa la correlación entre la recuperación de CuT Real vs recuperación CuT Modelada para evaluar la recuperación a diferentes periodos de tiempo.

Figura 23

Recuperación de CuT real vs recuperación de CuT modelada

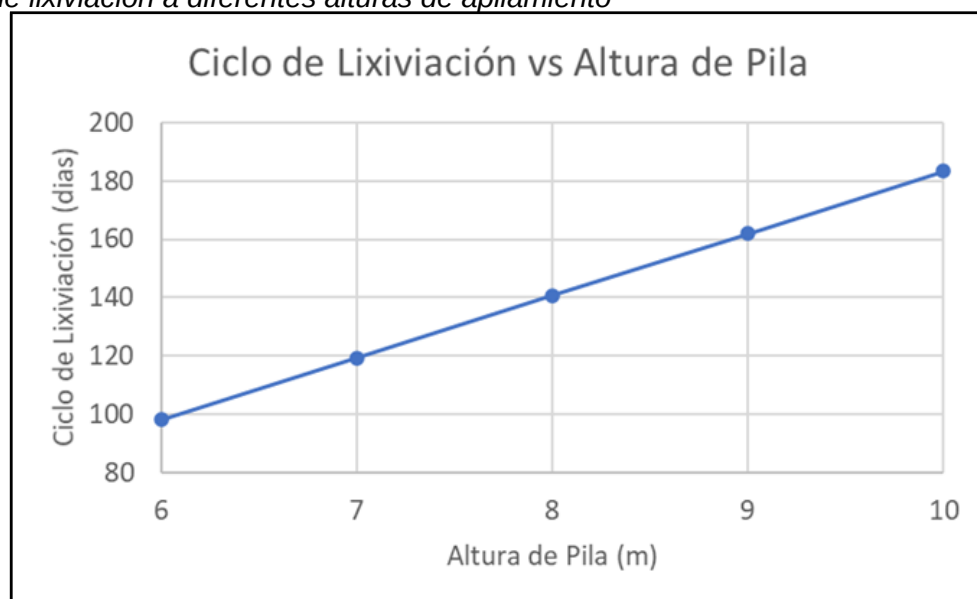


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 24 se observa el incremento del ciclo de lixiviación al incrementar la altura de apilamiento, debido al incremento del tiempo requerido para apilar (reducción de la velocidad de avance del carguío)

Figura 24

Ciclo de lixiviación a diferentes alturas de apilamiento

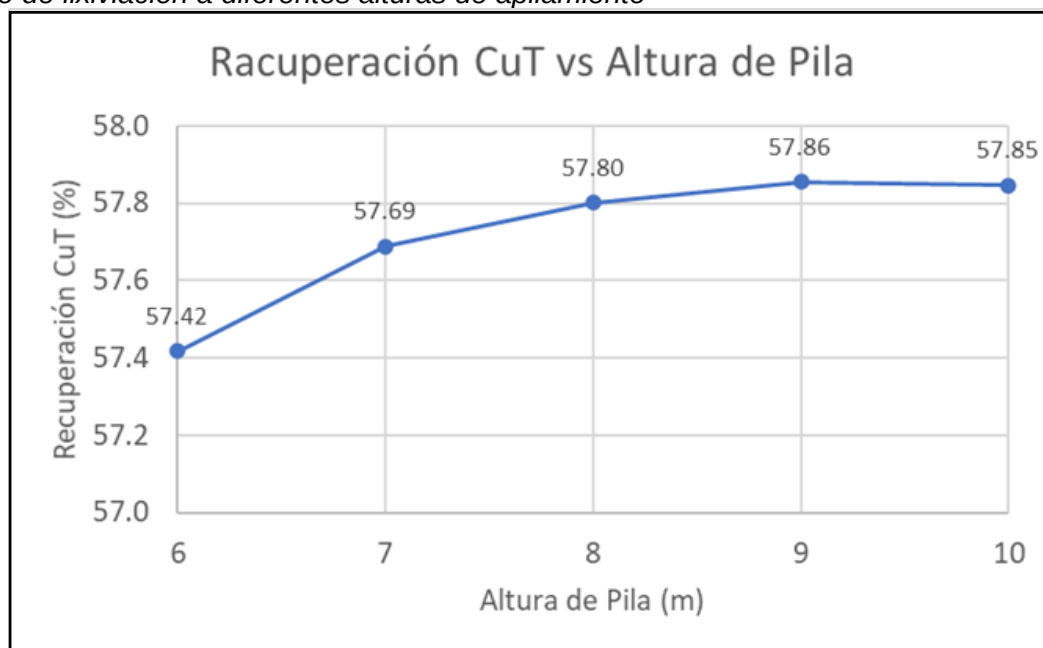


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 25 se observa la recuperación de CuT a diferentes alturas de apilamiento manteniendo la capacidad de carguío en 20,400 tm/día, identificándose que la altura optima de apilamiento debe ser mayor a 8 metros de altura.

Figura 25

Ciclo de lixiviación a diferentes alturas de apilamiento



Nota: Elaboración propia.

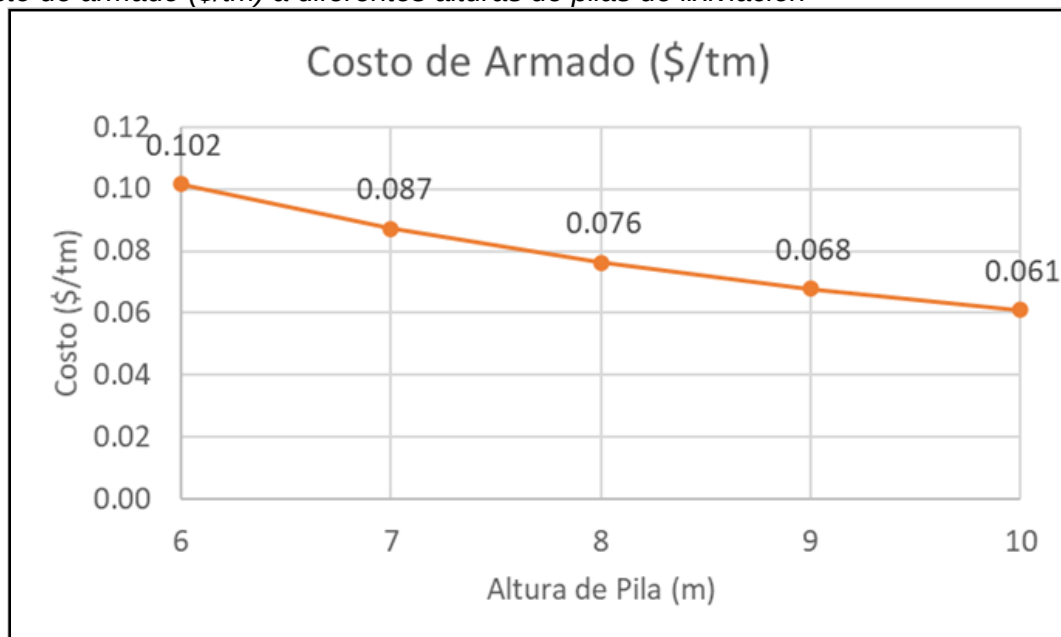
Aumentar la altura del apilamiento reduce costos operativos asociados al bombeo y armado de líneas de riego, genera una reducción en la recuperación total del cobre. Ambos aspectos deben ser considerados para realizar una evaluación para el diseño operativo.

Si bien un apilamiento más alto, optimiza el espacio y recursos, la reducción en la recuperación por la menor eficiencia de lixiviación contrarresta estos beneficios. Las empresas deben evaluar si el costo adicional de acidificación o mayor número de ciclos compensa la pérdida de recuperación.

En la Figura 26 se muestra el costo de armado por tonelada apilado a diferentes alturas de apilamientos, donde el costo de armado se reduce al incrementar la altura de apilamiento.

Figura 26

Costo de armado (\$/tm) a diferentes alturas de pilas de lixiviación

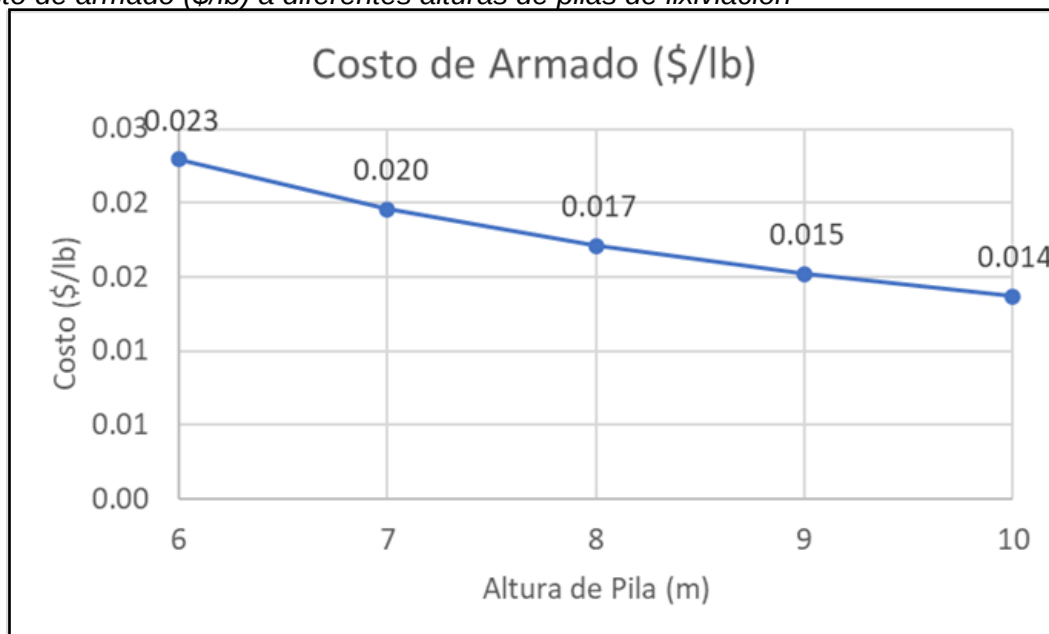


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 27 se muestra el costo de armado por libra de cobre lixiviada a diferentes alturas de apilamientos, donde el costo de armado se reduce al incrementar la altura de apilamiento.

Figura 27

Costo de armado (\$/lb) a diferentes alturas de pilas de lixiviación



Nota: Elaboración propia.

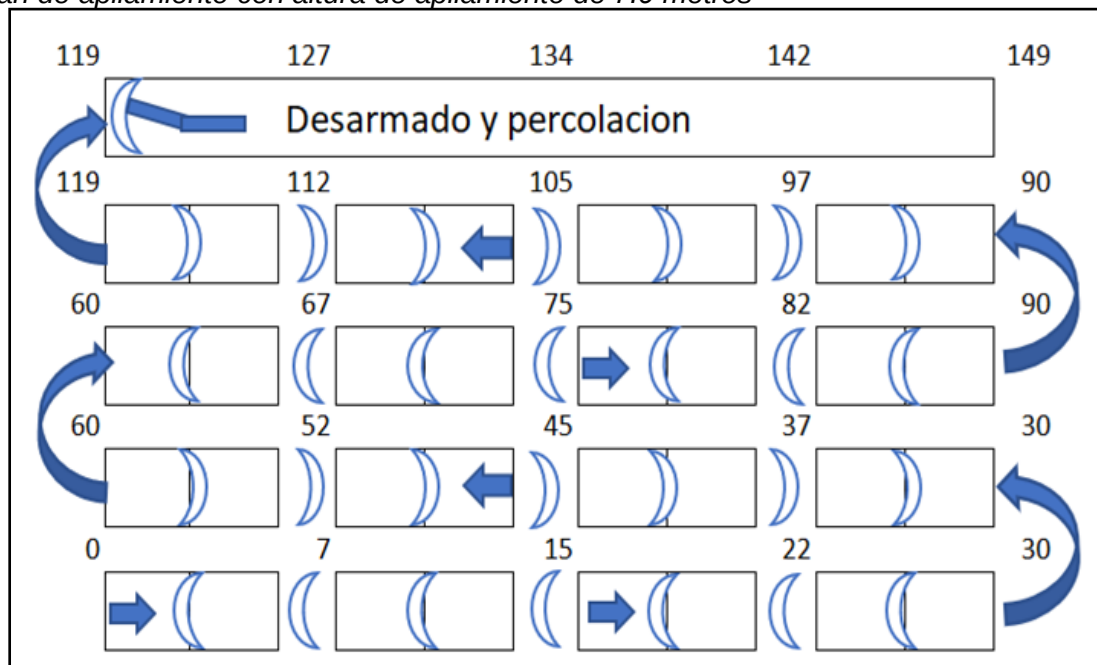
Se realizó una evaluación de costos para evaluar el efecto generado por el incremento de la altura de apilamiento en 1.5 metros, se evaluó el apilamiento en un área de Pad de 256,000 m², donde el área de un módulo es de 12,800 m², en consecuencia, se pueden apilar 20 celdas.

La capacidad de apilamiento es de 20,400 tm/día, el mineral tiene una densidad aparente de 1.7 tm/día, se apilo 12,000 m³/día, en consecuencia, para apilar una celda, si la altura es de 7m se requiere de 7.4 días y para una altura de 8.5 m, se requiere 9 días, el aumento de la altura genera una reducción en la velocidad de apilamiento por tanto un aumento de tiempo en el ciclo de lixiviación de 120 días a 150 días

En la Figura 28 se observa el plan de apilamiento con altura de 7 metros para determinar el ciclo de lixiviación, se requiere un periodo de 1 días para apilar toda el área, el periodo para el desarmado, percolación y conformación del terreno es de 30 días, obteniéndose 120 días de ciclo de lixiviación.

Figura 28

Plan de apilamiento con altura de apilamiento de 7.0 metros

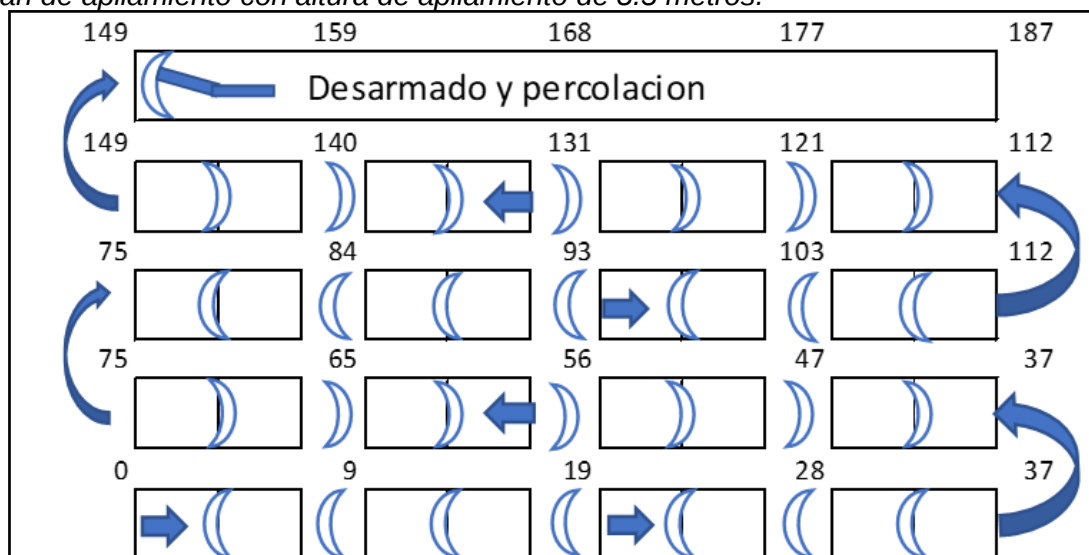


Nota: Elaboración propia.

En la Figura 29 se observa el plan de apilamiento con altura de 8.5 metros para determinar el ciclo de lixiviación, se requiere un periodo de 181 días para apilar toda el área, el periodo para el desarmado, percolación y conformación del terreno es de 30 días, obteniéndose 150 días de ciclo de lixiviación.

Figura 29

Plan de apilamiento con altura de apilamiento de 8.5 metros.



Nota: Elaboración propia.

Tabla 4

Cálculo de recuperación a diferentes condiciones operativas

		TIEMPO (DÍAS)	
		120	150
Altura de Apilamiento	Rec CuT (%)	57.70	59.07
	7.0m	56.46	57.83
	8.5m		

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se observa que la recuperación de una pila de 7 metros de altura y un ciclo de lixiviación de 120 días es 57.7% y la recuperación de una pila de 8.5 metros de altura y un ciclo de lixiviación de 150 días es de 57.83%, de los resultados obtenidos se observó que el aumento de la altura de apilamiento generó un aumento en el ciclo de lixiviación que aumentó la recuperación de cobre que es afectada negativamente por el incremento de la altura.

Tabla 5

Cálculo de tonelaje y libras de cobre de un módulo a diferentes alturas de apilamiento

PARÁMETROS	UNIDADES	LÍNEA BASE	PROPUESTA
Altura	m	7	8.5
Área	m ²	12,800	12,800
Volumen	m ³	89,600	108,800
Densidad	tm/m ³	1.7	1.7
Tonelaje	tm	152,320	184,960
Ley CuT	%	0.35	0.35
Rec CuT	%	57.7	57.79
Kg CuT	Kg	307,610	374,109
Lb CuT	lb	678,164	824,769

Nota: Elaboración propia.

En el Tabla 5 se observa los resultados de calcular el tonelaje y las libras de cobre de un mineral de ley de CuT: 0.35%, la recuperación de CuT de ambos escenarios y un módulo de 80 m por 160 m a diferentes alturas de 7 m y 8.5 m.

Tabla 6

Costos para el armado de un módulo de apilamiento

	UNIDADES	COSTO UNITARIO	CANTIDAD	COSTO
Costo de Armado de Líneas	\$/m ²	0.15	12,800	1,920
Equipo	\$/hr	130	18	2,340
Personal	\$/hr	8.5	72	612
Manguera	\$/m	0.25	32,000	8,000
Conectores	\$/un	0.5	800	400
Total	\$			13,272

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se calculó los costos de armado de un módulo de 80 m por 160 m, a partir del armado de líneas por una contratista, el costo por equipo para el traslado de tuberías, el personal técnico para el armado de líneas troncales y los materiales requeridos para el armado de líneas de riego, el costo de armado de un módulo fue de 13,272 \$

Tabla 7

Estimación de costos de \$/tm y \$/lb a diferentes alturas de apilamiento

ALTURA	COSTO POR LIBRA	COSTO POR TM
m	\$/lb	\$/tm
7	0.020	0.087
8.5	0.016	0.072

Nota: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se calculó que el costo de armado de una pila de 7 m fue de 0.02\$/lb o 0.087\$/tm y para una pila de 8.5 m fueron de 0.016\$/lb o 0.072\$/tm, demostrando que el aumento de altura de una pila reduce los costos de armado.

La disminución en la recuperación afecta directamente la proyección de producción de cátodos de cobre lo que implica un desfase en el requerimiento de reactivos y los ingresos financieros de la operación.

Conclusiones

La altura de la pila de lixiviación es un parámetro que impacta significativamente en la recuperación de cobre de minerales oxidados de cobre, existe una relación inversa entre la recuperación y la altura de la pila

El aumento de la altura de pila produce una reducción en la recuperación de cobre de 0.83% por metro

El aumento de un metro en la altura de pila genera un incremento de 20 días en el ciclo de lixiviación por una reducción en la velocidad de avance en el apilamiento.

El aumento del ciclo de lixiviación produce un aumento de la recuperación de 0.91% por metro debido a un incremento del periodo de lixiviación en la capa fresca

El incremento de altura conlleva a un incremento global de recuperación de 0.08% por metro, considerando la reducción por el incremento de altura y el aumento por el ciclo de lixiviación.

El aumento de la altura de la pila de lixiviación permite una reducción de costos por tonelada apilada del 22% en el armado de líneas de riego.

Recomendaciones

Se recomienda realizar el muestreo de la evaluación el mismo día para que el mineral tenga el mismo tiempo de lixiviación y los resultados sean comparables.

Desarrollar una evaluación experimental con mineral de sulfuros secundarios para evaluar el comportamiento de la cinética de recuperación a diferentes profundidades y evaluar el efecto de la variación de la altura en la recuperación de cobre.

Evaluar el muestreo de ripios del segundo ciclo de lixiviación para corroborar la cinética de recuperación durante todo el periodo de lixiviación.

Adicionalmente el balance de soluciones permite corroborar la recuperación de cobre y monitorear los parámetros metalúrgicos de la lixiviación como el consumo de ácido, producción de Fe, pH y potencial (mV).

Referencias bibliográficas

- Ávila, C. A. (2024). *Caracterización, distribución y potencial de recuperación de minerales de cobre de la zona de mixtos y de enriquecimiento secundario, división Gabriela Mistral, Codelco, Chile* [Tesis doctoral, Universidad de Concepción]. Repositorio institucional UDEC. <https://repositorio.udec.cl/items/cdcd3409-944b-44ba-9a57-87153045dc12>
- Berdejo, F. (2023). *Estudio comparativo de la lixiviación de óxidos de cobre utilizando medios ácidos y medios alcalinos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio UNSA. <https://hdl.handle.net/20.500.12773/19076>
- Guiachetti, D. (2011). *Consumo de Ácido Sulfúrico y Cinética de Lixiviación de un Mineral Oxidado de Cobre*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UCHILE. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104139>
- Guillen, J. A. (2022). *Cinética de lixiviación de mineral oxidado de cobre en bateas; para la obtención de sulfato de cobre con mineral oxidado de unidad minera Chaspaya* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/36596212-35e1-40b4-a7a1-eb8de9d6028e/content>
- Jarandilla, J. R. (2024). *Influencia de la concentración de ácido sulfúrico en la lixiviación de la bornita en presencia de compuestos de hierro* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. Repositorio Institucional UNICA. <https://repositorio.unica.edu.pe/server/api/core/bitstreams/96ee0927-9a8b-4269-a41d-a5de7063fe53/content>
- López, E. (2012). *Estudio Experimental de la Permeabilidad de Materiales Depositados en Pilas de Lixiviación*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UCHILE. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/102744>

- Loredo, J. Á. (2008). *Modelación y simulación de un sistema de lixiviación en columnas. aplicación a minerales oxidados de cobre* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio UANL
<http://eprints.uanl.mx/22744/1/FTD%20FCQ%201020163975.pdf>
- Miño, N. (2021).. *Uso de Aglomerantes en la Lixiviación de Ripios*. [Tesis de pregrado, Universidad de Talca], Repositorio Dspace.
<http://dspace.utalca.cl/handle/1950/12828>
- Quispe, L. (2023). *Modelamiento matemático en función de los valores de Cobre secuencial en Lixiviación de Columnas*. [Tesis pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG.
<https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4030>
- Suero, P. (2018). *Introducción a la Hidrometalurgia*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional UNC.
<https://hdl.handle.net/20.500.12952/4066>
- Torres, D. (2021). *Copper and Manganese Extraction through Leaching Processes*. [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. Repositorio UPC.
https://www.researchgate.net/profile/David-Torres-3/publication/353166396_EXTRACCION_DE_COBRE_Y_MANGANESO_MEDIANTE_PROCESOS_DE_LIXIVIACION/links/60eaf73a0fbf460db8fc619d/EXTRACCION-DE-COBRE-Y-MANGANESO-MEDIANTE-PROCESOS-DE-LIXIVIACION.pdf
- Valdés, M. (2018). *Evaluación experimental de la lixivabilidad de roca mineralizada mediante técnicas de lixiviación in situ*. [Tesis de pregrado, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional UCHILE. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/168033>
- Valenzuela, N. I. (2020). *Caracterización y modelamiento de arcillas y su impacto en el proceso hidrometalúrgico de mina San Antonio óxidos, región de Atacama, Chile* [Tesis doctoral, Universidad Nacional Andrés Bello]. Repositorio institucional UNAB. <https://repositorio.unab.cl/server/api/core/bitstreams/9d5c1ae3-815e-4496-9d0f-005a1c645894/content>

Vera, S. (2021). *Evaluacion Metalurgica de Lixiviacion de Minerales Oxidados de Cobre de la Minera Eduvino 2 – Arequipa*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio UNJBG.

<https://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/20.500.12510/4752>

Zanabria, E. K. (2021). *Evaluación de variables en el proceso de lixiviación de cobre en pilas para mejorar su extracción – Cuajone* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann]. Repositorio Institucional UNJBG.

<https://repositorio.unjbg.edu.pe/server/api/core/bitstreams/ff4b6554-d5ee-414a-8108-b9d865a3b3dd/content>.

Anexos

	Pág.
Anexo 1 : Formato de Registro de Resultados.....	1
Anexo 2 : Formato de Registro de Resultados.....	2
Anexo 3 : Formatos de Registro de Resultados	3
Anexo 4 : Formato de Inspección de Muestreo a 0 días	4
Anexo 5 : Formato de Inspección de Muestreo a 30 días	5
Anexo 6 : Formato de Inspección de Muestreo a 60 días	6
Anexo 7 : Formato de Inspección de Muestreo a 90 días	7
Anexo 8 : Formato de Inspección de Muestreo a 120 días	8
Anexo 9 : Formato de Inspección de Muestreo a 140 días	9
Anexo 10: Matriz de Consistencia.....	10

Anexo 1: Formato de Registro de Resultados

			Leyes de CuT a diferentes periodos de Lixiviacion		
Punto	Metro	Rotulo	0	30	60
PM1	1	PM1-1m	0.334	0.148	0.124
	2	PM1-2m	0.351	0.166	0.129
	3	PM1-3m	0.334	0.168	0.152
	4	PM1-4m	0.325	0.161	0.162
	5	PM1-5m	0.325	0.160	0.157
	6	PM1-6m	0.348	0.197	0.177
	7	PM1-7m	0.312	0.178	0.166
PM2	1	PM2-1m	0.426	0.198	0.169
	2	PM2-2m	0.382	0.175	0.168
	3	PM2-3m	0.395	0.199	0.168
	4	PM2-4m	0.401	0.221	0.179
	5	PM2-5m	0.367	0.201	0.189
	6	PM2-6m	0.367	0.203	0.194
	7	PM2-7m	0.421	0.236	0.222
PM3	1	PM3-1m	0.372	0.173	0.153
	2	PM3-2m	0.324	0.155	0.139
	3	PM3-3m	0.312	0.162	0.136
	4	PM3-4m	0.268	0.140	0.130
	5	PM3-5m	0.282	0.144	0.137
	6	PM3-6m	0.288	0.150	0.139
	7	PM3-7m	0.310	0.177	0.170
PM4	1	PM4-1m	0.273	0.121	0.115
	2	PM4-2m	0.264	0.125	0.115
	3	PM4-3m	0.273	0.132	0.125
	4	PM4-4m	0.273	0.132	0.127
	5	PM4-5m	0.288	0.163	0.140
	6	PM4-6m	0.249	0.138	0.124
	7	PM4-7m	0.241	0.136	0.128

Anexo 2: Formato de Registro de Resultados

			Leyes de CuT a diferentes periodos de Lixiviacion		
Punto	Metro	Rotulo	90	120	140
PM1	1	PM1-1m	0.113	0.113	0.113
	2	PM1-2m	0.135	0.122	0.137
	3	PM1-3m	0.133	0.137	0.132
	4	PM1-4m	0.148	0.145	0.123
	5	PM1-5m	0.156	0.147	0.144
	6	PM1-6m	0.167	0.158	0.161
	7	PM1-7m	0.151	0.144	0.145
PM2	1	PM2-1m	0.160	0.156	0.141
	2	PM2-2m	0.158	0.152	0.132
	3	PM2-3m	0.173	0.158	0.148
	4	PM2-4m	0.176	0.171	0.176
	5	PM2-5m	0.169	0.173	0.166
	6	PM2-6m	0.183	0.178	0.160
	7	PM2-7m	0.198	0.195	0.196
PM3	1	PM3-1m	0.140	0.137	0.120
	2	PM3-2m	0.130	0.125	0.110
	3	PM3-3m	0.127	0.124	0.124
	4	PM3-4m	0.116	0.115	0.116
	5	PM3-5m	0.128	0.124	0.124
	6	PM3-6m	0.135	0.132	0.132
	7	PM3-7m	0.162	0.150	0.140
PM4	1	PM4-1m	0.107	0.098	0.097
	2	PM4-2m	0.108	0.105	0.101
	3	PM4-3m	0.120	0.110	0.109
	4	PM4-4m	0.116	0.113	0.116
	5	PM4-5m	0.130	0.126	0.126
	6	PM4-6m	0.112	0.113	0.110
	7	PM4-7m	0.126	0.118	0.112

Anexo 3: Formatos de Registro de Resultados

Especies	0	30	60	90	120	150
Cu (QEMSCAN)	0.320	0.161	0.147	0.143	0.138	0.134
Cu (Chemical)	0.321	0.161	0.148	0.146	0.133	0.134
Fe (QEMSCAN)	3.989	4.340	4.012	4.380	4.541	4.681
Fe (Chemical)	4.199	4.327	4.083	4.420	4.624	4.672
Chalcocite	0.012	0.005	0.001	0.003	0.002	0.004
Covellite	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Chalcopyrite	0.004	0.005	0.005	0.005	0.003	0.014
Bornite	0.001	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000
Chrysocolla	0.046	0.013	0.007	0.008	0.005	0.005
Cu_Carbonate	0.003	0.001	0.002	0.002	0.001	0.004
Cu/Fe Oxide	0.226	0.122	0.119	0.109	0.106	0.090
Cu/Micas	0.013	0.011	0.010	0.009	0.004	0.005

Anexo 4: Formato de Inspección de Muestreo a 0 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-0d	7.5	Si	Re muestreo
	M2	P1-M2-0d	7.7	Si	Re muestreo
	M3	P1-M3-0d	7.4	Si	Re muestreo
	M4	P1-M4-0d	7.9	Si	Re muestreo
	M5	P1-M5-0d	7.5	Si	Re muestreo
	M6	P1-M6-0d	7.7	Si	Re muestreo
	M7	P1-M7-0d	7.0	Si	Re muestreo
P2	M1	P2-M1-0d	7.9	Si	
	M2	P2-M2-0d	7.5	Si	
	M3	P2-M3-0d	7.0	Si	
	M4	P2-M4-0d	7.3	Si	
	M5	P2-M5-0d	7.6	Si	
	M6	P2-M6-0d	7.7	Si	
	M7	P2-M7-0d	7.6	Si	
P3	M1	P3-M1-0d	7.8	Si	
	M2	P3-M2-0d	8.0	Si	
	M3	P3-M3-0d	8.0	Si	
	M4	P3-M4-0d	7.0	Si	
	M5	P3-M5-0d	7.1	Si	
	M6	P3-M6-0d	7.7	Si	
	M7	P3-M7-0d	7.4	Si	
P4	M1	P4-M1-0d	7.8	Si	
	M2	P4-M2-0d	7.3	Si	
	M3	P4-M3-0d	7.0	Si	
	M4	P4-M4-0d	7.6	Si	
	M5	P4-M5-0d	8.0	Si	
	M6	P4-M6-0d	7.0	Si	
	M7	P4-M7-0d	7.8	Si	

Anexo 5: Formato de Inspección de Muestreo a 30 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-30d	8.0	Si	
	M2	P1-M2-30d	7.4	Si	
	M3	P1-M3-30d	7.0	Si	
	M4	P1-M4-30d	7.6	Si	
	M5	P1-M5-30d	7.7	Si	
	M6	P1-M6-30d	7.9	Si	
	M7	P1-M7-30d	7.5	Si	
P2	M1	P2-M1-30d	7.8	Si	Re muestreo
	M2	P2-M2-30d	7.8	Si	Re muestreo
	M3	P2-M3-30d	7.4	Si	Re muestreo
	M4	P2-M4-30d	7.9	Si	Re muestreo
	M5	P2-M5-30d	8.0	Si	Re muestreo
	M6	P2-M6-30d	7.6	Si	Re muestreo
	M7	P2-M7-30d	7.8	Si	Re muestreo
P3	M1	P3-M1-30d	7.9	Si	
	M2	P3-M2-30d	7.0	Si	
	M3	P3-M3-30d	7.9	Si	
	M4	P3-M4-30d	7.7	Si	
	M5	P3-M5-30d	7.6	Si	
	M6	P3-M6-30d	7.6	Si	
	M7	P3-M7-30d	7.2	Si	
P4	M1	P4-M1-30d	8.0	Si	
	M2	P4-M2-30d	8.0	Si	
	M3	P4-M3-30d	8.0	Si	
	M4	P4-M4-30d	7.3	Si	
	M5	P4-M5-30d	7.4	Si	
	M6	P4-M6-30d	7.0	Si	
	M7	P4-M7-30d	7.9	Si	

Anexo 6: Formato de Inspección de Muestreo a 60 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-60d	7.6	Si	
	M2	P1-M2-60d	7.1	Si	
	M3	P1-M3-60d	7.0	Si	
	M4	P1-M4-60d	7.2	Si	
	M5	P1-M5-60d	7.6	Si	
	M6	P1-M6-60d	7.4	Si	
	M7	P1-M7-60d	7.8	Si	
P2	M1	P2-M1-60d	7.9	Si	
	M2	P2-M2-60d	7.9	Si	
	M3	P2-M3-60d	7.7	Si	
	M4	P2-M4-60d	7.2	Si	
	M5	P2-M5-60d	7.4	Si	
	M6	P2-M6-60d	8.0	Si	
	M7	P2-M7-60d	7.9	Si	
P3	M1	P3-M1-60d	7.6	Si	Re muestreo
	M2	P3-M2-60d	7.8	Si	Re muestreo
	M3	P3-M3-60d	7.4	Si	Re muestreo
	M4	P3-M4-60d	7.6	Si	Re muestreo
	M5	P3-M5-60d	7.4	Si	Re muestreo
	M6	P3-M6-60d	8.0	Si	Re muestreo
	M7	P3-M7-60d	7.0	Si	Re muestreo
P4	M1	P4-M1-60d	7.8	Si	
	M2	P4-M2-60d	7.2	Si	
	M3	P4-M3-60d	8.0	Si	
	M4	P4-M4-60d	7.1	Si	
	M5	P4-M5-60d	7.2	Si	
	M6	P4-M6-60d	8.0	Si	
	M7	P4-M7-60d	7.8	Si	

Anexo 7: Formato de Inspección de Muestreo a 90 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-90d	7.8	Si	
	M2	P1-M2-90d	7.2	Si	
	M3	P1-M3-90d	7.7	Si	
	M4	P1-M4-90d	7.2	Si	
	M5	P1-M5-90d	7.9	Si	
	M6	P1-M6-90d	7.5	Si	
	M7	P1-M7-90d	7.6	Si	
P2	M1	P2-M1-90d	7.3	Si	
	M2	P2-M2-90d	7.9	Si	
	M3	P2-M3-90d	8.0	Si	
	M4	P2-M4-90d	8.0	Si	
	M5	P2-M5-90d	7.4	Si	
	M6	P2-M6-90d	7.3	Si	
	M7	P2-M7-90d	8.0	Si	
P3	M1	P3-M1-90d	7.6	Si	Re muestreo
	M2	P3-M2-90d	7.4	Si	Re muestreo
	M3	P3-M3-90d	8.0	Si	Re muestreo
	M4	P3-M4-90d	7.1	Si	Re muestreo
	M5	P3-M5-90d	7.4	Si	Re muestreo
	M6	P3-M6-90d	7.9	Si	Re muestreo
	M7	P3-M7-90d	7.6	Si	Re muestreo
P4	M1	P4-M1-90d	7.5	Si	
	M2	P4-M2-90d	7.1	Si	
	M3	P4-M3-90d	7.5	Si	
	M4	P4-M4-90d	7.3	Si	
	M5	P4-M5-90d	7.5	Si	
	M6	P4-M6-90d	7.2	Si	
	M7	P4-M7-90d	7.6	Si	

Anexo 8: Formato de Inspección de Muestreo a 120 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-120d	8.0	Si	Re muestreo
	M2	P1-M2-120d	7.5	Si	Re muestreo
	M3	P1-M3-120d	7.9	Si	Re muestreo
	M4	P1-M4-120d	7.0	Si	Re muestreo
	M5	P1-M5-120d	8.0	Si	Re muestreo
	M6	P1-M6-120d	7.4	Si	Re muestreo
	M7	P1-M7-120d	7.4	Si	Re muestreo
P2	M1	P2-M1-120d	7.3	Si	
	M2	P2-M2-120d	7.3	Si	
	M3	P2-M3-120d	7.7	Si	
	M4	P2-M4-120d	7.8	Si	
	M5	P2-M5-120d	7.1	Si	
	M6	P2-M6-120d	8.0	Si	
	M7	P2-M7-120d	7.6	Si	
P3	M1	P3-M1-120d	8.0	Si	
	M2	P3-M2-120d	7.3	Si	
	M3	P3-M3-120d	7.0	Si	
	M4	P3-M4-120d	7.5	Si	
	M5	P3-M5-120d	8.0	Si	
	M6	P3-M6-120d	7.6	Si	
	M7	P3-M7-120d	7.2	Si	
P4	M1	P4-M1-120d	7.5	Si	
	M2	P4-M2-120d	7.7	Si	
	M3	P4-M3-120d	7.0	Si	
	M4	P4-M4-120d	7.1	Si	
	M5	P4-M5-120d	7.6	Si	
	M6	P4-M6-120d	7.1	Si	
	M7	P4-M7-120d	7.4	Si	

Anexo 9: Formato de Inspección de Muestreo a 140 días

Punto	Metros	Rotulación	Peso (kg)	Limpieza Barreno	Observación
P1	M1	P1-M1-140d	7.4	Si	
	M2	P1-M2-140d	7.2	Si	
	M3	P1-M3-140d	7.5	Si	
	M4	P1-M4-140d	7.7	Si	
	M5	P1-M5-140d	7.2	Si	
	M6	P1-M6-140d	7.8	Si	
	M7	P1-M7-140d	7.2	Si	
P2	M1	P2-M1-140d	7.9	Si	
	M2	P2-M2-140d	7.8	Si	
	M3	P2-M3-140d	7.6	Si	
	M4	P2-M4-140d	7.2	Si	
	M5	P2-M5-140d	7.5	Si	
	M6	P2-M6-140d	7.5	Si	
	M7	P2-M7-140d	7.6	Si	
P3	M1	P3-M1-140d	7.1	Si	
	M2	P3-M2-140d	7.9	Si	
	M3	P3-M3-140d	7.6	Si	
	M4	P3-M4-140d	7.2	Si	
	M5	P3-M5-140d	7.8	Si	
	M6	P3-M6-140d	7.1	Si	
	M7	P3-M7-140d	7.5	Si	
P4	M1	P4-M1-140d	7.1	Si	Re muestreo
	M2	P4-M2-140d	7.6	Si	Re muestreo
	M3	P4-M3-140d	7.5	Si	Re muestreo
	M4	P4-M4-140d	7.6	Si	Re muestreo
	M5	P4-M5-140d	7.0	Si	Re muestreo
	M6	P4-M6-140d	7.8	Si	Re muestreo
	M7	P4-M7-140d	7.8	Si	Re muestreo

Anexo 10: Matriz de Consistencia

Título: Evaluación de la cinética de lixiviación a diferentes profundidades, para calcular la recuperación de cobre a diferentes alturas de apilamiento.

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variables		Indicadores	Técnicas e instrumentos de recolección de datos
			Dependiente	Independiente		
¿Cómo afecta el aumento en la altura de la capa de apilamiento de mineral en la recuperación de cobre al final del ciclo de lixiviación, considerando la formación de zonas secas y la reducción de la concentración de ácido en el lixiviante conforme la solución penetra a mayores profundidades?	Evaluar la cinética de lixiviación a diferentes profundidades de una capa de apilamiento para calcular la recuperación a diferentes alturas de capas	Al evaluar la cinética de lixiviación de capas de mayor altura, generara una reducción en la recuperación de cobre	Recuperación de Cobre de un mineral aglomerado.	Cinética de lixiviación a diferentes profundidades de capa de apilamiento.	Cinética de Lixiviación (porcentaje) por cada metro de profundidad. Cinética de Lixiviación (porcentaje) a diferentes alturas de Capa.	Formato Inspección de Muestreo. Registro de resultado de análisis.