

# Analysis and Economic Impact of Lime Loss in gold Heap Leaching

Machuca Castañeda Diego Sebastián<sup>1</sup> ; Herhuay Lara Alexander<sup>2</sup> (N00415727) .

Aguilar Julca, Paul Michael<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte (UPN); [N0036985@upn.pe](mailto:N0036985@upn.pe)

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN); [N00415727@upn.pe](mailto:N00415727@upn.pe)

<sup>3</sup> Universidad Privada del Norte (UPN); [paul.aguilar@upn.pe](mailto:paul.aguilar@upn.pe)

**Abstract—** *This study evaluates lime losses during the ore–lime mixing stage prior to heap leaching in gold mining operations and analyzes their associated economic impact. Lime plays a critical role in pH control during cyanide leaching, ensuring gold solubility and preventing the formation of toxic species such as hydrogen cyanide (HCN). A quantitative experimental methodology at reduced scale was applied to simulate representative industrial mixing conditions, allowing the estimation of lime losses mainly caused by fine particle dispersion during handling. Experimental results showed lime losses ranging from 1% to 5%, with an average of 3%. However, for controlled industrial conditions, a representative loss range of 0.05% to 0.1% was adopted. Based on these values, a ten-year economic projection was developed for medium- and large-scale mining scenarios, estimating cumulative losses of S/ 65,520 and S/ 117,936, respectively. Overall, the findings demonstrate that even small percentage losses can lead to significant long-term economic impacts, highlighting the importance of improving lime handling and dosage control strategies to enhance operational efficiency and process sustainability in heap leaching operations.*

**Keywords—** *Heap leaching, lime loss, pH control, gold mining, operational costs.*

# Análisis e impacto económico en la pérdida de cal en lixiviación aurífera en pilas

Machuca Castañeda Diego Sebastián (N00369851)<sup>1</sup>; Herhuay Lara Alexander(N00415727)<sup>2</sup>;Aguilar Julca, Paul Michael<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Privada del Norte (UPN);N00369851@upn.pe

<sup>2</sup> Universidad Privada del Norte (UPN);N00415727@upn.pe

<sup>3</sup> Universidad Privada del Norte (UPN);paul.aguilar@upn.pe

**Resumen**– *El presente estudio evalúa la pérdida de cal durante la etapa de mezclado del mineral previa a la lixiviación en pilas en operaciones de minería aurífera y analiza su impacto económico. La cal constituye un reactivo fundamental para el control del pH en la cianuración, asegurando la solubilidad del oro y evitando la formación de especies tóxicas como el cianuro de hidrógeno (HCN). Se empleó una metodología experimental de enfoque cuantitativo a escala reducida, diseñada para simular condiciones representativas de operación industrial, permitiendo estimar las pérdidas asociadas principalmente a la dispersión de partículas finas durante la manipulación. Los resultados experimentales evidenciaron pérdidas entre 1% y 5%, con un promedio de 3%, mientras que, en condiciones industriales controladas, se adoptó un rango representativo de 0.05% a 0.1%. A partir de estos valores, se desarrolló una proyección económica a diez años para escenarios de mediana y gran escala, estimándose pérdidas acumuladas de S/ 65,520 y S/ 117,936, respectivamente. En conjunto, los resultados demuestran que incluso pérdidas porcentuales reducidas generan impactos económicos significativos, destacando la necesidad de optimizar el control y la dosificación de la cal como un factor clave para mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad del proceso de lixiviación en pilas.*

**Palabras clave**- Lixiviación en pilas, pérdida de cal, control del pH, minería aurífera, costos operativos.

## I. INTRODUCCIÓN

El Perú se posiciona como uno de los principales productores y exportadores de minerales a nivel mundial, destacando, en ese contexto, como sexto productor de oro, tercero de plata, segundo de cobre, cuarto de plomo y tercero de zinc, por consiguiente, las exportaciones mineras representan aproximadamente el 60 % de los ingresos del país, contribuyendo de manera directa a la generación de divisas y, a su vez, facilitando la importación de bienes estratégicos como maquinaria, combustibles y productos industriales [1]. En este marco, el proceso de lixiviación en pilas constituye una de las tecnologías más empleadas para la recuperación de metales valiosos, especialmente en minerales de baja ley, dado que comprende la fragmentación del mineral y su disposición sobre superficies impermeabilizadas mediante geomembranas, seguido de la aplicación de soluciones lixiviantes que permiten disolver los metales de interés y generar una solución rica (PLS), la cual es posteriormente procesada para la recuperación metálica, en consecuencia, las geomembranas actúan como barreras de contención que evitan filtraciones y garantizan tanto la eficiencia operativa como la protección

ambiental [2]-[3]. Desde una perspectiva metalúrgica, la cal constituye un reactivo esencial en la lixiviación aurífera, debido a que permite controlar el pH del sistema dentro de rangos óptimos, condición indispensable para favorecer la disolución del oro y prevenir la formación de especies tóxicas como el cianuro de hidrógeno (HCN), adicionalmente, su uso influye en etapas posteriores como la adsorción en carbón en circuitos CIP/CIL, por lo que su consumo depende de factores como la granulometría del mineral, las propiedades del reactivo, las condiciones operativas y el diseño del proceso [4].

En el ámbito nacional, operaciones como Minera Coimolache y la mina Shahuindo, ambas ubicadas en Cajamarca, emplean la lixiviación en pilas como método principal de recuperación de oro y plata, alcanzando capacidades de procesamiento aproximadas de 21,186 y 36,000 toneladas por día, respectivamente, lo cual evidencia, en términos operativos, la necesidad de optimizar el consumo de reactivos, particularmente la cal, debido a su incidencia directa en los costos del proceso [5]-[6].

Ahora bien, durante la etapa de preparación del mineral, específicamente en el proceso de encalado, la cal es adicionada con la finalidad de incrementar el pH desde valores naturales cercanos a 4.5 hasta rangos operativos entre 10.8 y 11.5, necesarios para una lixiviación eficiente, este procedimiento se realiza mediante equipos de carga que generan el mezclado mecánico del material, sin embargo, durante esta etapa se producen pérdidas asociadas principalmente a la dispersión de partículas finas, influenciadas por condiciones ambientales, características físicas del mineral y dinámica de manipulación [7]-[8]. Bajo este enfoque, aunque dichas pérdidas pueden parecer reducidas en términos porcentuales, su efecto acumulativo en operaciones de gran escala resulta económicamente significativo, por lo tanto, surge la necesidad de cuantificar estas pérdidas y evaluar su impacto en los costos operativos bajo condiciones representativas del proceso. En este sentido, resulta necesario no solo identificar estas pérdidas, sino también cuantificar su impacto económico en función de las condiciones operativas del proceso.

En consecuencia, el problema de investigación se formula de la siguiente manera: ¿Cuál es la cantidad de cal que se pierde durante el proceso de mezclado del mineral previo a la

lixiviación en pilas, debido a la dispersión de partículas finas, y cuál es su impacto económico en operaciones mineras?

En coherencia con ello, el objetivo general es determinar la cantidad de cal perdida durante el proceso de mezclado del mineral y evaluar su impacto económico, mientras que los objetivos específicos comprenden determinar el consumo de cal por tonelada de mineral, simular el proceso de mezclado a escala reducida manteniendo proporcionalidad con condiciones industriales y estimar el porcentaje de pérdida asociado a la manipulación del material. Finalmente, se plantea como hipótesis que la pérdida de cal durante el proceso de mezclado se mantiene en rangos bajos bajo condiciones operativas controladas (0.05%–0.1%), no obstante, puede incrementarse significativamente en escenarios desfavorables, afectando de manera directa la eficiencia operativa y generando un impacto económico acumulativo relevante.

En función de lo expuesto, el estudio adopta un enfoque experimental a escala reducida, orientado a simular condiciones representativas del proceso de mezclado y estimar la pérdida de cal, así como a proyectar su impacto económico en escenarios operativos de distinta escala.

## II. METODOS

El estudio sigue un enfoque cuantitativo de carácter experimental, orientado a estimar la pérdida de cal durante la etapa de mezclado del mineral previo a la lixiviación en pilas, para ello se desarrolló un ensayo a escala reducida que mantiene la relación proporcional entre mineral y cal, permitiendo representar el proceso en condiciones controladas.

La metodología se sustenta en literatura especializada sobre lixiviación en pilas y manejo de reactivos, en ese sentido, la pérdida de cal se asocia principalmente a la dispersión de partículas finas durante la manipulación y el mezclado, mientras que factores como la granulometría, la humedad y las condiciones ambientales influyen en su magnitud, por consiguiente, el uso de ensayos a escala reducida permite estimar el comportamiento del proceso y su tendencia operativa [12]–[15].

TABLA I  
CONFIGURACIÓN DE DATOS A MENOR ESCALA PARA  
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

|           | Mineral (Kg) | Cal (Kg) | Cal (g) |
|-----------|--------------|----------|---------|
| Dato real | 1000         | 1        | 1000    |
| Escala    | 30           | 0.03     | 30      |

*Nota. La escala experimental mantiene la relación proporcional de 1 kg de cal por tonelada de mineral, expresada en una muestra de 30 kg de material y 30 g de cal..*

### Materiales Utilizados:

Cal: alcalinizante que se agrega al mineral.

Arena: Complementa la estructura del mineral para crear una mezcla representativa.

Plástico negro: Simula el espacio de trabajo donde se realiza la mezcla.

Cucharón de 1 kg: Para mezclar los materiales de manera controlada.

Balanza analítica: Para medir la cantidad de cal utilizada y la pérdida durante el proceso.

Brocha: Para juntar la pérdida de cal.

TABLA II  
CONDICIONES EXPERIMENTALES DEL ENSAYO

| Parámetro               | Descripción       |
|-------------------------|-------------------|
| Masa de mineral         | 30 kg             |
| Masa de cal             | 30 g              |
| Relación cal/mineral    | 1 kg/t            |
| Número de capas         | 2                 |
| Método de mezclado      | Manual            |
| Superficie de trabajo   | Plástico negro    |
| Método de recuperación  | Manual (brocha)   |
| Instrumento de medición | Balanza analítica |

*Nota. Las condiciones corresponden al procedimiento aplicado durante el ensayo a escala reducida.*

TABLA III  
VARIABLES DEL EXPERIMENTO

| Variable              | Tipo          | Condición      |
|-----------------------|---------------|----------------|
| Masa de mineral       | Controlada    | 30 Kg          |
| Masa de cal           | Controlada    | 30 g           |
| Método de mezclado    | Controlada    | Manual         |
| Superficie de trabajo | Controlada    | Plástico       |
| Humedad               | No controlada | Variable       |
| Granulometría         | No controlada | No clasificada |

*Nota. Las variables no controladas corresponden a condiciones propias del entorno del ensayo.*

### Procedimiento experimental

1. Preparación del área del trabajo. Se acondicionó una superficie plana cubierta con plástico negro, con la finalidad de facilitar la identificación del material dispersado durante el proceso.



Fig. 1 Área de trabajo acondicionada para el ensayo.

2. Formación de la mezcla de mineral. Se colocaron 15 kg de material (arena y fragmentos) como base del mineral.



Fig. 2 Área de trabajo acondicionada para la simulación del proceso de mezclado de mineral y cal a escala reducida.

3. Adición de cal: Sobre la capa de rocas y arena, se esparce una cantidad medida de cal de 3g. La cal se utiliza para aumentar el pH del mineral, facilitando el proceso de cianuración durante la lixiviación.



Fig. 3 Aplicación controlada de cal sobre el material mineral durante la etapa de encalado.

4. Repetición del proceso de capas: Se agrega otra capa de mineral 15kg, y se repite la aplicación del mineral encima de la cal. Esto simula el proceso real de mezcla de cal y mineral.

5. Mezcla de los materiales: Con el cucharón, se realiza una mezcla simulando el trabajo realizado con el cargador frontal en la mina. Este paso asegura que la cal se distribuya adecuadamente en la mezcla.



Fig. 4 Proceso de mezclado manual del mineral y la cal, simulando la operación realizada con cargador frontal en condiciones industriales.

6. Observación y registro de la pérdida de cal: Finalizado el mezclado, se procedió a la identificación visual del material fino depositado sobre la superficie de trabajo, considerándose como fracción de cal perdida por dispersión durante el proceso.



Fig. 5 Evidencia visual de la pérdida de cal por dispersión de partículas finas durante el proceso de mezclado.

7. Pesaje de los materiales: Se junta con una brocha las partes de cal pérdida para poder pesar con una balanza analítica y sacar nuestros resultados y conclusiones. Estos resultados proporcionarán información sobre la eficiencia del proceso y las pérdidas asociadas con la mezcla de cal en condiciones simuladas en este caso a una escala menor, 30 kg representa 1 Tonelada de mineral, y 3g de cal representa 1 kg de cal.

TABLA IV  
DATOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO A BAJA ESCALA PARA RECONOCER HIPOTESIS

| Ensayo | Mineral (Kg) | Cal (g) | Cal recuperada (g) | Cal restante (g) | Masa total (kg) | Pérdida (%) |
|--------|--------------|---------|--------------------|------------------|-----------------|-------------|
| 1      | 30           | 30      | 0.3                | 29.7             | 30.029          | 1           |
| 2      | 30           | 30      | 1.5                | 28.5             | 30.028          | 5           |

*Nota. La pérdida de cal (%) se determinó como la relación entre la masa de cal recuperada y la masa inicial aplicada, considerando que la cal recolectada representa la fracción dispersada durante el proceso de mezclado.*

TABLA V  
RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

| Parámetro          | Mínimo | Máximo | Promedio |
|--------------------|--------|--------|----------|
| Cal recuperada (g) | 0.3    | 1.5    | 0.9      |
| Cal restante (g)   | 28.5   | 29.7   | 29.1     |
| Pérdida (%)        | 1      | 5      | 3        |

*Nota. El resumen presenta los valores obtenidos a partir de los ensayos realizados.*

### III. RESULTADOS

El proceso de lixiviación en pilas se desarrolla en un medio alcalino controlado, manteniendo el pH en un rango de 10.8 a 11.5, con la finalidad de evitar la formación de gas cianhídrico (HCN) y asegurar la disolución del oro [8], en ese contexto, la cal constituye un reactivo esencial para la estabilidad química del sistema, influyendo directamente tanto en la eficiencia metalúrgica como en los costos operativos asociados al proceso. Asimismo, considerando estudios metalúrgicos previos, el consumo de cal se sitúa alrededor de 1.18 kg/t de mineral [7], valor que se encuentra dentro de rangos típicos para minerales auríferos oxidados, no obstante, para efectos del presente análisis se adopta un valor promedio de 1.00 kg/t, permitiendo estandarizar los cálculos bajo condiciones representativas.

A partir de los resultados experimentales obtenidos, se identificó que la pérdida de cal durante el proceso de mezclado presenta valores comprendidos entre 1% y 5%, con un promedio de 3%, evidenciando que, en condiciones no controladas, la dispersión de partículas finas constituye un mecanismo significativo de pérdida del reactivo, en consecuencia, estos resultados permiten establecer una base experimental para el análisis posterior, aunque, en correspondencia con la literatura técnica, se adopta un valor conservador de 0.1% para representar condiciones industriales controladas [12]–[16].

En conjunto, los resultados establecen una base consistente para la estimación del impacto económico bajo condiciones representativas del proceso.

TABLA VI  
PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO

| Parámetro               | Valor | Unidad    |
|-------------------------|-------|-----------|
| Consumo de Cal          | 1     | kg/t      |
| Pérdida de Cal          | 0.1   | %         |
| Precio de Cal           | 900   | S/ por TM |
| Días de operación       | 365   | días/año  |
| Horizonte de evaluación | 10    | años      |

*Nota. Los parámetros corresponden a valores representativos empleados para la estimación del impacto económico de la pérdida de cal en operaciones de lixiviación en pilas.*

#### Resultados experimentales y escalamiento

En función de los ensayos realizados, la pérdida promedio de cal se estableció en 3%, sin embargo, dado que en condiciones industriales se aplican controles operativos que reducen la dispersión de material fino, se emplea un valor de 0.1% como referencia para la proyección económica, permitiendo así una estimación conservadora y coherente con escenarios reales de operación.

#### A) Pérdida de cal en operación de mediana escala

TABLA VII  
PÉRDIDA DE CAL – OPERACIÓN DE 20,000 TM/D

| Parámetro             | Valor         |
|-----------------------|---------------|
| Mineral procesado     | 20,000 TM/día |
| Consumo de cal        | 20 TM/día     |
| Pérdida de cal (0.1%) | 20 kg/día     |
| Pérdida anual         | 7,280 kg/año  |
| Pérdida anual         | 7.28 TM/año   |
| Precio de cal         | S/ 900 por TM |
| Costo anual           | S/ 6,552      |
| Costo en 10 años      | S/ 65,520     |

*Nota. Según la tabla para 20000 TM de mineral se usa 20 TM de Cal, el % de pérdida de cal es 0.1%, lo cual por día sería 20 kg, según nuestros cálculos, observamos que en 10 años puede haber una pérdida de S/65520.*

#### B) Pérdida de cal en operación de gran escala

TABLA VIII  
PÉRDIDA DE CAL – OPERACIÓN DE 36,000 TM/D

| Parámetro             | Valor         |
|-----------------------|---------------|
| Mineral procesado     | 36,000 TM/día |
| Consumo de cal        | 36 TM/día     |
| Pérdida de cal (0.1%) | 36 kg/día     |
| Pérdida anual         | 13,104 kg/año |
| Pérdida anual         | 13.104 TM/año |
| Precio de cal         | S/ 900 por TM |
| Costo anual           | S/ 11,793.6   |
| Costo en 10 años      | S/ 117,936    |

*Nota. Para 36,000 TM/día y una pérdida del 0.1%, se estima un costo acumulado de S/ 117,936 en 10 años.*

Los resultados del impacto operativo y económico de la pérdida de cal en función de la escala de operación se presentan en la Figura 6 y Figura 7.

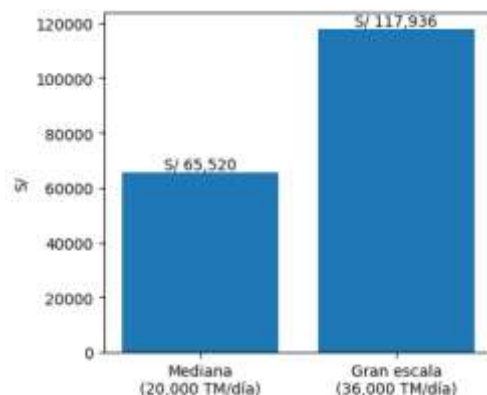


Fig. 6 Costo acumulado por pérdida de cal en función de la escala de operación (10 años)

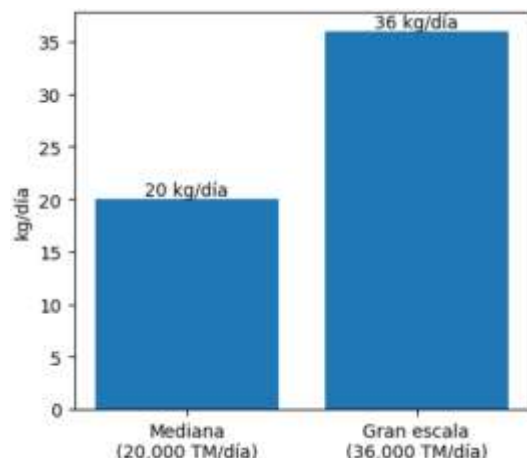


Fig. 7 Pérdida diaria de cal en función de la escala de operación



En el presente análisis se adopta un valor de pérdida de cal del 0.1%, al representar un escenario promedio bajo condiciones operativas controladas, considerando que, en situaciones específicas, dichas pérdidas pueden incrementarse hasta valores del 0.5% e incluso alcanzar niveles cercanos al 5% en condiciones desfavorables, tal como se evidenció en los resultados experimentales. En este contexto, los resultados presentados en las Tablas VII y VIII, así como en la Figura 6 y 7, evidencian que incluso bajo este escenario, la pérdida de cal genera un impacto económico significativo en el largo plazo.

Asimismo, la adopción de este valor responde a un enfoque técnico conservador empleado en evaluaciones económico-operativas [12], [14], [16], permitiendo representar adecuadamente el comportamiento global del sistema y facilitar la comparación entre distintos escenarios productivos, por lo que los resultados confirman la necesidad de optimizar el control y la dosificación de la cal en el proceso.

#### IV. DISCUSIÓN

El objetivo del estudio fue determinar la pérdida de cal durante el proceso de mezclado del mineral previo a la lixiviación en pilas, así como evaluar su impacto económico en operaciones mineras auríferas, en ese contexto, la cal cumple un rol fundamental en el control del pH de la solución cianurada, condición necesaria para asegurar la disolución del oro y evitar la formación de especies tóxicas como el gas cianhídrico (HCN) [8], por lo tanto, cualquier pérdida del reactivo durante etapas iniciales del proceso repercute directamente en la eficiencia metalúrgica y en los costos operativos.

Los resultados experimentales evidencian que, en condiciones no controladas, la pérdida de cal durante el mezclado puede alcanzar valores entre 1% y 5%, lo cual confirma que la dispersión de partículas finas constituye el principal mecanismo de pérdida del reactivo, sin embargo, al contrastar estos resultados con condiciones industriales, donde existen controles operativos y sistemas de manejo más eficientes, se adopta un valor representativo de 0.1%, coherente con la literatura técnica y con prácticas operativas optimizadas, lo cual permite establecer una base realista para el análisis económico desarrollado.

En relación con el impacto económico, los resultados obtenidos en las Tablas VII y VIII, así como en las Figuras 6 y 7, se evidencia que incluso pérdidas reducidas de cal generan efectos acumulativos relevantes, dado que una operación de mediana escala presenta pérdidas de aproximadamente 20 kg/día, mientras que en una operación de gran escala estas alcanzan los 36 kg/día, lo que se traduce en costos acumulados de S/ 65,520 y S/ 117,936, respectivamente, en un periodo de diez años, en consecuencia, estos resultados evidencian que la magnitud de la operación influye directamente en el impacto económico del reactivo.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que señalan que las características del mineral, particularmente la presencia de arcillas, así como variables operativas como la

humedad, la temperatura y el método de aplicación, influyen tanto en el consumo como en la pérdida de cal [9]–[10], asimismo, investigaciones recientes indican que la implementación de sistemas de dosificación controlada, encapsulamiento del reactivo y estrategias de control de polvo permite reducir significativamente estas pérdidas, lo que explica la diferencia entre los valores experimentales y los observados en condiciones industriales [11], [16].

No obstante, es importante considerar que el estudio presenta limitaciones asociadas a la escala experimental, dado que las pruebas se realizaron en condiciones de laboratorio, utilizando una muestra reducida y sin control estricto de variables ambientales, lo cual puede generar desviaciones respecto a condiciones reales de operación, en ese sentido, factores como la humedad del material, la granulometría y las condiciones ambientales pueden influir en la dispersión de partículas finas y, por ende, en la estimación de las pérdidas de cal.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman la relevancia técnica y económica de optimizar el manejo y la dosificación de la cal en procesos de lixiviación en pilas, evidenciando que incluso pérdidas porcentuales reducidas, cuando se mantienen de manera continua, generan impactos económicos significativos, por lo tanto, la implementación de estrategias orientadas al control de la dispersión de material fino, tales como el uso de sistemas cerrados, control de humedad y tecnologías de aplicación más eficientes, resulta fundamental para mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad económica de las operaciones mineras auríferas.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados obtenidos no solo permiten cuantificar la pérdida de cal y su impacto económico, sino que también aportan una base técnica para la toma de decisiones operativas en procesos de lixiviación en pilas, dado que la identificación de la dispersión de partículas finas como principal mecanismo de pérdida facilita la implementación de medidas correctivas orientadas a mejorar la eficiencia del proceso. En este sentido, la integración de herramientas de control en la dosificación, así como el uso de tecnologías que minimicen la exposición del reactivo durante su manipulación, constituye una oportunidad para optimizar el consumo de cal, reducir costos operativos y mejorar el desempeño global de las operaciones mineras.



Fig. 8 Proyección del costo acumulado por la pérdida de cal en operaciones mineras de mediana y gran escala durante un periodo de diez años.

## V. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió cuantificar la pérdida de cal asociada al proceso de mezclado del mineral en las etapas iniciales de la lixiviación en pilas, evidenciándose, a partir de ensayos a escala reducida, que en condiciones abiertas y sin control ambiental dichas pérdidas alcanzan valores entre 1% y 5% del reactivo añadido, atribuibles principalmente al arrastre de partículas finas durante la manipulación, lo cual, aunque supera los rangos típicos de operación industrial, permite dimensionar la magnitud del fenómeno en escenarios no controlados, estableciendo así una base experimental válida para el análisis del comportamiento del reactivo y su incidencia en la etapa de preparación del mineral.

En concordancia con la literatura técnica y bajo un enfoque conservador, los resultados experimentales fueron extrapolados a condiciones industriales mediante la adopción de un rango de pérdida de 0.05% a 0.1%, valor representativo para operaciones con control operativo, a partir del cual se determinó que las pérdidas acumuladas de cal generan impactos económicos significativos, estimándose costos del orden de S/ 65,520 para una operación de mediana escala y S/ 117,936 para una operación de gran escala en un horizonte de diez años, lo que evidencia la sensibilidad del proceso frente a variaciones mínimas en el consumo de reactivos y su efecto directo en los costos operativos.

En este contexto, se confirma que pérdidas porcentuales reducidas, aunque poco perceptibles en el corto plazo, producen efectos acumulativos relevantes en la rentabilidad del proceso, por lo tanto, la optimización del manejo y la dosificación de la cal se establece como un factor crítico para mejorar la eficiencia operativa, siendo necesario implementar estrategias orientadas a reducir la dispersión de partículas finas y fortalecer el control del reactivo durante su aplicación, lo cual contribuye directamente a la estabilidad del proceso y a la mejora continua del desempeño metalúrgico.

Asimismo, de manera integral, los resultados del estudio permiten establecer que la pérdida de cal en la etapa de mezclado no solo constituye un fenómeno operativo, sino también un indicador clave de eficiencia del proceso, dado que su control influye directamente en la estabilidad del pH, el consumo de reactivos y el desempeño económico global de la operación, por lo tanto, la adecuada gestión de este parámetro se posiciona como un elemento estratégico dentro del diseño y optimización de procesos de lixiviación en pilas.

No obstante, se reconoce que la investigación presenta limitaciones asociadas a la escala experimental, dado que las condiciones de laboratorio no reproducen completamente el comportamiento del proceso en planta, por lo que variables como la humedad, la granulometría y las condiciones ambientales pueden influir en la estimación real de las pérdidas, en consecuencia, se recomienda el desarrollo de estudios a mayor escala que permitan validar y ajustar los

resultados obtenidos, incorporando además sistemas de medición más precisos y condiciones operativas controladas.

Finalmente, se propone que futuras investigaciones profundicen en la evaluación de tecnologías avanzadas de dosificación y sistemas de control de polvo, así como en el análisis del efecto de variables operativas sobre la dispersión de material fino, con la finalidad de optimizar el consumo de cal, reducir costos y mejorar la sostenibilidad económica de las operaciones de lixiviación en pilas, promoviendo además la adopción de prácticas operativas más eficientes, seguras y alineadas con estándares industriales.

## AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se expresa el agradecimiento a la Universidad Privada del Norte por las facilidades brindadas para el desarrollo de la presente investigación, asimismo, se reconoce el valioso acompañamiento del docente MsC. Paul Michael Aguilar Julca, cuya orientación contribuyó de manera significativa al desarrollo del estudio, de igual manera, se agradece a las familias de los autores por su apoyo constante, finalmente, se destaca el compromiso y dedicación invertidos en la elaboración del presente trabajo, reflejando el esfuerzo académico y profesional aplicado en cada etapa del proceso.

## REFERENCIAS

- [1] A. Dammert L., "La importancia del sector minero para el Perú," *Journal of Economics, Finance and International Business*, vol. 4, no. 1, pp. 1–6, 2020.
- [2] L. H. Vilca Antofagasta, *Conceptos fundamentales de lixiviación*, Instituto CARCOP, Chile, 2016.
- [3] Atarfil, "Pilas de lixiviación," Atarfil Geosynthetics, 2019. [Online]. Available: <https://www.atarfil.com/aplicacion/pilas-de-lixiviacion/>
- [4] A. R. B. Smith and R. B. Doe, "Lime use in gold mining: Processes and water treatment," *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, p. 128254, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128254.
- [5] Compañía de Minas Buenaventura S.A.A., "Unidad minera Coimolache," Buenaventura, Perú, 2022. [Online]. Available: <https://buenaventura.com/operacion/coimolache/>
- [6] Pan American Silver Corp., "Shahuindo mine," Pan American Silver, Cajamarca, Perú, 2022. [Online]. Available: <https://panamericansilver.com/es/operations/gold-segment/shahuindo/>
- [7] A. R. Astuhuamán Pardavé, *Estudio metalúrgico aplicado a la lixiviación aurífera*, Tesis de pregrado, Univ. Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2009.
- [8] A. R. Astuhuamán Pardavé, *Optimización del control de pH en procesos de cianuración*, Tesis de pregrado, Univ. Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú, 2009.
- [9] J. Tremolada Payano, *Caracterización, influencia y tratamiento de arcillas en procesos de cianuración en pilas*, Tesis doctoral, Univ. de Oviedo, España, 2011.
- [10] A. R. Llerena Huamani, *Estudio técnico-económico para la instalación de una planta de minerales de baja ley por el proceso heap leaching*, Tesis de pregrado, Univ. Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, 2013.
- [11] J. A. Manrique Martínez, *Manejo de pilas de lixiviación de oro en minería Yanacocha S.R.L.*, Tesis de pregrado, Univ. Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú, 2004.
- [12] M. D. Adams, *Gold Ore Processing: Project Development and Operations*, 2nd ed. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2016.
- [13] A. R. B. Smith and R. B. Doe, "Reagent consumption and loss mechanisms in gold heap leaching," *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, p. 128254, 2021.

- [14]J. Marsden and I. House, The Chemistry of Gold Extraction, 2nd ed. Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2006.
- [15]F. Habashi, Extractive Metallurgy of Gold, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [16]D. W. Fuerstenau, K. N. Han, and M. C. Kuhn, SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook, Littleton, CO, USA: Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), 2019.