



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



[Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0)

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra de forma no comercial, siempre y cuando den crédito y licencia a nuevas creaciones bajo los mismos términos.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>



EVALUACION DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de la **TESIS** cuyo título es:

"INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE CALCIO EN EL CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO GENERADO EN RELAVERAS DE LIXIVIACIÓN"

Presentado por:

PEÑA QUIJANDRÍA LUÍS ALBERTO

Del **DOCTORADO EN GESTIÓN AMBIENTAL.**

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Escuela de Posgrado de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 0%.

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 27 de enero de 2026.

Atentamente

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
ESCUELA DE POSGRADO

Dr. MARIO GUSTAVO REYES MEJÍA
DIRECTOR

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUÍS GONZAGA"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN GESTIÓN AMBIENTAL



TESIS

**INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DEL HIDRÓXIDO DE
CALCIO EN EL CONTROL DEL DRENAJE ÁCIDO GENERADO EN
RELAVERAS DE LIXIVIACIÓN**

Línea de investigación:
Ciencias Naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles.

AUTOR:

PEÑA QUIJANDRÍA LUÍS ALBERTO

Para optar el Grado Académico de Doctor

ICA – PERÚ

2026

DEDICATORIA

La presente tesis está dedicada a Dios por haber permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Olinda Dora: Que ya no se encuentra entre nosotros, por ser mi pilar, mi ejemplo de fortaleza y el motor que siempre me impulsó a seguir adelante, aun en los momentos más difíciles. Este logro es tan mío como suyo, porque sin su amor y sacrificio nada de esto hubiera sido posible.

A mi padre Juan Alberto: Por motivarme constantemente a conseguir mis logros, por poner en mí toda su fe y su confianza de ver este sueño hecho realidad.

A mi esposa Palmira: Por sus buenos consejos y ayuda moral que siempre me sabe dar.

A mi hijita Antonela Franchesca: Que son la razón más grande para no rendirme. Ellas son mi inspiración diaria y el motivo por el cual busco superarme y dejarles un camino de esfuerzo y esperanza.

A mis hermanos: Por su apoyo, por estar presentes en cada momento. Por darme sus positivos consejos, por su confianza, por motivarme cada día a no rendirme y siempre seguir hacia delante.

Con todo mi amor y gratitud, les entrego este logro, gracias a todos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por brindarme la fortaleza, la salud y la sabiduría necesaria para culminar satisfactoriamente esta etapa académica.

A mi asesor Dr. Víctor Manuel Flores Marchan y a mis Jurados por su orientación, compromiso y dedicación en la formación de esta Tesis que me ha permitido adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, expreso mi gratitud a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a la culminación de esta investigación, cuyo respaldo ha sido invaluable en este proceso.

INDICE DE CONTENIDOS

	Pág.
PORTADA	01
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTO	03
ÍNDICE DE CONTENIDOS	04
ÍNDICE DE TABLAS	05
ÍNDICE DE FIGURAS	06
RESUMEN	07
ABSTRACT	08
I. INTRODUCCIÓN	09
II. ESTRATEGIA METODOLOGICA	12
2.1. Antecedentes.	12
2.2. Marco teórico.	14
2.3. Marco conceptual.	34
2.4. Estrategia metodológica.	35
2.5. Procedimiento experimental.	35
III. RESULTADOS.	42
IV. DISCUSIÓN.	53
V. CONCLUSIONES	55
VI. RECOMENDACIONES.	56
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	57
VIII. ANEXOS.	58

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis mineralógico cualitativo del mineral.	42
Tabla 2. Composición química del mineral.	43
Tabla 3. Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 2%.	44
Tabla 4. Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 4%.	45
Tabla 5. Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 6%.	46
Tabla 6. Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 8%.	47
Tabla 7. Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 10%.	48
Tabla 8. Concentración de Ca(OH)_2 y neutralización del drenaje ácido.	49
Tabla 9. Correlación entre las variables.	50
Tabla 10. Estadísticos de los grupos Ho.	51
Tabla 11. Estadísticos de los grupos H1	52

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Trozos apilados de roca caliza.	13
Figura 2. Localización de un yacimiento de roca caliza.	14
Figura 3. Estructura cristalina del CaCO ₃ .	17
Figura 4. Estructura hexagonal de la calcita.	17
Figura 5. Muestra de roca calcárea de color rojo.	18
Figura 6. Muestra de roca caliza de color amarillento.	18
Figura 7. Diferentes tipos de poros en la piedra caliza.	19
Figura 8. Muestra de la llamada calcita espato de Islandia.	19
Figura 9. Demostración física de la birrefringencia de la calcita.	20
Figura 10. Foto panorámica de un acantilado conformado por roca caliza.	21
Figura 11. Estructura del hidróxido de calcio	24
Figura 12. Esquema de un sistema de lixiviación en pilas.	26
Figura 13. Relaves de la lixiviación ácida de mineral oxidado.	27
Figura 14. Drenaje ácido por rebose de las relaveras.	27
Figura 15. Minerales oxidados de cobre.	28
Figura 16. Esquema que muestra cómo se genera el drenaje ácido.	29
Figura 17. Reacciones que dan origen a la formación del DAM.	30
Figura 18. Sistema de celdas interconectadas de un humedal.	31
Figura 19. Esquema que muestra como circula el agua en el humedal.	31
Figura 20. Humedal anaeróbico de flujo vertical.	32
Figura 21. Humedal anaeróbico de flujo vertical o subsuperficial.	32
Figura 22. Drenaje anóxico calizo.	33
Figura 23. Esquema de disposición de los substratos y dirección del agua en un SAPS	33
Figura 24. Esquema de un tanque agitado empleado en laboratorio.	36
Figura 25. Esquema del equipo para pruebas experimentales.	37
Figura 26. Hidróxido de calcio comercial.	39
Figura 27. Mineral oxidado de cobre chancado.	40
Figura 28. Chancadora de quijadas de laboratorio.	41

RESUMEN

La presente investigación titulada “**Influencia de la concentración del hidróxido de calcio en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación**”, es una investigación de tipo aplicada, por su nivel explicativo y por su diseño experimental, cuyo objetivo determinar la influencia de la concentración del hidróxido de calcio en la neutralización del drenaje ácido de las relaveras. Para demostrar la hipótesis planteada se llevaron a cabo ensayos que comprendieron la lixiviación dinámica del mineral oxidado para extraer el cobre como sulfato de cobre empleando una solución de ácido sulfúrico al 10%, luego de separar el sulfato de cobre del relave, este último se dejó en reposo para que se separe el líquido residual que contiene ácido sulfúrico y debido a ello su pH es 1,3. Este efluente líquido se hizo pasar por celdas llenas de hidróxido de calcio de diferente concentración, pudiéndose establecer que conforme aumenta la cantidad de hidróxido de calcio en la solución, su capacidad para neutralizar el drenaje ácido es mayor. Las concentraciones bajas del hidróxido de calcio no lograron neutralizar el drenaje, la solución de hidróxido de calcio al 6% neutraliza el drenaje ácido en la tercera celda después de 26 horas, neutralizando el drenaje con un pH 7,1; La solución al 8% en 21horas en la tercera celda neutraliza el drenaje y la que posee una concentración de 10% neutralizó el drenaje en 17 horas en la segunda celda.

PALABRAS CLAVES: Hidróxido de calcio, drenaje ácido, relaveras, lixiviación, minerales oxidados.

ABSTRACT

The present research titled “Influence of Calcium Hydroxide Concentration on the Control of Acid Drainage Generated in Leaching Tailings” is applied research, due to its explanatory level and experimental design, with the objective of determining the influence of calcium hydroxide concentration on the neutralization of acid drainage from tailings. To test the proposed hypothesis, experiments were conducted that involved dynamic leaching of oxidized ore to extract copper as copper sulfate using a 10% sulfuric acid solution. After separating the copper sulfate from the tailings, the latter was left to rest so that the residual liquid containing sulfuric acid could separate, resulting in a pH of 1.3. This liquid effluent was passed through cells filled with calcium hydroxide of different concentrations, establishing that as the amount of calcium hydroxide in the solution increases, its capacity to neutralize acid drainage is greater. Low concentrations of calcium hydroxide failed to neutralize the drainage; the 6% calcium hydroxide solution neutralizes the acid drainage in the third cell after 26 hours, achieving a pH of 7.1; the 8% solution neutralizes the drainage in the third cell in 21 hours, and the solution with a 10% concentration neutralized the drainage in 17 hours in the second cell.

KEYWORDS: Calcium hydroxide, acid drainage, tailings, leaching, oxidized minerals.

I. INTRODUCCIÓN

Para realizar la lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre se emplea generalmente el ácido sulfúrico para extraer el metal como sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), una vez separado el extracto, en el relave queda una cierta cantidad de líquido el cual junto con los sólidos son enviados hacia las relaveras, dichos efluentes de la lixiviación ácida de minerales de cobre son soluciones ácidas, de alta carga iónica, que contienen iones de cobre, además de una variedad de impurezas metálicas disueltas (como hierro, aluminio y magnesio), aniones (como sulfatos o cloruros) y agua. Estos efluentes además poseen un pH bajo (entre 1,5 y 3,5), la concentración de iones es elevada, y la viscosidad puede variar, lo que afecta la eficiencia de procesos posteriores como la extracción por solventes.

Las características descritas del efluente líquido de la lixiviación ácida se deben en primer lugar a que el solvente sea el ácido sulfúrico el cual debe de encontrarse a pH entre 1 y 4, a fin de permitir la reacción rápida de los compuestos oxidados de cobre que se encuentran presentes en el mineral tratado. Terminada la lixiviación el líquido residual que queda con el relave posee el mismo pH o en su defecto con una mínima diferencia, pero dentro del rango ácido lo que le confiere la característica de líquido con una gran cantidad de cationes y aniones de diferentes especies químicas solubles en ácido sulfúrico como son los sulfatos, óxidos, cloruros, nitratos, carbonatos de diferentes metales presentes en el mineral, debido a esto su conductividad eléctrica y su actividad corrosiva son elevadas.

Cuando se procesan toneladas de minerales la cantidad de agua residual con estas características equivale a grandes volúmenes de aguas residuales que deben ser tratadas de manera adecuada para evitar que ellas drenen contaminando los suelos o se sequen con el relave constituyendo un peligro ambiental ya que cuando llueve vuelven a disolverse y drenan hacia las capas más profundas del suelo, constituyendo verdaderos drenajes ácidos que van disolviendo metales pesados hasta ingresar en los cuerpos de agua subterránea contaminándolos. Por este motivo es preciso tratarlas de manera adecuada y uno de los métodos para lograr su neutralización es el propuesto en esta tesis y que consiste en su tratamiento con hidróxido de calcio, cuyo procedimiento se describe en el desarrollo de la investigación.

Situación problemática

Los drenajes ácidos son considerados como los contaminantes más peligrosos de la actividad minera y ellos se generan no solo en las minas de donde se extrae minerales sulfurosos, sino también en las relaveras, donde se depositan los minerales agotados que son sometidos al proceso de lixiviación ácida, empleando ácido sulfúrico para recuperar el cobre, como sulfato de cobre. Los

drenajes ácidos se infiltran e la tierra hacia capas más profundas y en su trayecto disuelve muchos compuestos químicos, entre ellos sales de metales pesados, los mismos que finalmente llegan hasta los cuerpos de agua subterránea contaminándolas. En el presente estudio se aborda experimentalmente los peligros de este drenaje y el método de control mediante el uso del hidróxido de calcio.

Problema de investigación.

Problema general

¿Cuál es la influencia de la concentración del hidróxido de calcio en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación?

Problemas específicos

PE1. ¿De qué manera influye la concentración de hidróxido de calcio en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación?

PE2. ¿Qué efecto produce el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación en el medio ambiente?

Objetivos de investigación.

Objetivo general.

Determinar la influencia de la concentración del hidróxido de calcio en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación.

Objetivos específicos.

OE1. Determinar cómo influye la concentración de hidróxido de calcio en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación.

OE2. Determinar qué efecto el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación en el medio ambiente.

Hipótesis y variables de investigación.

Hipótesis general.

La concentración del hidróxido de calcio influye positivamente en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación.

Hipótesis específicas

HE1. La concentración de hidróxido de calcio influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo.

HE2. El control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación disminuye la contaminación del medio ambiente.

Variables de estudio

Variable independiente:

Concentración del hidróxido de calcio.

Variable dependiente.

Control del drenaje ácido.

Justificación e importancia de la investigación

Justificación

La presente investigación se justifica porque en ella se plantea la necesidad de desarrollar un estudio minucioso sobre el peligro de contaminación que representa el drenaje ácido generado en las relaveras de lixiviación de minerales y por lo tanto es necesario neutralizar estos efluentes mediante un método efectivo el cual se debe determinar experimentalmente, como el que se sostiene en este proyecto, empleando el hidróxido de calcio para lograr la neutralización total del ácido y las sustancias ácidas que se pudieran generar en estos reservorios.

Importancia

La importancia del proyecto se expresará en los siguientes criterios:

Conveniencia: El proyecto es conveniente porque urge la necesidad de una educación ambiental en la región, en la cual se ponga en evidencia la necesidad de elaborar trabajos que permitan mitigar los efectos negativos de las labores mineras en la región.

Implicaciones metodológicas: Desde el punto de vista metodológico este proyecto es importante porque aborda una metodología ambiental de evaluación, y mitigación de los peligros que se generan por los drenajes ácidos en las zonas mineras de la región.

Implicaciones prácticas: desde el punto de vista práctico en el proyecto de investigación plantea el uso de un recurso mineral abundante, con características básicas, que puede ser perfectamente empleado para neutralizar el drenaje ácido que es uno de los mayores peligros contaminantes de la industria minera.

Conveniencia social: Plantear el hecho de neutralizar el drenaje ácido que no solo contamina los suelos, sino también a los cuerpos de agua que en nuestra región son extraídas para emplearlas como agua potable, es un gran avance que favorece principalmente a los habitantes de la región, los cuales son los directamente afectados y que le otorgan un enorme valor social.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Antecedentes.

Antecedente internacional

Ante el descubrimiento de múltiples relaveras abandonadas las cuales son potenciales centros de generación de drenajes ácidos distribuidos en diversos lugares del planeta, en algunos países más que en otro, se ha iniciado una serie de investigaciones tendientes a neutralizar dichos drenajes, “utilizando métodos actuales para controlar estos vertimientos, entre los cuales figuran métodos pasivos y activos; estos últimos son muy empleados en las minas y entre ellos resalta el uso de la cal para neutralizar los drenajes” [1].

“El origen del drenaje el cual es indispensable la presencia de pirita y agua, además del oxígeno del aire, generado una serie de reacciones que finalmente producen el ácido sulfúrico” [2], “El ácido sulfúrico disuelto en agua, se convierte en el principal peligro de contaminación de suelos y aguas subterráneas” [3]. “La aplicación de los métodos activos son los más adecuados para neutralizar las aguas ácidas y el uso de la cal parece ser el más común ya que permite neutralizar la acidez del drenaje, si no, además, precipitar metales pesados, en forma de hidróxidos” [4].

Antecedentes nacionales.

En el Perú, las investigaciones sobre la necesidad de neutralizar los drenajes ácidos es una constante en casi todas las Universidades donde existe dicho peligro, para ello es necesario “evaluar la eficiencia de la remoción de metales presentes en las aguas ácidas de mina mediante neutralización activa con lechada de cal [5]. Con el uso de la cual “se reportaron una eficiencia promedio de 78.65% en los parámetros inorgánicos (metales totales), netamente para Mn a nivel de laboratorio logró remover 97.9% y a nivel de campo 98.7%; mientras que en los parámetros fisicoquímicos, obtuvo un pH de 8.1, oxígeno disuelto de 5.54mg/L y conductividad de 5.14 mS/cm, estos resultados fueron comparados con las normativas del Límites Máximos Permisibles (LMP) para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas” [7] El empleo de la roca caliza, neutraliza de manera eficiente los efluentes de mina y relavera, “empleando cantidades mínimas en el proceso, lo cual es positivo ya que no se forman grandes cantidades de fangos [8]

Antecedentes locales

En las relaveras y minas subterráneas que se desarrollan en la región Ica, provincia de Nasca, “el método pasivo en el que se emplea roca caliza para neutralizar el drenaje ácido

es muy utilizado” [9], alcanzándose muy buenos resultados , la neutralización total del drenaje.

Drenaje ácido.

Es el efluente generado por la actividad minera, que se produce por la oxidación natural de los minerales sulfurosos contenidos en las rocas cuando están expuestos a la acción del agua y aire [10]

Lechada de cal.

Sustancia alcalina que alcanza 12.4 de pH, que se forma por la combinación de óxido de calcio y agua. Usualmente usado para la neutralización y precipitación de metales pesados en el tratamiento de las aguas [11]

2.2. Marco teórico.

2.2.1. Roca caliza como materia prima para obtener hidróxido de calcio.

2.2.1.1. Definición y características.

Desde el punto de vista mineralógico la roca caliza se define como aquella roca de origen sedimentarias que contienen como mínimo 50% de calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), siendo el mayor porcentaje para la calcita. Cuando la roca mineral contiene un mayor porcentaje de dolomita recibe el nombre de dolomía. La génesis de la roca caliza es el resultado de la alteración química y física de rocas preexistentes de mayor edad geológica, siendo una de sus características más saltante la capacidad de reaccionar con los ácidos inorgánicos fuertes generando burbujas, debido al desprendimiento rápido y en gran cantidad del dióxido de carbono.



Figura 1. Trozos apilados de roca caliza.

En la naturaleza existen yacimientos de roca caliza donde está asociada con otros minerales que se encuentran en cantidades pequeñas, consideradas como impurezas, entre las cuales

están: la siderita (FeCO_3), la ankerita ($\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$) y la magnesita (MgCO_3). El estudio de la roca caliza ha llegado a la conclusión que su formación puede ser química u orgánica. Aquella que se origina químicamente surge de la precipitación de los carbonatos que se encuentran en las aguas con una alta concentración de bicarbonatos. Las aguas con una alta concentración de dióxido de carbono dan lugar a la formación del ácido carbónico que disuelve el carbonato de calcio que luego con el aumento de la temperatura precipita acumulándose y compactándose para formar las rocas calizas. Por otro lado, la caliza de origen orgánico resulta de la descomposición de los caparzones de animales acuáticos (fragmentos de grandes organismos como corales, briozoos y moluscos, partes calcificadas de organismos simples como algas y foraminíferos).

La calcita microcristalina y la calcita esparítica son los dos aloquímicos que conforman la roca caliza, la calcita esparítica, son sedimentos carbonatados estructurados, que se han formado dentro de la formación o yacimiento sedimentario a estos corresponde los fragmentos biogénicos (ooides, intraclastos, pellets, bioclastos o fósiles, peloides y oncoides), mientras que la calcita microcristalina o micrita, es un sedimento carbonatado granuloso de diámetro menor a cinco micras formado por precipitación del agua marina o por la erosión de los exoesqueletos de crustáceos. En el caso de la calcita esparítica se presenta en granos de diámetro mayor a las 5μ y es el componente principal del cemento de relleno de poros.



Figura 2. Localización de un yacimiento de roca caliza

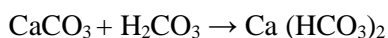
Como se observa en la figura 2, este compuesto aparece finalmente a manera de plataformas carbonatadas donde estos sedimentos acumulados en capas sobre capas conforman los enormes depósitos de caliza existentes en la naturaleza.

2.2.1.2 Origen de la piedra caliza.

El origen de la roca caliza puede ser hídrico o biológico, la primera resulta de la recristalización del carbonato de calcio cuando la concentración del dióxido de carbono disminuye o este escapa del agua, permitiendo que el carbonato de calcio se precipite según la siguiente reacción:



El CO₂ que se encuentra disuelto en el agua se libera de esta cuando las masas de aguas marinas con una alta concentración de bicarbonato de calcio afloran a la superficie disminuyendo la presión y permitiendo su liberación y en el caso de las aguas subterráneas cuando estas salen a la superficie se elimina la presión y el CO₂ se libera. De acuerdo con la ecuación química arriba citada el bicarbonato por cambio de presión o por efecto del calor se descompone en carbonato de calcio, dióxido de carbono y agua. El carbonato de calcio ante un exceso de dióxido de carbono el cual con el agua forma ácido carbónico se disuelve formando el bicarbonato o carbonato ácido de calcio:



Los exoesqueletos de los animales marinos prehistóricos, que durante millones de años gracias al ácido carbónico generado en el subsuelo se ha ido disolviendo y convirtiéndose en bicarbonato de calcio y de magnesio saturando las aguas subterráneas y marinas profundas dando origen a la roca caliza de origen biológico.

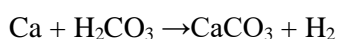
2.2.1.3. Composición química

La roca caliza al igual que otras rocas sedimentarias está conformada por diferentes minerales, dentro de los cuales el carbonato de calcio constituye como mínimo el 50 % aunque existen piedras calizas que tienen una mayor concentración de carbonato de calcio que puede ser superior al 90%. Incluidas como impurezas en la roca caliza están la arena, el cuarzo, la pirita y los minerales de arcilla. Desde un punto de vista más amplio la roca caliza es el resultado del peso de las capas de diferentes minerales de calcita y se combina con la reacción química creado por calor y presión.

Carbonato de calcio (CaCO₃)

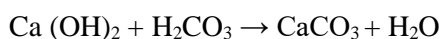
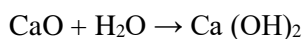
Este compuesto es una sustancia inorgánica sólida de color blanco, químicamente se representa con la fórmula CaCO₃, es el principal componente de la calcita y la aragonita, también se encuentra en la roca caliza que es una roca de origen sedimentario con una alta concentración de calcita. Esta sal de calcio que resulta de la reacción con el ácido carbónico,

el cual a su vez es el resultado de la reacción del dióxido de carbono con el agua en una reacción reversible:



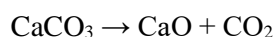
De acuerdo con la segunda reacción el carbonato de calcio es una sal de calcio del ácido carbónico.

Experimentalmente para obtener carbonato de calcio se emplea óxido de calcio disuelto en agua, los cuales forman hidróxido de calcio que luego se hace reaccionar con el ácido carbónico, según las siguientes reacciones:

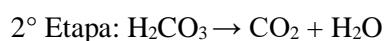


Las principales propiedades físicas y químicas del carbonato de calcio son:

- Esta sal es muy poco soluble en agua (en agua que contiene alta concentración de CO_2 , se disuelve el carbonato de calcio convirtiéndose en carbonato ácido de calcio, compuesto que recibe también el nombre de bicarbonato de calcio (CaHCO_3),
- Para descomponer térmicamente el carbonato de calcio se requiere de altas temperaturas (superiores a 800°C) transformándose en óxido de calcio y dióxido de carbono, según la reacción:



- Con los ácidos inorgánicos el carbonato de calcio genera dióxido de carbono el cual se desprende violentamente lo que origina en el recipiente de reacción un intenso burbujeo. Cuando se hace reaccionar el carbonato de calcio con el ácido clorhídrico la reacción es lenta ya que se realiza en dos etapas, en la primera se forma cloruro de calcio con ácido carbónico, este último se descompone rápidamente formando dióxido de carbono y agua, las reacciones son las siguientes:



Su obtención se hace a partir de los minerales que lo contienen entre los cuales en primer lugar está el mármol; también se obtiene empleando la cal, la cual al disolverse en el agua forma hidróxido de calcio a partir del cual se obtiene el carbonato de calcio agregando una cantidad controlada de dióxido de carbono, en este caso hay que tener en cuenta que un

exceso de gas, convierte el carbonato en bicarbonato el cual es soluble en medio acuoso; por este procedimiento se obtiene el carbonato con diversa granulometría.

Cuando la piedra caliza se disuelve en presencia de dióxido de carbono disuelto en agua, el carbonato de calcio que contiene forma bicarbonato de calcio

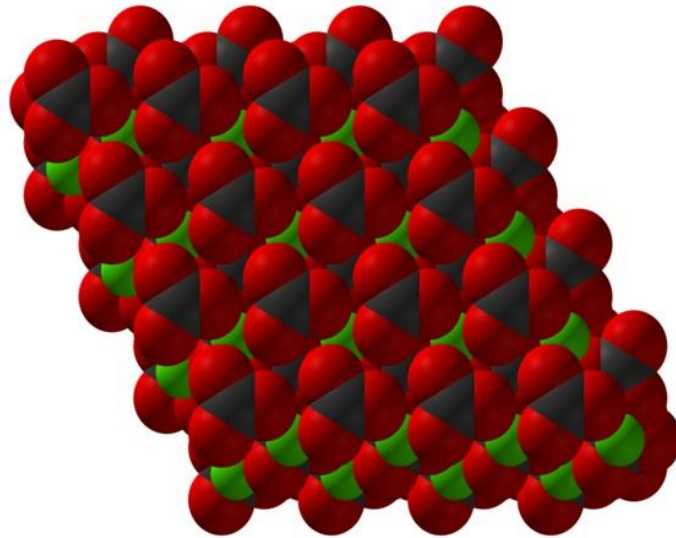


Figura 3. Estructura cristalina del CaCO_3 .

La figura de arriba muestra la estructura del CaCO_3 donde las bolas verdes corresponden a los cationes Ca^{2+} , y las bolas rojas y las negras a los aniones CO_3^{2-} . La estructura del carbonato de calcio parece estar formada por múltiples capas: una de calcio, y otra de carbonato; lo que significa que cristaliza en una estructura hexagonal compacta.

Esta fase hexagonal ($\beta\text{-CaCO}_3$) corresponde a un polimorfo. Existen otros dos: el ortorrómbico ($\lambda\text{-CaCO}_3$) y una hexagonal aún más densa ($\mu\text{-CaCO}_3$). La imagen inferior ayuda a visualizar mejor el dichoso hexágono:

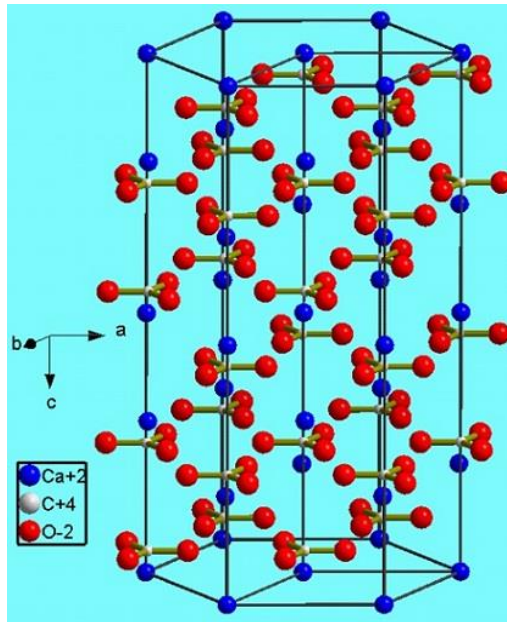


Figura 4. Estructura hexagonal de la calcita.

2.2.1.4. Características de la roca caliza.

La roca caliza presenta características que son peculiares entre ellas prevalecen las siguientes:

Color

Posee diversos matices predominando el color blanco o grisáceo, pero puede variar en diferentes tonos como el marrón, verde claro, amarillo dependiendo del tipo de impurezas que tenga y la concentración de ellas. No solo las impurezas inorgánicas influyen en el color de la roca caliza también lo hace la presencia de materia orgánica. La presencia del óxido de hierro le confiere a la roca caliza coloraciones amarillas y marrones.



Figura 5. Muestra de roca calcárea de color rojo.



Figura 6. Muestra de roca caliza de color amarillento.

Textura

Su textura es muy variada, hay roca caliza que varía desde material grueso hasta partículas muy finas, las partículas gruesas provienen de los fósiles desintegrados por acción de los vientos y agua y la acción del dióxido de carbono. El proceso que genera la desintegración de la roca caliza depende de las condiciones en las que se ha llevado, a veces es imposible determinar la granulometría porque se ha compactado en dando lugar a la roca carbonatada conformada por partículas micro pulverizadas.

Blandura

Por su dureza, la roca caliza se considera un mineral blando ya que esta no supera el 3 de la escala de Mohs lo que indica que es muy blanda y se raya con facilidad, dando una raya blanca al pasar la uña. En los acantilados de piedra caliza el viento y el agua moldean su silueta y los socavones naturales.

Porosidad

Para el caso de la roca caliza la porosidad varía considerablemente y depende de su grado de compactación y de su estructura. La porosidad en este caso es la relación existente entre el volumen de los poros V_v y el volumen total V_{tot} . El volumen de poros V_v incluye tanto los poros accesibles como los no accesibles.

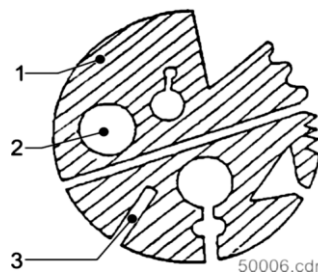


Fig.7. Diferentes tipos de poros en la piedra caliza: 1. Poro sólido; 2. Poro inaccesible; 3. Poro accesible [7]

En función a la presencia de carbonato de calcio la roca caliza se presenta en dos formas cristalizadas completamente distintas que son conocidas como calcita y aragonito, siendo la calcita la que abunda en la superficie terrestre, mientras que el aragonito es muy escaso. La estructura espacial de la calcita es romboédrica es decir que este mineral cristaliza en romboedros en un proceso de cristalización que en la naturaleza se lleva a cabo a baja temperatura, la precipitación del carbonato se lleva a cabo a una temperatura cercana a los 30°C, a temperaturas superiores cristaliza en prismas rómbicos y se denomina aragonito.



Figura 8. Muestra de la llamada calcita espato de Islandia.

En la superficie terrestre la calcita como mineral, se encuentra en diferentes formas, cada una de ellas con un nombre especial: Espato de Islandia, alabastro oriental y ónix. La calcita cristalizada posee una propiedad denominada birrefringencia o doble refracción, debido a que cuando un haz de luz incide y penetra en el cristal de calcita se bifurca en dos haces.

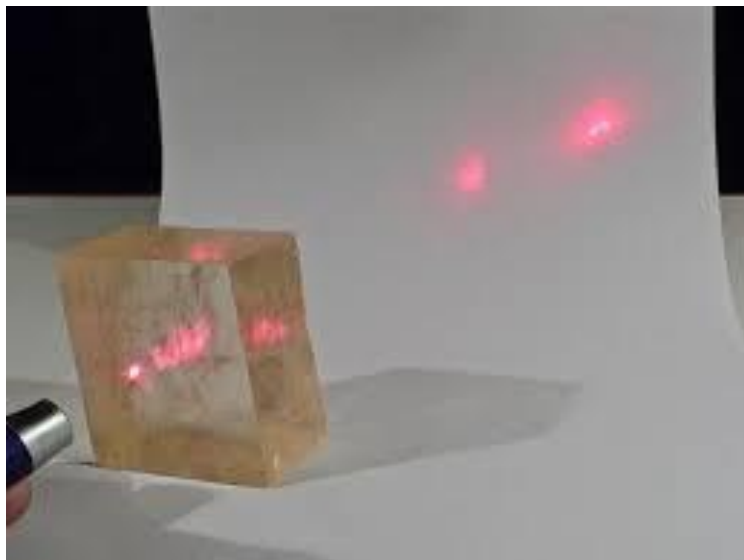
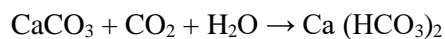


Figura 9. Demostración física de la birrefringencia de la calcita.

Una de las principales fuentes naturales de carbonato de calcio es la roca caliza, después de las rocas silicatadas. Los lechos de carbonato de calcio impuro que se han formado de los esqueletos óseos de los organismos marinos muy pequeños cuyos restos fosilizados se pueden advertir en los yacimientos.

Una de las características del carbonato de calcio es su poca solubilidad en agua pura, sin embargo, cuando el pH del agua disminuye y se acidifica debido a la presencia de dióxido de carbono, su solubilidad aumenta. Con los ácidos forma el carbonato ácido de calcio $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, en cuya molécula hay un hidrógeno, que lo vuelve más soluble en agua. Durante la disolución del carbonato de calcio en agua con un alto contenido de dióxido de carbono se produce la siguiente reacción:



Cuando el agua con dióxido de carbono disuelto pasa a través de la piedra caliza y la disuelve formando bicarbonato, como resultado de ello el agua resulta carbonatada y su pH aumenta hasta 9. Cuando el agua llega a zonas de menor presión y se libera el dióxido de carbono, el carbonato de calcio se recrystaliza depositándose en los lechos. La reacción en este caso es:



En el caso del carbonato de calcio, la temperatura influye negativamente en la solubilidad de esta sal, en agua fría se disuelve en porcentajes mínimos, pero en agua caliente disminuye enormemente esta solubilidad, a tal extremo que se vuelve insoluble. Aguas con gran cantidad de carbonato de calcio en una concentración superior a 150 ppm, con el calor precipita y forma las incrustaciones en los tubos de los calderos e intercambiadores de calor, lo cual es totalmente indeseable, ya que obstruye las tuberías y disminuye a transferencia de calor.



Figura 10. Foto panorámica de un acantilado conformado por roca caliza.

2.2.2. Hidróxido de calcio.

El reactivo que se empleará para la neutralización de los efluentes ácidos de la lixiviación de los óxidos de cobre es el hidróxido de calcio el cual es un compuesto inorgánico cuya fórmula química es $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y que físicamente se presenta como un polvo blanco muy utilizado desde hace miles de años, y que a través del tiempo ha recibido varios nombres entre ellos: cal apagada, cal muerta, cal química, cal hidratada o cal fina.

En la corteza terrestre el hidróxido de calcio se encuentra disponible en un mineral poco abundante llamado portlandita que tiene color blanco. Por esta razón esta base $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ no se obtiene directamente de este mineral, sino de un tratamiento térmico, seguido de una hidratación, de la piedra caliza. A partir de la piedra caliza se obtiene la cal, CaO (óxido de calcio), que posteriormente se apaga o hidrata para producir el $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Este compuesto inorgánico de carácter básico es una base relativamente débil en agua, ya que apenas puede disolverse en agua caliente, pero su solubilidad se incrementa en agua fría, debido a que su hidratación es exotérmica.

Por su carácter básico el hidróxido de calcio se ha utilizado como regulador de pH para distintos materiales o alimentos, además de ser una buena fuente de calcio en lo que respecta a su masa. El empleo que tiene es muy diverso, así, tiene aplicaciones en la industria del papel, en la desinfección de las aguas servidas, en productos depiladores, en comestibles hechos de harina de maíz.

El hidróxido de calcio es un compuesto iónico constituido por el catión calcio (Ca^{2+}) y dos aniones hidróxido (OH^-). En disolución acuosa, el compuesto se disocia parcialmente, liberando iones hidróxido responsables de su carácter básico. Aunque se considera una base fuerte, su baja solubilidad en agua limita la concentración de iones OH^- disponibles en solución. La presencia de iones hidróxido confiere al $\text{Ca}(\text{OH})_2$ un pH elevado, generalmente entre 12 y 12,5, lo que explica su eficacia en procesos de neutralización de medios ácidos.

Propiedades físicas

La sustancia inorgánica que recibe el nombre de hidróxido de calcio se presenta como un sólido blanco, de aspecto pulverulento y sin olor, con una densidad relativa aproximada de 2,24 g/mL y se descompone térmicamente antes de alcanzar su punto de fusión, En el agua se considera con una solubilidad relativamente baja, del orden de 1,7g/L a 20°C. Cuando al disolverse en l agua forma una solución saturada se conoce como *agua de cal*, mientras que la suspensión del sólido en agua recibe el nombre de *lechada de cal*.

Apariencia física: Sólido polvoriento blanco, inodoro y sabor amargo.

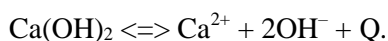
Masa molar: 74,093g/mol.

Punto de fusión. 580°C. A esta temperatura se descompone liberando agua, por lo que no alcanza jamás a vaporizarse: $\text{Ca(OH)}_2 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$.

Densidad. 2,211g/mL

pH. Una solución acuosa saturada del mismo tiene un pH de 12,4 a 25°C.

Solubilidad en agua. La temperatura influye negativamente en la solubilidad del Ca(OH)_2 en el agua, lo que quiere decir, que a mayor temperatura menor es la cantidad de este hidróxido que se disuelve en el agua. Se ha comprobado que a 0°C su solubilidad es 1,89g/L; mientras que, a 20°C y 100°C, estas son 1,73g/L y 0,66 g/L, respectivamente. Lo aquí expresado se fundamenta en el hecho termodinámico de que la hidratación del Ca(OH)_2 es exotérmica, por lo que obedeciendo el principio de Le Chatelier la ecuación vendría a ser:



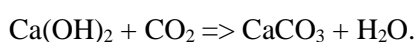
Donde:

Q es el calor liberado.

De acuerdo con esta ecuación, mientras más caliente esté el agua, el equilibrio tenderá más a la izquierda; es decir, se disolverá menos el Ca(OH)_2 debido a ello, en agua fría se disuelve mucho más que en agua hirviendo. También se debe tener en cuenta que dicha solubilidad se incrementa si el pH se torna ácido, debido a la neutralización de los iones OH^- y al desplazamiento del equilibrio anterior hacia la derecha. En un medio ácido la disolución del hidróxido de calcio libera todavía más calor que en el agua neutra. Por otro lado, a parte de las disoluciones acuosas ácidas, el Ca(OH)_2 también es soluble en glicerol. K_{ps} . $5,5 \cdot 10^{-6}$. Este valor se considera pequeño y concuerda con la baja solubilidad del hidróxido de calcio Ca(OH)_2 en el agua (el mismo equilibrio de arriba).

Índice de refracción. 1,574.

Estabilidad. El Ca(OH)_2 se mantiene estable siempre y cuando no se exponga al CO_2 del aire, ya que lo absorbe y se forma carbonato de calcio, CaCO_3 . Por lo tanto, comienza a impurificarse en una mezcla sólida de cristales $\text{Ca(OH)}_2\text{-CaCO}_3$, donde hay aniones CO_3^{2-} compitiendo con el OH^- para interactuar con el Ca^{2+} :



De hecho, esta es la razón de por qué las soluciones concentradas de Ca(OH)_2 se tornan lechosas, pues aparece una suspensión de partículas de CaCO_3 .

Propiedades químicas

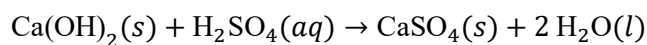
Desde el punto de vista químico, el Ca(OH)_2 presenta un comportamiento típico de las bases. Reacciona con ácidos formando sales de calcio y agua, en reacciones de neutralización. Asimismo, reacciona con el dióxido de carbono presente en el aire,

produciendo carbonato de calcio (CaCO_3), un proceso conocido como carbonatación, de gran importancia en materiales de construcción.

Además, el hidróxido de calcio puede provocar la precipitación de iones metálicos en disolución acuosa, lo que lo convierte en un reactivo útil en el tratamiento de aguas y efluentes industriales.

En una planta hidrometalúrgica típica de lixiviación de minerales oxidados de cobre (malaquita, azurita, cuprita), el mineral es tratado con soluciones de ácido sulfúrico diluido, generándose una solución rica en cobre (PLS, *Pregnant Leach Solution*) y efluentes ácidos residuales. Estos efluentes presentan pH entre 1,5 y 3,5 y contienen sulfatos y metales disueltos como Fe^{3+} y Al^{3+} , por lo que requieren neutralización antes de su descarga o recirculación. La neutralización del efluente ácido con hidróxido de calcio se basa principalmente en la reacción con ácido sulfúrico:

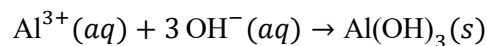
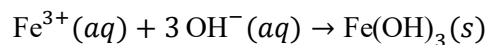
Los efluentes de lixiviación contienen principalmente H_2SO_4 , el cual es neutralizado por el $\text{Ca}(\text{OH})_2$:



Esta reacción eleva el pH y produce sulfato de calcio, un compuesto de baja solubilidad.

Precipitación de impurezas metálicas:

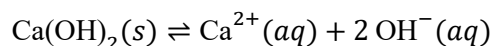
El aumento del pH favorece la precipitación de metales disueltos presentes en los efluentes:



Estos precipitados pueden separarse por sedimentación o filtración.

Fundamentos químicos del hidróxido de calcio

El $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es un compuesto iónico formado por Ca^{2+} y OH^- . En medio acuoso se disocia parcialmente según:



La liberación de iones hidróxido incrementa el pH de la solución. Su solubilidad limitada permite un aumento progresivo del pH, condición favorable en sistemas metalúrgicos para evitar sobresaturaciones y redisolución de especies metálicas.

Estructura del hidróxido de calcio

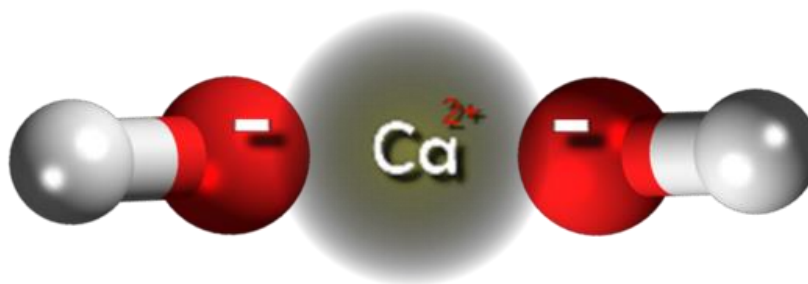


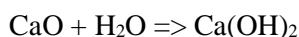
Figura 11. Estructura del hidróxido de calcio.

La figura 11 muestra los iones que integran el hidróxido de calcio. Tomando en cuenta la fórmula del hidróxido de calcio Ca(OH)_2 esta señala que por cada catión Ca^{2+} hay dos aniones OH^- que interactúan con él mediante atracción electrostática. Como resultado de esta interacción ambos iones terminan estableciendo un cristal de estructura hexagonal. En este tipo de distribución cristalina hexagonal que corresponde al Ca(OH)_2 los iones se hallan muy cercanos entre sí, lo cual da la apariencia de ser una estructura polimérica, aunque no exista formalmente un enlace covalente Ca-O dada todavía la notable diferencia de electronegatividad entre los dos elementos. La estructura genera octaedros CaO_6 , es decir, el Ca^{2+} interactúa con seis OH^- ($\text{Ca}^{2+} - \text{OH}^-$). Una serie de estos octaedros componen una capa del cristal, la cual puede interactuar con otra mediante puentes de hidrógeno que las mantienen intermolecularmente cohesionadas. Sin embargo, esta interacción se desvanece a una temperatura de 580°C , cuando se deshidrata el Ca(OH)_2 a CaO . Por el lado de las altas presiones, no hay mucha información al respecto, aunque estudios comprobaron que a una presión de 6 GPa el cristal hexagonal sufre una transición de la fase hexagonal a la monoclinica, y con ello, la deformación de los octaedros CaO_6 y sus capas.

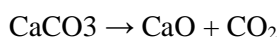
Morfología. Los cristales del Ca(OH)_2 son hexagonales, pero eso no impide que puedan adoptar cualquier morfología. Algunas de estas estructuras (tipo hebras, hojuelas o peñones) son más porosas que otras, robustas o planas, lo cual influye directamente en sus aplicaciones finales. No es lo mismo utilizar cristales provenientes del mineral portlandita, que sintetizarlos de modo que consten de nanopartículas donde se siga unos cuantos parámetros rigurosos, como el grado de hidratación, la concentración del CaO utilizado, y el tiempo que se le permite al cristal crecer.

Obtención del hidróxido de calcio

El Ca(OH)_2 se obtiene de manera comercial haciendo reaccionar la cal (CaO), con un exceso de dos a tres veces de agua:



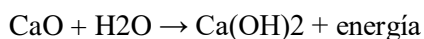
También y a nivel industrial se obtiene por descomposición térmica de la caliza, este procedimiento se denomina calcinación, la cual consiste en la descomposición térmica del carbonato de calcio (CaCO_3) en óxido de calcio (CaO) y en dióxido de carbono (CO_2). La reacción estequiométrica para una caliza pura:



El desarrollo de esta reacción es endotérmico teóricamente absorbe 425 kcal/kg; La presencia de otras sustancias exigen energía adicional para volatilizar algunas impurezas y cambiar de estado a otras. Durante la calcinación se requiere de un aumento de temperatura desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de calcinación; después, se mantiene constante esta temperatura durante el lapso necesario para que la descomposición de toda la caliza se lleve a cabo. La temperatura aplicada sobre la roca caliza se distribuye de la siguiente manera: hasta 100°C, se precalienta la roca; de 100°C a 450°C, se evapora agua higroscópica; de 450°C a 800°C, se disocian los carbonatos de magnesio y algunos carbonatos de calcio; de 800°C a 900°C, se disocian los carbonatos de calcio y se descompone la arcilla; de 900°C a 1500°C, se aumenta la velocidad de disociación; arriba de 1500°C. se empieza a sobre quemar la caliza que está cerca de la fuente de calor.

Obtención en laboratorio

Se obtiene por hidratación del óxido de calcio:

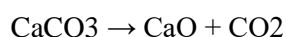


Reacción exotérmica utilizada para ensayos de neutralización a pequeña escala.

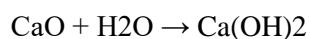
Obtención industrial.

Industrialmente el hidróxido de calcio se obtiene en dos etapas:

1. **Calcinación de la caliza:**



2. **Hidratación del óxido de calcio:**



2.2.3. Relaves de lixiviación ácida.

El proceso de lixiviación:

La lixiviación es un proceso que consiste en poner en contacto el mineral con una solución reactiva la cual tiene la capacidad para extraer las especies mineralógicas oxidadas reaccionando con ellas y transformándolas en sustancias solubles. Generalmente esta solución ácida se elabora con un determinado porcentaje de ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico disuelve los óxidos de cobre, formando el sulfato de cobre pentahidratado que luego se separa se envía a procesos de recuperación, como la electro-obtención.

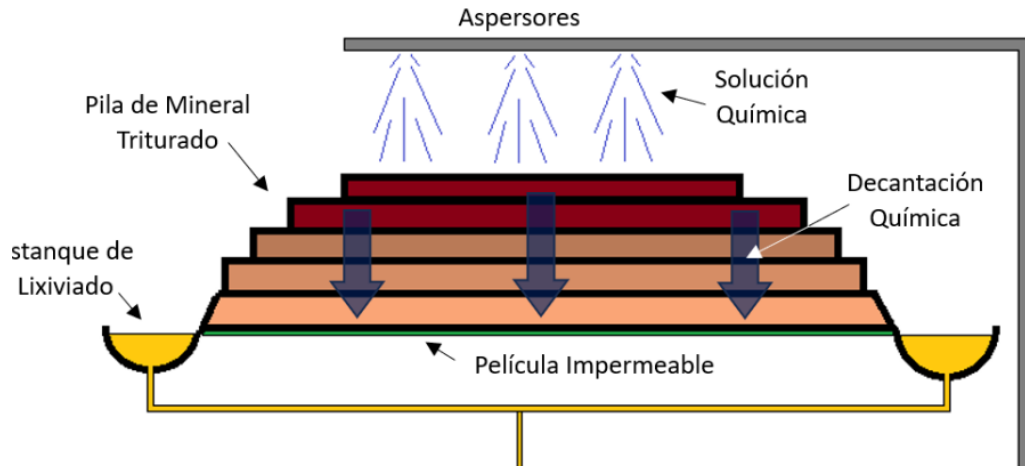


Figura 12. Esquema de un sistema de lixiviación en pilas.

Una vez extraído y separado el sulfato de cobre queda el material terroso agotado (sin los compuestos oxidados de cobre) el cual recibe el nombre de relave. El relave de lixiviación ácida de minerales oxidados se define entonces como el residuo sólido resultante de la lixiviación de los minerales oxidados que posee cierta cantidad residual de líquido (solución de sulfato de cobre que queda retenido a la superficie del sólido y que poco a poco se va separando). El material estéril (o relave) es en realidad la ganga la cual contiene no solo ácido sulfúrico sino además otros compuestos que tienen efecto contaminante que debe ser descargado en las relaveras o debe permanecer sobre las mallas que se colocan debajo de los terraplenes cuando se hace lixiviación en montón.



Figura 13. Relaves de la lixiviación ácida de mineral oxidado.

La presencia de ácido sulfúrico que no ha reaccionado y el sulfato de cobre en solución son dos componentes que constituyen los componentes principales del drenaje ácido ya que tienen una alta capacidad para disolver cualquier sal de metales pesados que puede haber en el relave y en los suelos por donde pasará los lixiviados en su recorrido hacia las capas más profundas de la corteza terrestre hasta llegar a los cuerpos de agua. El drenaje ácido de la lixiviación de minerales oxidados de cobre aun cuando el relave sea depositado en relaveras ecológicas, protegidas para evitar el drenaje por el fondo de la relavera, durante la época de lluvias que cada vez son más intensas, estos relaves se lavan y rebosan la relavera inundando las zonas aledañas donde no existe trabajos de impermeabilización alguna.



Figura 14. Drenaje ácido por rebose de las relaveras.

Minerales oxidados de cobre.

Se llaman minerales oxidados a aquellos minerales que contienen especies mineralógicas que en su fórmula química contiene uno o varios átomos de oxígeno. Así por ejemplo los minerales oxidados de cobre pueden contener:

- **Malaquita:** $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
Un carbonato de cobre con un color verde brillante.
- **Azurita:** $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$
Otro carbonato de cobre, caracterizado por su intenso color azul.
- **Tenorita:** CuO
Un óxido de cobre negro, menos común que los carbonatos.
- **Cuprita:** Cu_2O
Un óxido de cobre (I) con un color rojo o marrón.
- **Crisocola:** $\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Un silicato de cobre que se forma en asociación con otros minerales.

- **Atacamita:** $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$

Un cloruro de cobre que requiere la presencia de cloro en el ambiente.

Los minerales oxidados de cobre pueden contener uno o varios de estos compuestos oxigenados en su composición y todos ellos son solubles en ácido sulfúrico y debido a ello se procesan mediante lixiviación ácida.



Figura 15. Minerales oxidados de cobre.

Aunque teóricamente el proceso de lixiviación resulte muy fácil, técnicamente para lograr el máximo de eficiencia es necesario tener en consideración una serie de factores que son fundamentales durante el proceso, como por ejemplo la granulometría del mineral, la cual debe estar acorde con el tipo de lixiviación que se va a desarrollar: Si la lixiviación es dinámica (con agitación neumática o mecánica) el tamaño de la partícula debe ser lo más pequeña posible (Malla # 325) a fin de que durante el proceso el sólido y el líquido se comporten como una sola fase creando una emulsión perfecta donde la solución ácida tenga contacto directo en todo momento el mineral pulverizado. De esta manera la lixiviación es más eficiente y mucho más rápida.

Si la lixiviación que se llevará a cabo es en tina (batea) entonces se requiere que el mineral sea chancado hasta malla # ½" (12,50 mm) y sea tamizada antes de colocarlo en el tanque y agregarle la solución de ácido sulfúrico, esto con el fin de que no se compacte el mineral en el fondo de la tina e impida el paso del reactivo a través de todo el mineral. Además de dicho tamaño de partícula hay que tener en cuenta que el mineral sea poroso y que fácilmente deje penetrar entre sus poros el reactivo (Solución de ácido sulfúrico) a fin de que todo el cobre sea extraído y no haya muchas pérdidas con el relave.

Otro factor que hay que considerar es la presencia de compuestos y metales que consumen ácido como los carbonatos que consumen el doble de reactivo y los metales que fácilmente reaccionan con el ácido sulfúrico formando sulfatos. Hay que tener en cuenta que este

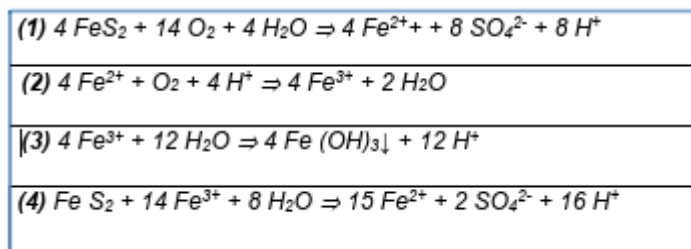


Figura 17. Reacciones que dan origen a la formación del DAM.

2.2.4. Tratamiento del drenaje ácido.

Existen dos categorías de tratamiento que se emplean para eliminar o para disminuir los impactos generados por el drenaje ácido: uno de ellos es el uso de métodos activos y el otro el uso de métodos pasivos. El primero de ellos requiere del empleo de reactivos químicos los cuales encarecen su aplicación ya que se requiere de la implementación de una infraestructura adecuada en donde se pueda aplicar los reactivos y realizar las separaciones respectivas de las sustancias resultantes del agua tratada, lo cual exige como mínimo una filtración. En cambio, los métodos pasivos se basan en los mismos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los humedales naturales, en los cuales se hacen variaciones del potencial redox (Eh) y el grado de acidez (pH) de los drenajes para que se produzcan sustancias insolubles y la captación de cationes metálicos. Los métodos pasivos más utilizados son los humedales artificiales tanto aerobios como anaerobios, los drenajes anóxicos calizos, los sistemas de producción de alcalinidad y por último las barreras reactivas permeables. Todos estos métodos tienen como finalidad: eliminar la acidez de las aguas, precipitar los metales pesados y eliminar los sólidos en suspensión objetivos que a menudo se logran usando materiales alcalinos o de substratos orgánicos.

Métodos pasivos para el tratamiento del drenaje ácido de lixiviación.

Dentro de estos métodos los de mayor aplicación con cierto porcentaje positivo de éxito están los que a continuación se describen de manera concreta:

a) Humedales aerobios artificiales.

Su finalidad es crear las condiciones aerobias donde se desarrollen cierto tipo de plantas (carrizos, juncos) y microorganismo (algas, protozoos y bacterias) que depuren el agua a tratar. En el fondo del humedal se desplaza lentamente una fina capa de agua que permite mantener inundado el sistema y que se desarrollen las plantas y microorganismos que interactúan con el oxígeno del aire y el agua depurándola. Estos humedales funcionan adecuadamente cuando el espesor del agua que se trata no supere los 30 cm.

En este tipo de humedales aerobios a fin de lograr resultados más eficientes el agua debe circular por varias celdas interconectadas lentamente y en flujo horizontal.

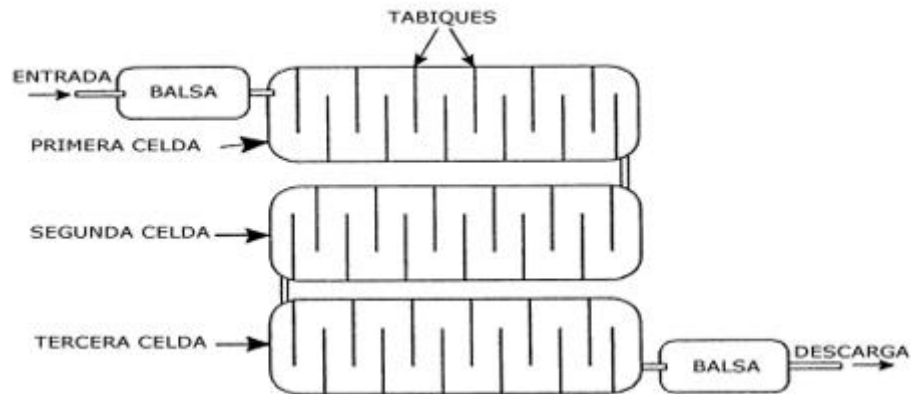


Figura 18. Sistema de celdas interconectadas de un humedal.

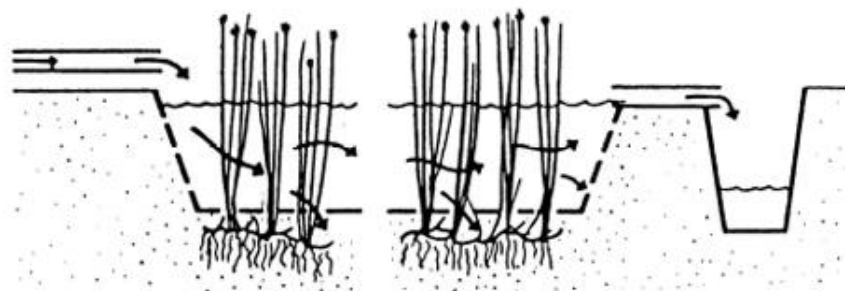


Figura 19. Esquema que muestra como circula el agua en el humedal.

b) Humedales anaerobios o balsas orgánicas

Con estos humedales se crean condiciones anóxicas para la biorremediación, para ello una capa de material orgánico se cubre con una masa de agua de 30 cm, se sumerge en el agua el sustrato que puede ser aserrín, estiércol o compost entremezclado y bien dispuesto sobre una capa caliza. Bajo estas condiciones el Fe^{3+} se reduce a Fe^{2+} , dando como resultado alcalinidad mediante procesos químicos o con la ayuda de bacterias. Las bacterias, reducen los sulfatos a sulfuros con el fin de precipitar el azufre contaminante.



Figura 20. Humedal anaeróbico de flujo vertical.

El principal parámetro del humedal anaerobio es la composición del sustrato. En el caso de que las aguas ácidas se generen en minería se puede recurrir a un tratamiento con igual fundamento que las balsas orgánicas. La función de las bacterias, en este tipo de procesos de reducción de los sulfatos a sulfuros para que se pueda producir la precipitación del azufre contaminante, es como se demuestra fundamental en los procesos descritos de tratamiento pasivo de drenajes en humedales anaerobios o balsas orgánicas.

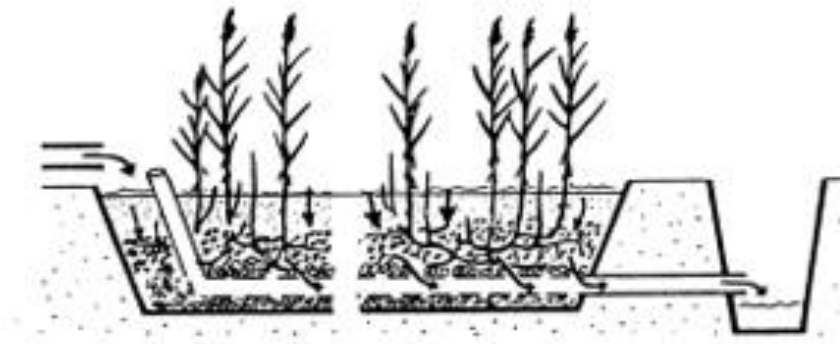


Figura 21. Humedal anaeróbico de flujo vertical o subsuperficial.

c) **Drenajes anóxicos calizos.**

Este método pasivo de tratamiento de aguas de drenaje ácido consistente en un relleno con gravas de caliza u otro material calcáreo en una zanja, la cual es sellada a techo con una capa de tierra arcillosa además de una geomembrana impermeable. La profundidad a la que se instala la zanja es de entre uno y dos metros, manteniéndose de esta manera las condiciones anóxicas. El flujo de agua es forzado a circular dentro de esa estructura creada, de tal manera que se provoca la disolución de la caliza, proceso por el cual se generará cierta alcalinidad ($\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$) elevándose por consiguiente el pH del agua.

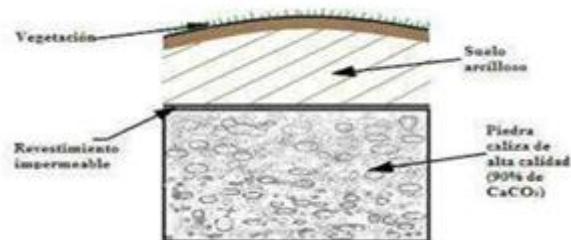


Figura 22. Drenaje anóxico calizo.

d) Sistemas sucesivos de producción de alcalinidad (SAPS)

Un humedal anaerobio de flujo vertical se puede definir como un sistema de tratamiento en el que se integra una balsa orgánica y un ALD con el fin de reducir sulfato y retener metales y al mismo tiempo incrementar la alcalinidad. Consiste en un estanque en cuyo interior se depositan dos substratos, uno con material alcalino y con compuestos orgánicos, y estarán ambos sumergidos en el influente a una profundidad entre 1 y 3 m, siendo drenado por la parte inferior mediante un conjunto de tubos. El primer substrato, el más inferior, es de caliza (0,5 a 1 m de espesor) y sirve para neutralizar el pH del influente. El segundo substrato, el más superior, es de material orgánico (0,1 a 0,5 m de espesor) y en él se elimina el oxígeno disuelto del agua, se reduce el sulfato y se transforma el Fe^{3+} en Fe^{2+} , evitándose así la precipitación del hidróxido de Fe^{3+} sobre la capa de caliza

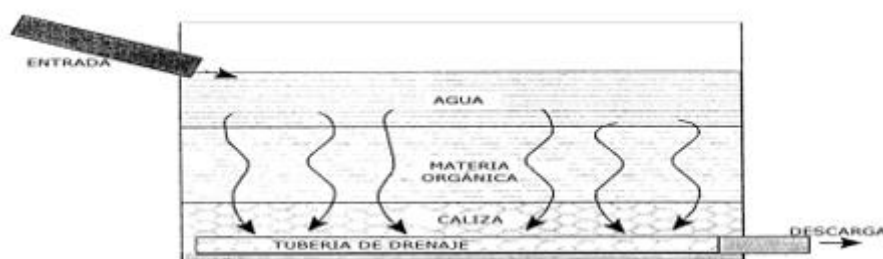


Figura 23. Esquema de disposición de los substratos y dirección del agua en un SAPS

2.3. Marco conceptual.

Drenaje Ácido de Mina (DAM):

Agua ácida y rica en metales, producto de la oxidación de sulfuros expuestos al aire y al agua, comúnmente en minas.

Drenaje Ácido de Roca (DAR):

Un término más amplio para el proceso de formación de agua ácida por la oxidación de sulfuros en cualquier roca natural, no solo en minas.

Metales iónicos:

Metales que han perdido o ganado electrones, volviéndose cargados eléctricamente y solubles en agua.

Oxidación:

Reacción química en la que un átomo o ión pierde electrones, liberando energía y haciendo el agua más ácida.

Alcalinidad:

La capacidad del agua para resistir cambios de pH debido a la presencia de iones como carbonatos y bicarbonatos.

pH:

Una escala que mide la acidez o alcalinidad de una sustancia. El DAM tiene un pH bajo.

Neutralización:

El proceso químico de aumentar el pH del agua ácida utilizando sustancias alcalinas, como el carbonato de calcio, para eliminar la acidez.

Carbonato de calcio (Caliza):

Un reactivo alcalino que se usa para neutralizar el DAM, aumentando su pH y permitiendo la precipitación de metales.

Humedal construido:

Un sistema artificial que imita las funciones naturales de un humedal (como la filtración y la sedimentación) para limpiar el agua, especialmente el DAM.

Precipitación:

La formación de sólidos (como los metales) que se separan de una solución.

Sedimentación:

La acción de partículas sólidas que se depositan en el fondo de un cuerpo de agua.

Filtración:

El proceso de pasar agua a través de un medio para eliminar partículas suspendidas, como sedimentos y metales precipitados.

Pasivos ambientales mineros (PAM):

Los problemas ambientales asociados con las actividades mineras que requieren solución, mitigación o prevención.

Reacciones químicas (en humedales):

Procesos como la sedimentación de metales, la descomposición biológica y la transformación de sustancias que limpian el agua.

Ácido sulfúrico.

Acido inorgánico reductor, cuya fórmula química es H_2SO_4 , en el cual son solubles los minerales oxidados.

2.4. Estrategia metodológica.

Por su tipo la investigación propuesta en este proyecto es aplicada ya que busca que dar solución a un problema ambiental de mucho peligro no solo para los suelos sino además para las aguas subterráneas. Por su nivel a investigación es explicativa ya que busca la

relación entre las dos variables de estudio y por su diseño es experimental ya que se manipula la independiente. La población estará conformada por las relaveras y depósitos de escombros mineros resultantes del procesamiento de minerales oxidados de cobre mediante la lixiviación ácida; la muestra estará conformada por los relaves de la planta Mercurio de Nasca. Estos relaves serán tratados en laboratorio con agua en cantidades controladas para producir el drenaje ácido que luego será analizado para caracterizarlo y para someterlo a ensayos en sustratos de roca caliza de composición química conocida, a fin de establecer los parámetros adecuados para la neutralización.

Para el desarrollo experimental se aplicarán técnicas del análisis químico y el instrumento será el análisis instrumental, el cual permitirá cuantificar la concentración de componentes que tienen el drenaje ácido y la roca caliza. Los datos obtenidos serán tratados estadísticamente mediante el estadístico chi cuadrado y la correlación de Pearson.

2.5 Procedimiento experimental.

2.5.1. Generalidades.

Las muestras necesarias para realizar los ensayos relacionados con la neutralización de los efluentes líquidos de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre empleando para ello hidróxido de calcio, se tomaron de pruebas de lixiviación realizadas para tal fin. El procedimiento que se siguió fue el siguiente: En un tanque agitado de laboratorio empleado como reactor se colocan 2 kg de muestra mineral pulverizado hasta malla # 325 (0,0044mm) y se agrega 6 litros de solución que contiene ácido sulfúrico al 10% y se pone a funcionar a una velocidad de 1000 rpm durante 45 minutos, después de este tiempo se analiza la concentración de cobre en la solución y se da por terminado el proceso. Se separa la solución de sulfato de cobre obtenida y el relave se almacena en una cuba que está conectada a las celdas de neutralización que contienen soluciones de hidróxido de calcio a determinados porcentajes. Después de separar el sulfato de cobre en el relave queda un 0,7% de cobre residual, la humedad promedio es de 12% con un pH 1,3.

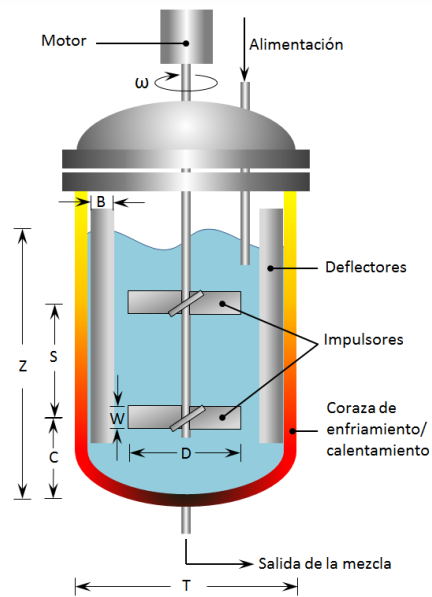


Figura 24. Esquema de un tanque agitado empleado en laboratorio.

El relave obtenido colocado en la cubeta que simula la relavera se dejó en reposo durante un día a fin de que todo el líquido que quedó adherido a la superficie y a los macro poros de las partículas minerales drenará. Esta operación se llevó a cabo porque en planta sucede lo mismo cuando al relave se bombea o se traslada en volquetes hacia la relavera va con una cantidad de líquido que luego se separa y que constituye el efluente líquido de la lixiviación. A este relave se le determina la humedad (12,3%) y el pH (1,3) y se realizan los análisis para establecer su composición química.

El efluente líquido obtenido se hace pasar por celdas conteniendo soluciones de hidróxido de calcio, el número de estas (máximo tres) depende de la capacidad de neutralización de las soluciones neutralizantes empleadas. El efluente ácido ingresa por a parte inferior del recipiente y va ascendiendo por la solución que deberá ser agitada periódicamente, luego ingresará al tubo de descarga que está conectado a la parte inferior de la otra celda y así sucesivamente. De la parte superior de las celdas se toma una muestra para determinar el pH, el cual debe ser 7 o mayor de 7 para considerar neutralizado el efluente. Concluida la neutralización se hacen los cálculos respectivos. Terminados los ensayos con el efluente inicial, se agrega agua al relave con el fin de lavarlo (semejante a lo que hace la lluvia) y luego se determina el pH y se realizan los ensayos correspondientes para neutralizar esta agua de lavado.

2.5.2. Materiales, equipos e instrumentos empleados.

Materiales:

- Relave de lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre.

- Soluciones de hidróxido de calcio.

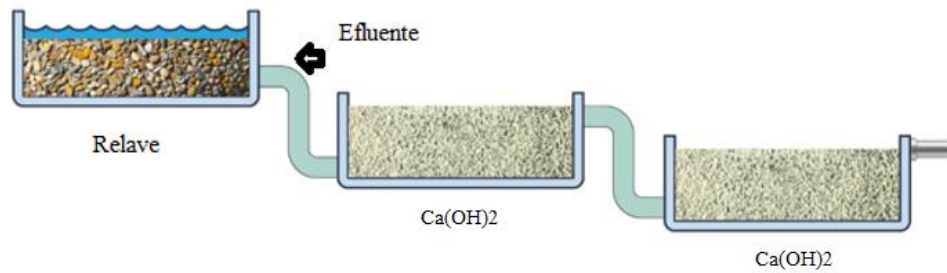


Figura 25. Esquema del equipo para pruebas experimentales.

Equipos:

- Vasos de precipitados.
- Probetas graduadas
- Bureta
- Pipeta.
- Erlenmeyer.
- Soporte universal
- Pinzas extensibles
- Crisol de porcelana
- Cápsula de evaporación

Instrumentos:

- Balanza tecnoquímica
- Agitador magnético.
- Cocinilla eléctrica con termostato regulable.
- Centrífuga
- Horno de mufla.

Reactivos:

- Ácido sulfúrico
- Indicador rojo de metilo.
- Reactivos para determinar la composición química del relave y de la roca caliza.

2.5.3. Preparación de la muestra.

Cálculos preliminares:

Dato inicial: pH de la solución

pH = 1,3

Por definición:

$$\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$$

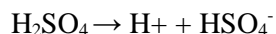
Despejamos la concentración de protones:

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} = 10^{-1,3}$$

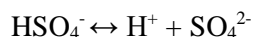
$$[\text{H}^+] = 3,16 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Relación entre el ácido sulfúrico y los protones

El ácido sulfúrico (H_2SO_4) es un ácido diprótico fuerte en su primera disociación:



La segunda disociación es parcial:



Para pH bajos ($\text{pH} < 2$):

La primera disociación es completa

La segunda contribuye poco al pH

Aproximación estándar:

$$[\text{H}^+] \approx [\text{H}_2\text{SO}_4]$$

Concentración molar de H_2SO_4

$$[\text{H}_2\text{SO}_4] \approx 3,16 \times 10^{-2} \text{ mol/L}$$

Cálculo de moles en 100 mL

Volumen:

$$V = 100 \text{ mL} = 0,100 \text{ L}$$

Moles:

$$n = C \times V$$

$$n = (3,16 \times 10^{-2}) \times 0,100$$

$$n = 3,16 \times 10^{-3} \text{ mol}$$

Masa de ácido sulfúrico

Masa molar del H_2SO_4 :

$$M = 98,08 \text{ g/mol}$$

$$m = n \cdot M$$

$$m = (3,16 \times 10^{-3}) \times 98,08$$

$$m = 0,31 \text{ g}$$

Resultado final

Una solución de 100 mL con $\text{pH} = 1,3$ contiene aproximadamente:

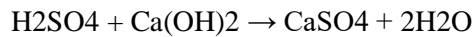
$$0,0316 \text{ mol/L de } \text{H}_2\text{SO}_4$$

$$3,16 \times 10^{-3} \text{ moles de } \text{H}_2\text{SO}_4$$

$$\approx 0,31 \text{ g de } \text{H}_2\text{SO}_4 \text{ puro}$$

Cálculo del Hidróxido de calcio.

Considerando la reacción de neutralización:



98,08 + 74,093

0,31 x

$X = (0,31 \times 74,093) / 98,08 = 0,23 \text{ g de Ca}(\text{OH})_2 \text{ s\u00f3lido.}$

Esto quiere decir que para neutralizar 0,31g de \u00e1cido sulf\u00fabrico se requiere de 0,23g de hidr\u00f3xido de calcio.

Sin embargo, en el trabajo pr\u00e1ctico la neutralizaci\u00f3n del \u00e1cido de los efluentes de lixiviaci\u00f3n no se lleva a cabo de manera estequiom\u00e9trica, debido a la imposibilidad de determinar con exactitud la cantidad de sustancias presentes en el mineral, por lo que se trabajar\u00e1 con soluciones de concentraciones aproximadas entre 4 y 10%, para establecer la concentraci\u00f3n m\u00e1s adecuada. Las soluciones empleadas para realizar las neutralizaciones de las muestras tomadas son las siguientes:

Soluci\u00f3n de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 2%

Soluci\u00f3n de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 4%

Soluci\u00f3n de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 6%

Soluci\u00f3n de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 8%

Soluci\u00f3n de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 10%

El hidr\u00f3xido de calcio empleado es el comercial que viene en bolsas de 25 kg y tiene uso diverso sobre todo es empleado en construcci\u00f3n y en la industria qu\u00edmica, cuyas especificaciones son las siguientes:



Figura 26. Hidr\u00f3xido de calcio comercial.

Especificaciones del hidr\u00f3xido de calcio comercial:

Nombre Común	Hidróxido de Calcio, Cal Hidratada, Cal Apagada.
Formula Química	Ca(OH)2.
Peso Molecular	74.10 gr./mol
Estado Físico	Polvo Sólido
Color	Blanco.
Olor	Inodoro.
Estabilidad	Reactivo.
Flamabilidad	No es Flamable.
Explosividad	No Explota.
Punto de Ignición	No Combustible.
Punto de Fusión	580°C (1076 °F) Se deshidrata a esta temperatura.
Punto de Ebullición	No Aplica.
Densidad de Vapor	No Aplica.
Solubilidad en Agua	1.650 gr/lit agua a 20°C. 100% Solubilidad en Tetracloruro de Amonio NH2Cl4.
pH	12.45 en una solución de 1% en agua a 25°C
% Volátiles	0
Densidad Relativa	0.60-0.70 kg/lit.

Fuente: ISQUISA, Corporación, 2020.

En cuando al mineral oxidado de cobre se sometió a chancado en una chancadora de quijadas de laboratorio hasta obtener partículas de 12,5 mm (malla 3/8”) que fueron seleccionadas por tamizado para eliminar todo el mineral de menor diámetro esto se hizo para que la solución de ácido sulfúrico pueda ingresar hasta el fondo de la batea y tenga contacto con todo el mineral, extrayendo de esta manera todo el cobre soluble con mucha eficiencia en el menor tiempo.



Figura 27. Mineral oxidado de cobre chancado.



Figura 28. Chancadora de quijadas de laboratorio.

2.5.4. Análisis del mineral oxidado de cobre.

Para establecer la composición química del mineral oxidado de cobre empleado en la lixiviación a partir del cual se empleó el efluente para los ensayos de neutralización con caliza, se hicieron los siguientes análisis cuantitativos:

- Análisis de cobre, por el método volumétrico
- Análisis de hierro, por método volumétrico
- Análisis de plomo, por método volumétrico
- Análisis de zinc, por método volumétrico
- Análisis de níquel, por método volumétrico
- Análisis de aluminio, por método gravimétrico
- Análisis de oro, por método gravimétrico
- Análisis de plata, por método gravimétrico.

III. RESULTADOS

3.1. Del análisis del mineral oxidado de cobre.

Tabla 1

Análisis mineralógico cualitativo del mineral

Especie mineralógica	Fórmula	Observación
Malaquita	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	+++
Azurita	$2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	+++
Tenorita	CuO	+++
Cuprita	Cu_2O	+++
Crisocola	$\text{CuO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	+
Atacamita	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$	+

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 1 muestra los resultados del análisis mineralógico cualitativo del mineral oxidado de cobre que se ha empleado en el proceso de lixiviación dinámica cuyo efluente líquido ha sido empleado para estudiar la posibilidad de neutralizar el drenaje ácido con roca liza. Como se observa en la tabla los compuestos oxidados de cobre que se encuentran en el mineral en mayor cantidad son: la malaquita, azurita, tenorita y cuprita.

Tabla 2

Composición química del mineral

Componente	Resultado
Cobre (Cu), %	8,62
Hierro (Fe), %	1,25
Níquel (Ni), %	0,15
Zinc (Zn), %	0,24
Aluminio (Al), %	0,11
Plomo (Pb), %	0,09
Oro (Au), g/t	52
Plata (Ag), g/t	21

Fuente: Datos experimentales.

La tabla 2 muestra los resultados de los análisis hechos para determinar la composición química cuantitativa del mineral oxidado de cobre empleado en el estudio, como se puede observar la ley de cobre en el mineral es 8,62%, el segundo componente importante de la muestra es el hierro (1,25%), entre otros componentes está el oro con 52g/t y plata 21g/t.

3.2. Ensayos de neutralización del drenaje ácido con Hidróxido de calcio.

Tabla 3

Tiempo de contacto y variación del pH con la solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 2%

Tiempo, horas	pH inicial	Variación del pH del efluente		
		1° celda	2° celda	3° celda
1	1,3	1,3	2,9	4,5
2	1,3	1,4	3,1	4,7
3	1,3	1,6	3,3	4,9
4	1,3	1,8	3,5	5,1
5	1,3	1,9	3,7	5,2
6	1,3	2,0	3,9	5,3
7	1,3	2,3	4,0	5,4
8	1,3	2,5	4,1	5,5
9	1,3	2,6	4,2	5,6
10	1,3	2,7	4,3	5,6

Fuente: Datos experimentales.

Velocidad de flujo del efluente: 500mL/h

La tabla 3 muestra los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre con el hidróxido de calcio al 2%, durante 10 horas a una velocidad de flujo de 500mL/h, en cada una de las celdas de tratamiento, obteniéndose un aumento del pH de 2,7 en la primera celda, 4,3 en la segunda celda y 5,6 en la tercera celda.

Tabla 4

Tiempo de contacto y variación del pH con la solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 4%

Tiempo, horas	pH inicial	Variación del pH del efluente		
		1° celda	2° celda	3° celda
1	1,3	1,4	3,0	4,7
2	1,3	1,5	3,3	4,8
3	1,3	1,7	3,5	4,9
4	1,3	1,9	3,7	5,2
5	1,3	2,1	3,9	5,4
6	1,3	2,3	4,2	5,6
7	1,3	2,5	4,3	5,7
8	1,3	2,7	4,4	5,8
9	1,3	2,8	4,5	5,9
10	1,3	2,8	4,6	6,0

Fuente: Datos experimentales.

Velocidad de flujo del efluente: 500mL/h

La tabla 4 muestra los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre con la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 4%, durante 10 horas a una velocidad de flujo de 500mL/h, en cada una de las celdas de tratamiento, obteniéndose un aumento del pH de 2,8 en la primera celda, 4,6 en la segunda celda y 6,0 en la tercera celda.

Tabla 5

Tiempo de contacto y variación del pH con la solución Ca(OH)_2 al 6%

Tiempo, horas	pH inicial	Variación del pH del efluente		
		1° celda	2° celda	3° celda
1	1,3	1,7	3,8	5,8
2	1,3	1,9	4,3	6,1
3	1,3	2,3	4,5	6,4
4	1,3	2,5	4,7	6,7
5	1,3	2,7	5,0	6,9
6	1,3	2,9	5,2	7,1
7	1,3	3,2	5,3	7,3
8	1,3	3,3	5,4	7,4
9	1,3	3,4	5,5	7,5
10	1,3	3,5	5,6	7,6

Fuente: Datos experimentales.

Velocidad de flujo del efluente: 500mL/h

La tabla 5 muestra los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre con la solución de Ca(OH)_2 al 6%, durante 10 horas a una velocidad de flujo de 500mL/h, en cada una de las celdas de tratamiento, obteniéndose un aumento del pH de 3,5 en la primera celda, 5,6 en la segunda celda y 7,6 en la tercera celda.

Tabla 6

Tiempo de contacto y variación del pH con la solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 8%

Tiempo, horas	pH inicial	Variación del pH del efluente		
		1° celda	2° celda	3° celda
1	1,3	1,9	4,5	7,1
2	1,3	2,2	4,8	7,4
3	1,3	2,4	5,2	7,8
4	1,3	2,6	5,5	8,1
5	1,3	2,9	5,8	8,4
6	1,3	3,3	6,2	8,7
7	1,3	3,7	6,4	8,9
8	1,3	3,9	6,6	9,1
9	1,3	4,2	6,7	9,2
10	1,3	4,3	6,8	9,3

Fuente: Datos experimentales.

Velocidad de flujo del efluente: 500mL/h

La tabla 6 muestra los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre con la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 8%, durante 10 horas a una velocidad de flujo de 500mL/h, en cada una de las celdas de tratamiento, obteniéndose un aumento del pH de 4,3 en la primera celda, 6,8 en la segunda celda y 9,3 en la tercera celda.

Tabla 7

Tiempo de contacto y variación del pH con la solución $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 10%

Tiempo, horas	pH inicial	Variación del pH del efluente		
		1° celda	2° celda	3° celda
1	1,3	2,2	5,1	8,3
2	1,3	2,6	5,4	8,6
3	1,3	3,0	5,7	8,9
4	1,3	3,3	6,1	9,2
5	1,3	3,5	6,4	9,5
6	1,3	3,7	6,9	9,7
7	1,3	3,9	7,2	9,9
8	1,3	4,2	7,5	10,2
9	1,3	4,5	7,8	10,4
10	1,3	4,8	8,1	10,6

Fuente: Datos experimentales.

Velocidad de flujo del efluente: 500mL/h

La tabla 7 muestra los datos obtenidos del tratamiento del drenaje ácido de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre con la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 2%, durante 10 horas a una velocidad de flujo de 500mL/h, en cada una de las celdas de tratamiento, obteniéndose un aumento del pH de 4,8 en la primera celda, 8,1 en la segunda celda y 10,6 en la tercera celda.

Tabla 8

Concentración de Ca(OH)_2 y neutralización del drenaje ácido

Muestra	Ca(OH)_2 , %	pH final- 3° celda	Observaciones
01	2	5,6	No logra neutralizar
02	4	6,0	No logra neutralizar
03	6	7,6	Después de 6 h (pH 7,1) 3° celda
04	8	9,3	Después de 1 h (pH 7,1) 3° celda
05	10	10,6	Después de 7 h (pH 7,2) 2° celda

Fuente: Datos de las Tablas 3 - 7

La tabla 8 muestra la relación entre el tipo (calidad) de la roca caliza empleada y la neutralización del drenaje ácido de los relaves, como se observa, cuanto mayor es la concentración el hidróxido de calcio, mayor capacidad de neutralización tiene. La solución al 10% que contiene una mayor concentración de hidróxido de calcio (10%) requiere de 17 horas para neutralizar el drenaje ácido hasta pH 7,2, utilizando solo dos celdas. La solución al 8% de Hidróxido de calcio requiere de 21 horas para neutralizar el drenaje ácido hasta pH 7,1 utilizando 3 celdas y la solución al 6% de hidróxido de calcio requiere de 26 horas para neutralizar el drenaje ácido hasta pH 7,1 utilizando 3 celdas.

3.4. Contrastación de la hipótesis principal.

La hipótesis principal de la presente investigación fue: **La concentración del hidróxido de calcio influye positivamente en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación**, según los datos obtenidos de los ensayos realizados con cada una de las muestras de roca caliza con distinta composición química se ha podido demostrar la validez de la hipótesis ya que al incrementarse la concentración del hidróxido de calcio en las soluciones, es mayor su capacidad para neutralizar el drenaje ácido de la lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre. El estudio de correlación entre las dos variables, indica que existe una alta correlación entre las variables “Concentración del hidróxido de calcio” y “control del drenaje ácido” con un valor numérico de 0,845 al nivel de error de 0,01, tal como se puede observar en la tabla 9, lo que quiere decir que hay un 84,5% de correlación entre ambas variables.

Tabla 9

Correlación entre las variables: Concentración del hidróxido de calcio (CHC)
y control del drenaje ácido (CDA)

		CHC	CDA
CHC	Correlación de Pearson Sig. (Bilateral) N	1 5	0,845 0,001 5
CDA	Correlación de Pearson Sig. (Bilateral) N	0,845 0,001 5	1 1 5

P** es altamente Significativa al nivel 0,01

3.5. Comprobación de las hipótesis estadísticas.

a. Validación de la hipótesis específica 01

Ho: $u_x = u_y$

La concentración de hidróxido de calcio no influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo

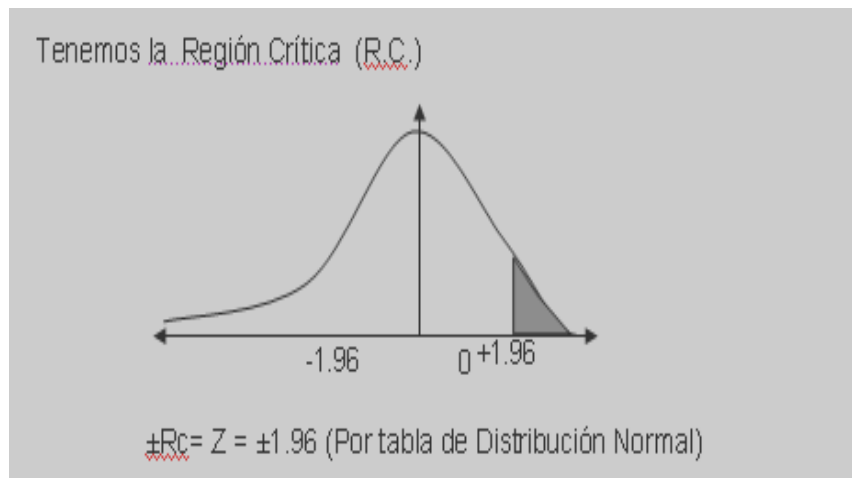
H1: $u_x > u$

La concentración de hidróxido de calcio influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo

Tabla 10.
Estadísticos de los grupos Ho

		Media	N	Desviación típ.	Error tip. De la media
Par 1	La concentración de hidróxido de calcio no influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo	6.14537	5	4.24356	.27113
	La concentración de hidróxido de calcio influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo.	4.78154	5	4.43559	.18926

La concentración de hidróxido de calcio influye y no influye .	Diferencias pareadas					Z	Sig. (Bilateral)
	Media	Desviación típ.	Error tip. De la media	97,5% intervalo de confianza para la diferencia			
				Superior	Inferior		
	1.36383	0.1237	.03681	1.36383	0.03681	2,34	.000



Como el valor de Z está fuera de la región de aceptación, entonces se rechaza la hipótesis nula, lo que quiere decir que la concentración de hidróxido de calcio influye en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, neutralizándolo

b. Validación de la hipótesis específica 02

Ho: $\mu_x = \mu_y$

El control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación no disminuye la contaminación del medio ambiente.

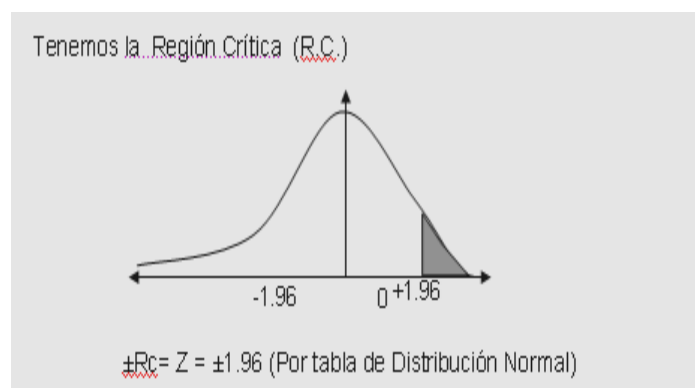
H1: $\mu_x > \mu$

El control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación disminuye la contaminación del medio ambiente.

Tabla 11
Estadísticos de los grupos H1

		Media	N	Desviación típ.	Error tip. De la media
Par 1	El control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación no disminuye la contaminación del medio ambiente.	5,32471	5	1,34123	.37835
	El control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación disminuye la contaminación del medio ambiente.	4.21224	5	1.53642	.256732

Disminuye la contaminación del medio ambiente y no disminuye la contaminación del medio ambiente.	Diferencias pareadas					Z	Sig. (Bilateral)
	Media	Desviación típ.	Error tip. De la media	97,5% intervalo de confianza para la diferencia			
				Superior	Inferior		
	1.11247	.26547	.15346	1.11247	.15346	2,34	.000



Las pruebas estadísticas demuestran que para este caso Z es un valor superior a +1,96, por lo que se encuentra fuera de la región de aceptación, motivo por el cual se rechaza la hipótesis negativa y se acepta que el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación disminuye la contaminación del medio ambiente.

IV. DISCUSIÓN

La finalidad de esta tesis evaluar la capacidad de las soluciones de hidróxido de calcio de diferentes concentraciones en el proceso de neutralización del drenaje ácido que se genera en los reservorios donde se almacena el relave resultante de la lixiviación de los minerales oxidados de cobre. Para ello se llevaron a cabo ensayos que involucraron la realización de la lixiviación dinámica (agitada) del mineral pulverizado hasta malla #325 granulometría con la que se logró que, a una velocidad de agitación de 1000 rpm, tanto el mineral como la solución ácida formen una emulsión perfecta que permite una extracción rápida y eficiente del cobre soluble presente en la muestra. Terminada de la lixiviación se separó el sulfato de cobre formado quedando el relave con una humedad del 12% como mínimo, lo cual se consigue dejando el reposo el relave en la cubeta que simula la relavera, donde se separa el sulfato de cobre residual y que constituye el efluente líquido que debe ser neutralizado. Este efluente líquido contiene generalmente agua que se adiciona para lavar el relave y arrastrar el sulfato de cobre que queda adherido a la superficie de las partículas minerales después de la separación. Este efluente líquido tiene como mínimo un pH 1,3.

Para evaluar la variación del pH al agregar el agua de lavado se hicieron pruebas con ciertas cantidades de agua que simularon a lluvia que en épocas de precipitación cae sobre las relaveras rebosándolas y arrastrando el agua ácida más allá de los canales de escorrentía que generalmente está protegido con geomembrana, el pH de esta agua continua con un pH ácido que sube a 2,1, este valor está considerado para el drenaje ácido.

El hidróxido de calcio que se empleó para la neutralización fue de varias concentraciones: 2, 4, 6, 8 10%. Estas soluciones se llenaron en tres celdas, en cada caso las tres celdas se llenan con la solución con la misma concentración, se dejó pasar el efluente ácido el cual en cada una de las celdas ingresa por la parte inferior y va subiendo hasta salir por la parte superior (esto se hizo para lograr turbulencia) y luego ingresa a la segunda y de la misma manera a la tercera si es necesario, es decir, si no alcanza el pH 7 o más de 7. El flujo del drenaje ácido que circula por las celdas se reguló a 500mL/h, siendo este valor el promedio de penetración de los líquidos a través de las capas del suelo franco (que contiene una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla) que no son muy compactos y dejan pasar el agua con relativa facilidad.

Los resultados obtenidos en los ensayos indican que cuando la solución de hidróxido de calcio tiene una concentración inferior al 6%, no tiene capacidad para neutralizar en su totalidad el drenaje ácido a la velocidad de flujo establecida, tal como se ha podido comprobar con las soluciones al 2 y 4% las cuales en tres celdas y en 30 horas no lograron neutralizar el drenaje ácido. La solución que tiene una concentración del 6%, los ensayos de neutralización con esta solución permiten lograr el objetivo (pH 7,1) después de 26 horas cuando el drenaje ácido circula durante 6 horas por la tercera celda. La solución de hidróxido de calcio al 8% tiene una mejor calidad y su capacidad para

neutralizar el drenaje ácido es mayor, logrando dicho objetivo en 21 horas cuando el drenaje circula en la tercera celda durante una hora. En el caso de la solución con una concentración de 10% de hidróxido, la neutralización se logró en la segunda celda a las 17 horas. Estos datos permiten concluir que la neutralización del drenaje ácido es más rápida cuando mayor es la concentración de la solución de hidróxido de calcio.

V. CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se ha comprobado que la concentración de las soluciones de hidróxido de calcio influye directamente en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación de minerales oxidados de cobre, cuanto mayor es el contenido de hidróxido de calcio es mayor su capacidad para neutralizar el drenaje ácido.
2. La concentración del hidróxido de calcio mayor al 6% influye positivamente en el control del drenaje ácido generado en relaveras de lixiviación, permitiendo su neutralización, en el transcurso de su paso por las celdas donde se encuentra la solución de Ca(OH)_2 .
3. El control del drenaje ácido con el hidróxido de calcio genera el sulfato de calcio el cual es poco soluble en agua y mínimamente contaminante e incluso se emplea en la agricultura. Por tanto, el producto de la reacción entre el ácido sulfúrico y el hidróxido de calcio, es el sulfato de calcio o yeso, una sustancia muy usada en la construcción, lo cual corrobora que su producción en las celdas de neutralización no ofrece peligro de contaminación para el medio ambiente.

VI. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer ensayos con hidróxido de calcio de diferente concentración para establecer parámetros que permitan su uso masivo en el tratamiento de drenajes ácidos de cualquier tipo que se generan en la minería.
2. En función a los resultados obtenidos en esta tesis se recomienda construir en el perímetro de las relaveras que almacenan relaves de la lixiviación ácida de minerales oxidados de cobre, pozas de determinadas dimensiones que se deben de rellenar con soluciones de hidróxido de calcio a fin de crear una contención para neutralizar el fluido ácido que se rebosa en la época de lluvias y evitar el drenaje ácido.

VII. FUENTES DE INFORMACIÓN.

- [1] G. Zamora y P. Gorriti, “Propuesta de Tratamiento de las Aguas Ácidas de la Mina Milluni Mediante Drenes Anóxicos Calizos”. Bolivia, Artículo científico, Revista Metalúrgica Universidad Técnica de Oruro, 2017
- [2] J. Sánchez y J. Ferreira, “Drenajes Ácidos de Mina Alternativas de Tratamiento”. Colombia, Artículo, Revista de Medio Ambiente y Minería 2015, 1, 20–33.
- [3] A. Cervantes, “Caracterización del Drenaje Ácido y de las Rocas Asociadas a una Mina para Evaluar su Posible Aplicación en un Sistema de Tratamiento Pasivo”, México, tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [4] F. Sucupuca, et al. “Medidas de Remediación de las Aguas del Embalse Pasto Grande, Moquegua – Perú”, Artículo, Revista Ciencia y Tecnología para el Desarrollo. UJCM, 2017, 3(5), 83–90
- [5] G. Palma. “Evaluación del Funcionamiento de un Biorreactor Pasivo Utilizando Bacterias Sulfato-Reductoras para el Tratamiento de Drenajes Ácidos de Mina”, Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 2018.
- [6] J. Bejarano y M. Estacio. “Propuesta de Tratamiento de Drenes Anóxico Calizo Combinado con Humedal en la Mina Michiquillay Encañada, 2019”, Tesis, Perú, Universidad Privada del Norte, 2019.
- [7] F. Huisa, “Análisis de las Concesiones Mineras y la Actividad Minera Informal a Pequeña Escala de la Región Puno y su Implicancia en la Gestión Ambiental y Social” Perú, Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, 2019.
- [8] C. Jiménez. “Eficiencia en la remoción del tratamiento de aguas ácidas de mina, mediante neutralización activo con Lechada de Cal de la Unidad Minera”, Tesis de grado, Perú, Universidad Peruana Unión, 2020.
- [9] A. Kirschbaum y J. Murray, “Minería y Aguas Ácidas: Contaminación y Prevención”. Charla, Museo de Ciencias Naturales y Facultad de Ciencias Naturales unas, 2017.
- [10] A. López, “Pruebas de Tratamiento de Drenaje Ácido en un Sistema Continuo de Celdas con Rocas Filita y Caliza”, Tesis de grado, México, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- [11] Caliza, Fotos y videos actuales, yacimientos de piedra caliza, 2020.
- [12] S. Gonzales y K. Ticona, “Evaluación de la influencia de la granulometría de piedra caliza, concentración de carbonato de calcio, tiempo de residencia y temperatura de calcinación para mejorar el rendimiento en la obtención de óxido de calcio (cal viva)”, Tesis, Perú, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, 2016.

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Métodos de análisis de aguas ácidas

A. CONDUCTIVIDAD.

EQUIPO: Conductímetro HACH.

PROCEDIMIENTO:

Los envases empleados en los ensayos deben estar totalmente limpios de huellas dactilares. Se enciende el aparato, se ajusta a escala correspondiente y se selecciona el patrón más adecuado, el mismo que se agita y se coloca en la celda de medición. Se mueve la aguja de la perilla de ajuste "Standardize" hasta obtener el valor de conductividad en la escala. Se saca la muestra patrón y se coloca la muestra problema, hacer la lectura correspondiente.

B. CLORUROS.

PROCEDIMIENTO.

Se vierte 100mL de la muestra en un Erlenmeyer y en otro 100mL de agua destilada (libre de cloruros) que servirá como testigo para la comparación. Si la muestra es coloreada se decolora con 3mL de solución de hidróxido de aluminio. Después de unos 10 minutos se filtra y lava con 10 a 15mL de agua destilada. Si la muestra contiene sulfuro o tiosulfato, se alcaliniza a la fenolftaleína con solución de hidróxido de sodio. Se agrega 1 mL de peróxido de hidrógeno y se agita. Se neutraliza con ácido sulfúrico.

TITULACIÓN.

Se echa unas gotas de fenolftaleína y se ajusta a un ligero color rosado (pH entre 7-10) agregando ácido sulfúrico o hidróxido de sodio según sea necesario. Se agrega 1mL de K_2CrO_4 . Se titula con la solución valorada de nitrato de plata hasta que aparezca una coloración amarillo-rojiza. Se determina el gasto de titulante de la muestra testigo, siguiendo el método de titulación descrito.

CÁLCULO.

$$Cl = \frac{(\text{mL AgNO}_3 (\text{muestra}) - \text{mL AgNO}_3 (\text{testigo})) \times \text{Nor. AgNO}_3 \times 35,46 \times 1,000}{\text{mL de la muestra}} = \text{mg/L.}$$

C. pH.

PROCEDIMIENTO:

- a) Tome la muestra de agua que se desea analizar.
- b) El ajuste y calibración del aparato se efectúa según el procedimiento indicado en el manual del fabricante. En forma general se puede proceder de la siguiente manera:
 - Enjuague el electrodo con agua destilada.

- Coloque el corrector manual térmico en el valor de temperatura que tiene la muestra de agua.
 - Introducir el electrodo en la solución buffer seleccionada y mueva el botón de encendido hasta la posición de pH.
 - Lleve la aguja del medidor al valor de pH que corresponde a la solución buffer según la temperatura, moviendo el botón de calibración en el sentido de las manecillas del reloj o viceversa.
 - Regrese el botón de encendido a posición apagado.
 - Lavar y enjuagar el electrodo con agua destilada.
- c) Determine el pH de la muestra de agua de la siguiente manera:
- Introducir el electrodo en la muestra y colocar el botón de encendido en la posición de pH.
 - Leer el pH de la muestra; esperar a que el electrodo alcance el equilibrio (30 segundos).
 - Regresar el botón de encendido a posición apagado.
 - Enjuagar el electrodo con agua destilada y mantenerlo sumergido mientras no funcione.
 - El valor de pH se lee directamente en la pantalla del potenciómetro.

D. DUREZA TOTAL.

(Método: titulación con EDTA).

PROCEDIMIENTO:

- a) Se toman 50 mL de la muestra, se agrega 1 mL de solución amortiguadora.
- b) Se adicionan posteriormente 4 gotas de la solución indicadora.
- c) Se titula con EDTA.

Si en la titulación no se consigue un viraje preciso de color, hay que agregar el inhibidor. El tiempo no debe exceder los 5 minutos, a partir de cuando se agrega la solución amortiguadora.

CALCULO:

Dureza total (DT) como mg/L carbonato de calcio, se calcula con la fórmula: $DT = \text{mL EDTA} \times 20$.

E. SULFATOS.

PROCEDIMIENTO:

- a) Filtre la muestra hasta obtener un filtrado sin turbiedad.
- b) Tome 50mL de la muestra filtrada en un Erlenmeyer de 250mL y agregue 5mL de solución acondicionadora. Mezcle bien y agregue una cucharadita de cloruro de bario, agite suavemente por 1 minuto y deje reposar 4 minutos.

- c) Haga la lectura en el turbidímetro y obtenga la concentración de sulfato en la tabla del turbidímetro.

CALCULO:

$$\text{mg/L de SO}_4 = \frac{\text{mg de SO}_4 \times 1000}{\text{mL de muestra}}$$

Anexo2: Hoja de seguridad del hidróxido de calcio.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(NCH 2245. OF 2015)

CALCIO HIDROXIDO P.A.
CA-0530

CALCIO HIDROXIDO P.A.

SECCION 1: IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO Y DE LA EMPRESA

Identificación del producto químico	Calcio Hidróxido P.A.
Código	CA-0530
Usos recomendados	Aplicaciones técnicas (análisis químico), Industria Química en general, Docencia.
Nombre del proveedor	WINKLER LTDA.
Dirección del proveedor	El Quilay 468, Parque Industrial Valle Grande Lampa, Santiago / Chile.
Número de teléfono del proveedor	+562 24826500
Número telefónico de emergencias Químicas en Chile (CITUC)	+562 22473600
Número telefónico de emergencias Toxicológica en Chile (CITUC)	+562 26353000
Dirección electrónica del proveedor	www.winklerltda.com

SECCION 2: IDENTIFICACION DE LOS PELIGRO

Clasificación según NCH382 / NCH2190	Clasificación según GHS
IRRITANTE	
NO CLASIFICADO	
Señal de seguridad según Nch1411H	Clasificación específica
 CLASIFICACION DE RESGOS 0 = No especial 1 = Ligero 2 = Moderado 3 = Severo 4 = Extremo NORMA MPPA 2-6-0	Código Almacenaje Winkler Verde: Normal
Descripción de peligros y sus efectos	
Inhalación	Irritaciones. En la nariz y tracto respiratorio superior. Tos y dificultad respiratoria. Bronquitis crónica
Contacto con la piel	Irritaciones. Posibles quemaduras.
Contacto con los ojos	Irritaciones. Posibles quemaduras y ulceraciones. En casos severos posible daño permanente.
Ingestión	Neclivo de baja toxicidad. Irritaciones y posibles quemaduras en la boca, esófago y estómago. Ulceraciones en esófago Vómitos, diarrea y severo dolor abdominal. Colepsio. DL50 (oral - rata): 7340 mg/kg. DL50 (oral - ratón): 7300 mg/kg.

SECCION 3: COMPOSICION / INFORMACION DE LOS COMPONENTES

Formula Química	Ca(OH) ₂
Concentración	95,0%
Peso molecular	74,09 g/mol
Sinónimos	Hidróxido de Calcio, Cal Apagada
Número CAS del producto	1305-62-0
Número UN	Sin datos disponibles

SECCION 4: PRIMEROS AUXILIOS

En caso de contacto accidental con el producto proceder de acuerdo con:	
Inhalación	Trasladar a la persona donde exista aire fresco. Si respira dificultosamente se debe suministrar Oxígeno.
Contacto con la piel	Lavar con Agua, a lo menos por 5 minutos. Usar de preferencia una ducha de emergencia. Sacarse la ropa contaminada. De haber irritación consultar al médico
Contacto con los ojos	Lavarse con abundante Agua en un lavadero de ojos, entre 5 minutos como mínimo, separando los párpados. De continuar irritación, Consultar al oftalmólogo.
Ingestión	Lavar la boca con bastante agua, Hacer beber agua (máximo 2 vasos). consultar a un médico en caso de persistir molestia
Principales síntomas y efectos agudos y retardados	Irritación y corrosión, tos, insuficiencia respiratoria. Riesgo de turbidez en la córnea, riesgo de lesiones oculares graves. ¡riesgo de ceguera!
Protección de quienes brindan los primeros auxilios	Usar equipo de protección personal adecuado
Notas especiales para un médico tratante	No hay información disponible



SECCION 5: MEDIDAS PARA LUCHA CONTRA INCENDIO

Agentes de extinción	Usar medidas de extinción que sean apropiadas a las circunstancias del local y a sus alrededores. Usar agua pulverizada, espuma, polvo seco o dióxido de carbono.
Agentes de extinción inapropiados	No existen limitaciones de agentes extinguidores para esta sustancia/mezcla.
Productos que se forman en la combustión y degradación térmica	Monóxido y dióxido de carbono.
Peligros específicos asociados	No combustible. En caso de incendio posible formación de gases de combustión o vapores peligrosos.
Métodos específicos de extinción	Usar agua pulverizada, espuma, polvo seco o dióxido de carbono. Agua pulverizada para enfriar los contenedores.
Precauciones para el personal de emergencia y/o los bomberos	Use un equipo de respiración autónoma para la lucha contra el fuego.

SECCION 6: MEDIDAS QUE SE DEBEN TOMAR EN CASO DE DERRAME ACCIDENTAL

Precauciones personales	Evitar la inhalación de los vapores aerosoles.
Equipo de protección	Usar ropa adecuada, equipo de protección personal.
Procedimientos de emergencia	Evacue el área de peligro, respetar los procedimientos de emergencia, consultar con expertos.
Precauciones medioambientales	No dejar que el producto entre al alcantarillado.
Métodos y materiales de contención, confinamiento y/o abastecimiento	Cubrir las alcantarillas, recoger en seco evitando la formación de polvo y proceder a la eliminación de residuos. Impedir la contaminación de las aguas superficiales o subterráneas por el agua que ha servido a la extinción de incendios.
Métodos y materiales de limpieza	
Recuperación	Recoger con material adecuado.
Neutralización	No hay información disponible.
Disposición final	No hay información disponible.
Medidas adicionales de prevención de desastres	No hay información disponible.

SECCION 7: MANIPULACION Y ALMACENAMIENTO

Manipulación	
Precauciones para la manipulación segura	Observar las indicaciones de la etiqueta. No inhalar la sustancia. Evitese generación de polvo.
Medidas operacionales y técnicas	Proteger contra el daño físico. Guardar bien cerrado y seco.
Otras precauciones	Sustituir ropa contaminada. Lavar cara y manos al término del trabajo.
Prevención del contacto	Mantener los envases cerrados y debidamente etiquetados.
Almacenamiento	
Condiciones para el almacenamiento seguro	Zona general de almacenaje de reactivos y soluciones químicas. Almacenamiento en bodegas y/o cabinas, diseñadas para contener productos químicos. Lugar frío, seco y con buena ventilación. Disponer de algún medio de contención de derrames. Acceso controlado y señalización del riesgo.
Medidas técnicas	Mantener alejado de condiciones y sustancias incompatibles. Proteger contra el daño físico. Tener los envases cerrados y debidamente etiquetados.
Sustancias y mezclas incompatibles	Almacenar alejado de condiciones y productos incompatibles.
Material de envase y/o embalaje	Se recomienda contener en recipiente de vidrio o plástico apropiado con cierre hermético. No emplear recipientes de metales ligeros.

SECCION 8: CONTROL DE EXPOSICION / PROTECCION ESPECIAL

Concentración máxima permisible	No contiene sustancias con valores límites de exposición profesional.
Elementos de protección personal	Trabajar en un lugar con buena ventilación natural o forzada. Aplicar procedimientos de trabajo seguro. Capacitar respecto a los riesgos químicos y su prevención. Contar con ficha de seguridad química del producto y conocer su contenido. Mantener los envases con sus respectivas etiquetas. Respetar prohibiciones de no fumar, comer y beber bebidas en el lugar de trabajo. Utilizar elementos de protección personal asignados.
Protección respiratoria	Aplicación de protección respiratoria necesaria en presencia de polvo y en caso de sobrepasarse alguno de los límites permisibles normados. Filtro P2. En caso de sobrepasarse el nivel IDLH, ambientes con concentración desconocida o situaciones de emergencia, debe utilizarse sistema de respiración autónoma.
Protección de manos	Utilización de guantes de Butilo, Nitrilo, Viton, Neopreno y/o PVC.
Protección de ojos	Uso de lentes de seguridad ajustados al contorno del rostro, resistentes contra salpicaduras y proyecciones de la sustancia química.
Protección de la piel y el cuerpo	Ropa adecuada. Utilizar calzado cerrado, no absorbente, con resistencia química y de planta baja.
Medidas de ingeniería	Esta información no está disponible.



HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(NCH 2245, Of 2015)

CALCIO HIDROXIDO P.A.
CA-0530

SECCION 9: PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS

Estado físico	Sólido
Apariencia	Blanco
Olor	Inodoro
pH concentración y temperatura	12,8 a 20°C (solución saturada)
Temperatura de ebullición	No reportado
Temperatura de fusión	550 °C (descomposición)
Temperatura de descomposición	550 - 600°C
Temperatura de ignición	No reportado
Temperatura de inflamación	No reportado
Densidad	2,24 g/cm ³ a 20°C
Densidad Aparente	Aprox 400 kg/m ³
Presión de vapor a 20°C	No aplicable
Densidad Aparente	No reportado
Solubilidad	1,7 g/l a 20°C. Soluble en soluciones Ácidas, Glicerol y Amónico. Insoluble en Alcohol Etílico

SECCION 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad	Sensible a la humedad
Condiciones que se deben evitar	Altas temperaturas, humedad
Incompatibilidad (materiales que deben evitarse)	Reacción exotérmica con: Hidrógeno Sulfuro, Metales ligeros, Fósforo, Nitrocompuestos Orgánicos, Ácidos. Riesgo de Explosión con: Anhídridos. Materiales incompatibles: Metales ligeros
Polymerización peligrosa	No ocurre
Productos peligrosos de la descomposición y combustión	Óxido de Calcio, Calcio Carbonato

SECCION 11: INFORMACION TOXICOLOGICA

Toxicidad aguda	DL50 (oral, rata): 7340 mg/kg (Iritación gastrointestinal) Toxicidad aguda por inhalación (Iritación de las mucosas, tos, insuficiencia respiratoria, perjudica las vías respiratorias)
Toxicidad crónica aguda	Información no disponible
Lesiones oculares graves/irritación ocular	Fuerte irritación, riesgo de turbidez en la córnea, riesgo de ceguera/ Provoca lesiones oculares graves.
Sensibilización respiratoria o cutánea	Información no disponible
Toxicidad reproductiva	Información no disponible
Toxicidad específica en órganos particulares - exposición única	Puede irritar las vías respiratorias
Toxicidad específica en órganos particulares - exposiciones repetidas	Información no disponible
Teratogenicidad	Información no disponible
Peligro de Inhalación	Información no disponible
Toxicocinética	Información no disponible
Metabolismo	Información no disponible
Distribución	Información no disponible
Patogenicidad e infecciosidad aguda (oral, dérmica e inhalatoria)	Información no disponible
Disrupción endocrina	Información no disponible
Inmunotoxicidad	Información no disponible

SECCION 12: INFORMACION ECOLOGICA

Ecotoxicidad (EC, IC y LC)	Toxicidad para los peces CL50 Gambusia affinis (pez moaquito): 160 mg/l, 96h
Persistencia y degradabilidad	No aplicable a sustancias inorgánicas
Potencial bioacumulativo	No aplicable
Movilidad en suelo	No hay información disponible



**HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD
(NCH 2245. Of 2015)**

CALCIO HIDROXIDO P.A.
CA-0530

SECCION 13: INFORMACIÓN SOBRE DISPOSICION FINAL

Residuos	En general, los residuos químicos una vez que se acondicionen de forma tal de ser inocuos para el medio ambiente, se pueden eliminar a través de las aguas residuales o en un vertedero autorizado. Otra posibilidad, es disponer los residuos directamente a un vertedero autorizado para confinarlos. Estos deben estar en contenedores adecuados, cerrados y debidamente etiquetados. Es importante considerar para la eliminación de residuos, que se realice conforme a lo que disponga la autoridad competente respectiva, solicitando previamente la autorización correspondiente.
Envase y embalaje contaminados	Maneje los recipientes como el propio producto
Material contaminado	Maneje el material contaminado como el propio producto

SECCION 14: INFORMACION SOBRE EL TRANSPORTE

	Modalidad de transporte		
	Terrestre	Marítima	Aérea
Número NU	No regulado	No regulado	No regulado
Designación oficial de transporte	No regulado	No regulado	No regulado
Clasificación de peligro primario NU	No regulado	No regulado	No regulado
Clasificación de peligro secundario NU	No regulado	No regulado	No regulado
Grupo de embalaje/envase	No regulado	No regulado	No regulado
Peligros ambientales	No regulado	No regulado	No regulado
Precauciones especiales	Producto no peligroso para el transporte	Producto no peligroso para el transporte	Producto no peligroso para el transporte
Transporte a granel de acuerdo con MARPOL 73/78, Anexo II, y con IBC Code	No relevante		

SECCION 15: INFORMACION REGLAMENTARIA

Regulaciones nacionales	NCH2245 - Hoja de datos de seguridad para productos químicos. NCH382 - Transporte terrestre de sustancias peligrosas - Clasificación general. NCH2190 - Transporte de sustancias peligrosas - Distribivos para la identificación de riesgos. NCH1411/4 - Señales de seguridad para la identificación de riesgos. D.S. 594 - Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales básicas en los lugares de trabajo. D.S. 290 - Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. D.S. 140 - Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. D.S. 43 - Almacenamiento de sustancias peligrosas.
El receptor debería verificar la posible existencia de regulaciones locales aplicables al producto químico	

SECCION 16: OTRAS INFORMACIONES

Considerando que el uso de esta información y de los productos está fuera del control del proveedor, Winkler Ltda. No asume responsabilidad alguna por este concepto. Determinar las condiciones de uso seguro del producto es obligación del usuario.	
Control de cambios	Esta versión de HDS corresponde a la versión 03 de 09/2016. Se han incorporado cambios según NCH2245 Of 2015 en las secciones 1 a la 16 con respecto a versión anterior (NCH245 Of 2003)
Abreviaturas y acrónimos	CAS: Chemical Abstract Service Registration Number (Número de registro no Chemical Abstract Service) ACGIH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales) TWA: Time Weighted Average (Promedio ponderado en el tiempo) STEL: Short Term Exposure Limit (Límite de exposición Corto Plazo) LD50: Lethal Dose, 50% (Dosis letal, 50%) LC50: Lethal Concentration, 50% (Concentración letal, 50%) EC50: Effect Concentration, 50% (Concentración Efecto, 50%) NOEL: No Observed Effect Level (Nivel Sin Efecto Observado) COD: Chemical Oxygen Demand (Demanda Química de Oxígeno) BOD: Biochemical Oxygen Demand (Demanda bioquímica de oxígeno) TOC: Total Organic Carbon (Carbono orgánico total) IATA: International Air Transport Association (Asociación Internacional de Transporte Aéreo) IMDG: International Maritime Dangerous Goods Code (Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas)
Referencias	Hojas de datos de seguridad de las materias.