



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCVELICA



USO DEL AMONIO CUATERNARIO

EN LA SEPARACIÓN DE COBRE
Y RECUPERACIÓN DE CIANURO
EN LA EXTRACCIÓN DE METALES
POR LIXIVIACIÓN

Camilo Poma
Víctor Guevara

DOI: 10.35622/inudi.b.136

Uso del amonio cuaternario en la separación de cobre y recuperación de cianuro en la extracción de metales por lixiviación

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.136>

Camilo Poma

Universidad Nacional de Huancavelica
<https://orcid.org/0000-0002-8527-809X>
javier.poma@unh.edu.pe

Victor Guevara

Universidad Nacional del Centro del Perú
<https://orcid.org/0000-0003-1124-4361>
pguevara@uncp.edu.pe



UNIVERSIDAD NACIONAL DE
HUANCAMELICA



Uso del amonio cuaternario en la separación de cobre y recuperación de cianuro en la extracción de metales por lixiviación

Autores:

Javier Camilo Poma Palacios

Pascual Victor Guevara Yanqui

Primera edición digital

Publicado en Puno, abril de 2024

Libro electrónico disponible en:

<https://editorial.inudi.edu.pe>

ISBN: 978-612-5130-27-3 (PDF)

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú N° 2023-12946

DOI: <https://doi.org/10.35622/inudi.b.136>

Categoría: Libro de resultado de investigación científica.

CONSEJO EDITORIAL

Director: Lic. Sergio Antonio Flores Vargas

Editor Jefe: Eddy Rodrigo Gonzales Huaman

Editores:

Dra. Bethzabe Cotrado Mendoza / Dra. Manuela Daisly Casa Coila / Dr. Edgar Estanislao Mancha Pineda / Dra. Luz Wilfreda Cusi Zamata / MSc. Rebeca Alanoca Gutiérrez / Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo / Dra. Yolanda Lujano Ortega / Dra. Sheyla Lenna Cervantes Alagón / Dra. Dometila Mamani Jilaja / Dr. Peregrino Melinton Lopez Paz / Dra. Nina Eleonor Vizcarra Herles / Mg. Lourdes Antonieta López Cueva / Dr. Carlos Alfredo Castro Quispe / Dr. Edgar Darío Callohuanca Avalos / Dra. Diana Águeda Vargas Velásquez / MSc. Yésica Dominga Díaz Vilcanqui / Dra. Tania Carola Padilla Cáceres / Patty Samanta Aza Suaña.

Editado por:

Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú S.A.C.

Urb. Ciudad Jardín Mz. B3 Lt. 2, Puno - Perú

RUC: 20608044818

Email: editorial@inudi.edu.pe / info@inudi.edu.pe

Teléfono: +51 973668341

Sitio web: <https://editorial.inudi.edu.pe>

Universidad Nacional de Huancavelica

Av. Agricultura N° 319 - 321. Sector - Paturpampa, Huancavelica - Perú

RUC: 20168014962

Email: tramitedocumentario@unh.edu.pe

Teléfono: 067- 451551

Sitio web: <https://www.unh.edu.pe/>

Publicado en Perú / Posted in Peru



Esta obra está bajo una licencia CC BY-NC-SA 4.0 DEED Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

Evaluación de contenido: Esta obra ha sido evaluada por pares doble ciego, aprobada por el Consejo Editorial del Instituto Universitario de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú y editada bajo procedimientos que garantizan su normalización.

Los autores son moral y legalmente responsables de la información expresada en este libro, así como del respeto a los derechos de autor; por lo tanto, no comprometen en ningún sentido a la editorial.

Declaración conflictos de interés:

Los autores de esta publicación declaran la inexistencia de conflictos de interés de cualquier índole con instituciones o asociaciones comerciales.

Financiamiento:

Publicación financiada por la Universidad Nacional de Huancavelica como resultado de un concurso promovido por el Vicerrectorado de Investigación, durante el año fiscal 2023.

Información adicional:

Este libro es producto de la tesis "Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales" presentada a la Universidad Nacional del Centro del Perú.



Director Ejecutivo

Dr. Wilson Gregorio Sucari Turpo

Director Académico

Lic. Sergio Antonio Flores Vargas

Director de Investigación

Dr. Pedro Carlos Huayanca Medina

Director de Innovación y Transferencia Tecnológica

Lenin López Yucra

Revisores Pares Externos

Se encuentra en el siguiente enlace:

<https://editorial.inudi.edu.pe/index.php/editorialinudi/about/editorialTeam>

Contribución de autores

Nombre del autor	Rol	Descripción
<p>Javier Camilo Poma Palacios (Autor principal)</p>	<p>Conceptualización, software metodología, validación, análisis formal, investigación, supervisión, recursos, escritura - borrador original, escritura - revisión y edición, visualización, supervisión, administración del proyecto</p>	<p>Lideró el equipo de investigación, definió los objetivos del estudio, recopiló los datos, analizó los resultados y redactó el manuscrito, tomó datos en campo; realizó revisiones bibliográficas y consolidó el marco teórico. Proporcionó los materiales de laboratorio necesarios para las pruebas.</p>
<p>Pascual Víctor Guevara Yanqui (Coautor)</p>	<p>Conceptualización, análisis formal, metodología, revisión, supervisión.</p>	<p>Participó en la formulación de ideas, desarrollo y/o diseño de Realizó los análisis estadísticos y las pruebas para la comprobación de las hipótesis y el diseño y presentación de tablas y figuras.</p>

DEDICATORIA

Con intensa gratitud a mis padres, Mario Poma Camarena (+) y Lidia Julia Palacios Laurente. Su amor y sabiduría me han inculcado los valores de responsabilidad y perseverancia. No han escatimado esfuerzos para apoyarme en cada etapa de mi vida. Han sido mis motivadores incansables y han depositado su confianza en mí de manera inquebrantable.

A mi amada esposa, Gloria Esther Allasi Pari, le agradezco profundamente por su dedicación incondicional a nuestra familia, su comprensión ejemplar, su constante apoyo y su paciencia durante los momentos más desafiantes de mi vida.

A mis adorables hijos, Anthony Camilo, y Mónica Alexandra, por todo el amor que entregan y su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

A mis queridos hermanos, Juan Carlos, Marlene, Rosa Julia, Lourdes Elena, Berenyse, Yelena y Cindy, quiero agradecerles por el amor que me han brindado a lo largo de los años, así como por estar siempre conmigo. Cada uno de ustedes ha sido un ejemplo para mí, con sus esfuerzos, sus sueños y sus valores. Me siento orgulloso de ser parte de esta familia y de haber vivido tantas experiencias juntos. Espero que sigamos siendo unidos y que podamos celebrar muchos más momentos felices. Este texto es un pequeño tributo a todos ustedes, que son mi mayor inspiración y mi mayor apoyo.

Mi reconocimiento al Dr. Pascual Víctor Guevara Yanqui, que me brindó su sabia asesoría y orientación durante todo el proceso de investigación y escritura de este libro. Su experiencia y generosidad han sido invaluable para mí. Gracias a su apoyo y confianza, he podido culminar con éxito este proyecto.

Asimismo, quiero extender mi gratitud a todos los dedicados al campo de la ingeniería, cuyo incansable esfuerzo y compromiso diario contribuyen enormemente a la mejora de nuestra sociedad. Su labor es un pilar fundamental en el avance y progreso de la humanidad. Los ingenieros son los creadores de soluciones innovadoras y sostenibles para los problemas más complejos que enfrentamos. Desde la biotecnología, la informática hasta la robótica, los ingenieros aplican sus conocimientos científicos y técnicos para mejorar la calidad de vida de las personas y el medio ambiente. Gracias a su trabajo, podemos disfrutar de infraestructuras más seguras, de tecnologías más eficientes, de productos más accesibles y de servicios más personalizados. Quiero agradecerles por su dedicación, su pasión y su profesionalismo, que los convierten en los verdaderos héroes de nuestro tiempo. Los ingenieros son la luz que ilumina el camino hacia el futuro.

Contenido

SINOPSIS.....	13
ABSTRACT.....	14
PRÓLOGO.....	15
INTRODUCCIÓN.....	17

CAPÍTULO I

EL CIANURO EN PROCESOS DE LIXIVIACIÓN DE ORO

1.1 Información general del oro.....	20
1.2 Presencia del oro en la naturaleza.....	22
1.3 Estado actual de la extracción de cobre de soluciones cianuradas.....	24
1.4 Procesos de lixiviación de oro.....	26
1.5 Fundamentos del proceso de cianuración	29
1.5.1 Pérdida de cianuro durante la lixiviación	31
1.6 Proceso de disolución del oro en soluciones cianuradas.....	32
1.7 Efecto de las especies de cianuro de cobre.....	35
1.8 Interacción del cobre con soluciones cianuradas	37
1.8.1 Deposición del oro de la solución cianurada	38
1.8.2 Tratamiento de las soluciones cianuradas	39
1.9 Interacción del cobre con soluciones cianuradas	41
1.10 Tecnologías limpias.....	46
1.11 Producción sin residuos y tecnologías limpias	47

CAPÍTULO II

AMONIO CUATERNARIO

2.1 Amonio cuaternario	50
2.2 Remoción de cobre de soluciones cianuradas	51
2.2.1 Recuperación de cobre y cianuro	53
2.2.2 Disolución del oro y supresión del cobre	54
2.2.3 Tratamiento de un mineral rico en cobre y oro.....	55

CAPÍTULO III

USO DEL AMONIO CUATERNARIO EN LA SEPARACIÓN DE COBRE Y RECUPERACIÓN DE CIANURO

3.1 Razones de la investigación	58
3.2 Objetivo de la investigación	59
3.3 Método, diseño y tipo de investigación	59
3.4 Consideraciones éticas	64
3.5 Resultados de la investigación.....	65
3.5.1 Características de la solución sintética de cianuro	65
3.5.2 Influencia de factores	67
3.6 Discusión de resultados	78

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1 Conclusiones	83
4.2 Recomendaciones	84
4.3 Reflexiones.....	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87

Índice de tablas

Tabla 1 Niveles máximos y mínimos de los factores	29
Tabla 2 Constantes de equilibrio	43
Tabla 3 Remoción de cobre con sales de amonio cuaternario	51
Tabla 4 Niveles máximos y mínimos de los factores	60
Tabla 5 Sustancias empleadas para la preparación de la solución sintética	61
Tabla 6 Diseño factorial 23 como plan de experimentos	61
Tabla 7 Equipos y reactivos utilizados	62
Tabla 8 Concentración de cobre disuelto	65
Tabla 9 Concentración de cobre disuelto	66
Tabla 10 Análisis en remoción de cobre	68
Tabla 11 Análisis en el modelo ajustado	69
Tabla 12 Valores para la validación del modelo de regresión	70

Índice de figuras

Figura 1 <i>Gráfica normal de efectos estandarizados</i>	27
Figura 2 <i>Diagrama de especies sistema cobre cianuro agua</i>	46
Figura 3 <i>Esquema del procedimiento experimental</i>	63
Figura 4 <i>Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.</i>	72
Figura 5 <i>Gráfica normal de efectos estandarizados</i>	73
Figura 6 <i>Principales efectos</i>	74
Figura 7 <i>Efectos de interacciones</i>	74
Figura 8 <i>Superficie tridimensional de factores conc. de Cl.Bz y pH</i>	75
Figura 9 <i>Superficie tridimensional de factores Cl.Bz y temperatura</i>	75
Figura 10 <i>Contorno de porcentaje de cobre removido</i>	77
Figura 11 <i>Optimización de la respuesta</i>	77

SINOPSIS

En empleo del amonio cuaternario, en la extracción de metales por lixiviación, tiene como objetivo adsorber y recuperar el cianuro, mitigando los riesgos ambientales. El objetivo del presente libro consistió en evaluar el impacto de la concentración de amonio cuaternario, el pH y la temperatura en un proceso de precipitación química a nivel de laboratorio, con el objetivo de entender su influencia en la remoción de cobre de soluciones cianuradas. El enfoque principal del estudio fue la regeneración del cianuro, con la intención de reutilizarlo en el proceso de lixiviación de oro, con miras a mejorar la eficiencia global de dicho proceso. Para llevar a cabo las pruebas experimentales, se preparó una solución sintética utilizando sulfato de cobre y cianuro de sodio, con concentraciones equivalentes a entornos industriales (700 ppm de cobre y 2500 ppm de cianuro). Los experimentos, bajo un diseño factorial 2³, abarcaron dos niveles de concentración de amonio cuaternario (2,5 g/L y 7,5 g/L), dos niveles de pH (8 y 10), y dos niveles de temperatura (17 °C y 22 °C). Se evaluó la concentración de cobre por ICP-OES al final de cada prueba. La eficacia de la remoción se midió comparando el cobre eliminado por precipitación con la cantidad inicial en la solución cianurada. En promedio, se removió hasta un 92,93% de cobre, logrado con 7,5 g/L de amonio cuaternario, pH 8 y 22 °C. Se observó que mayor concentración de amonio cuaternario y temperatura elevada aumentaron la remoción, pero un pH alto redujo la eficacia de remoción de cobre.

Palabras clave: amonio cuaternario, lixiviación del oro, remoción de cobre, solución cianurada.

ABSTRACT

In the use of quaternary ammonium, in the extraction of metals by leaching, the objective is to adsorb and recover cyanide, mitigating environmental risks. The aim of this book was to evaluate the impact of quaternary ammonium concentration, pH, and temperature in a laboratory-scale chemical precipitation process, with the purpose of understanding their influence on the removal of copper from cyanide solutions. The main focus of the study was cyanide regeneration, intending to reuse it in the gold leaching process, aiming to improve the overall efficiency of the process. To conduct the experimental tests, a synthetic solution was prepared using copper sulfate and sodium cyanide, with concentrations equivalent to industrial environments (700 ppm of copper and 2500 ppm of cyanide). The experiments, under a 2^3 factorial design, covered two levels of quaternary ammonium concentration (2.5 g/L and 7.5 g/L), two pH levels (8 and 10), and two temperature levels (17 °C and 22 °C). The copper concentration in the filtered solution was determined by ICP-OES at the end of each experiment. The removal efficiency was assessed by calculating the percentage of copper removed by precipitation compared to the initial amount in the cyanide solution. The average results indicate that the maximum percentage of copper removal achieved was 92.93%, and it was achieved under the conditions of quaternary ammonium concentration of 7.5 g/L, pH of 8, and a temperature of 22 °C. It is concluded that an increase in quaternary ammonium concentration and an elevation in temperature favor an increase in the percentage of copper removal, while an increase in pH results in a decrease in the efficiency of copper removal.

Keywords: quaternary ammonium, gold leaching, copper removal, cyanide solution.

PRÓLOGO

La capacidad del oro para disolverse en soluciones acuosas de cianuro ha sido conocida desde mediados del siglo XIX. En 1843, el científico ruso Bagration fue el primero en descubrir la solubilidad del oro en cianuro. Diez años después, los científicos ingleses Elsner y Faraday profundizaron en esta reacción y formularon una ecuación clásica que establece las bases del proceso de lixiviación de minerales que contienen oro. En 1846, Elsner consideró por primera vez la importancia vital del oxígeno en la cianuración del oro. Aunque los descubrimientos de Elsner fueron confirmados posteriormente, la aplicación práctica de estos conocimientos no se desarrolló hasta unos 40 años después.

Hace treinta años, Habashi publicó uno de los artículos más relevantes sobre la cianuración del oro. Propuso que la lixiviación del oro en soluciones de cianuro es un proceso electroquímico heterogéneo controlado por la difusión de iones de cianuro y oxígeno hacia la superficie del oro a través de la capa límite de Nernst. La investigación de Szczygiel, publicada en 1984, se centró en la cianuración del oro, un proceso que implica el uso de una solución acuosa diluida de cianuro de sodio o potasio. Este método se basa en la capacidad del oro y la plata para disolverse fácilmente en dicha solución, especialmente bajo condiciones oxidantes favorables.

La extracción de minerales de oro ocasiona problemas ambientales por la contaminación del agua, el aire y el suelo. Uno de los procesos que contribuye a esta contaminación es la lixiviación de metales preciosos con cianuro de sodio. Los residuos que se producen como compuestos de cianuro al finalizar el ciclo de lixiviación también representan un grave problema ambiental.

La recuperación de cianuro de los relaves de oro es un proceso conocido desde que se usa la cianuración, pero antes no era rentable. Con nuevas tecnologías que permiten reciclar el cianuro libre o en compuestos de los relaves, se ahorran costos y se evita la contaminación. Por eso, muchas empresas en las regiones de metales preciosos están optando por esta alternativa, que beneficia la economía

y el ambiente, al reducir el cianuro necesario para la lixiviación y evitar la generación de residuos tóxicos.

Uno de los motivos que me impulso al desarrollo de esta investigación es el cumplimiento de las normas ambientales que se exigen a la industria minero-metalúrgica, no verter efluentes con sustancias peligrosas, como el cianuro y el cobre en solución, a los cuerpos de agua. Debido a que estos, en su mayoría de tipo lótico, son aprovechados por las poblaciones aguas abajo para la ganadería, la agricultura y el consumo humano, lo que genera riesgos para la salud y el ambiente.

El libro pretende ser una referencia para estudiantes de pregrado y posgrado de ingeniería química y otras ramas de la ingeniería, que quieran realizar investigaciones experimentales

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro se enfrenta a complejidades significativas, especialmente cuando se trata de la interacción con metales como el cobre, que consumen valioso cianuro en el proceso de lixiviación. Esta competencia resulta en un consumo elevado de cianuro y una reducción en la eficacia de la extracción de oro, complicando así el proceso y elevando los costos operativos (Bas & Deveci, 2012). La presencia de cobre en las soluciones cianuradas no solo reduce la eficacia en la recuperación del oro, sino que también incrementa la carga contaminante en los residuos mineros, planteando desafíos tanto económicos como ambientales (Lu et al., 2002).

En este contexto, la aplicación de tecnologías limpias se presenta como una solución prometedora, alineándose con los principios de producción más limpia y ecoeficiencia. Estas tecnologías buscan optimizar el uso de recursos y minimizar los desechos, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y económica de la industria minera (Nasibov et al., 1998). Una estrategia específica propuesta en la literatura incluye el uso de amonio cuaternario para precipitar y remover el cobre de las soluciones cianuradas, permitiendo la regeneración y reutilización del cianuro, lo cual podría mejorar la eficiencia de la extracción de oro y reducir la carga ambiental de los procesos mineros (Alonso-González et al., 2013).

Este enfoque no solo aborda la necesidad de reducir la presencia de metales que compiten por el cianuro, como el cobre, sino que también ofrece una ruta hacia la minimización de residuos y la optimización de recursos, elementos clave en la adopción de prácticas de minería sostenible. Al regenerar el cianuro y disminuir la presencia de cobre en los efluentes, se contribuye a una operación más limpia y económicamente viable, alineándose con las tendencias globales hacia la sostenibilidad en la industria minera (Bas & Deveci, 2012; Alonso-González et al., 2010).

Ante ello una problemática significativa en la minería, está centrando su atención en la contaminación ambiental derivada de los procesos productivos,

especialmente en la lixiviación de oro, donde el uso de cianuro es una preocupación mayor. La innovadora propuesta de aplicar principios de "Tecnologías Limpias" para regenerar el cianuro y eliminar el cobre de la solución cianurada representa un enfoque holístico que no solo aborda los desafíos ambientales, como la reducción de contaminantes en los relaves, sino que también considera el impacto económico, al mejorar la reutilización de cianuro y optimizar la extracción de oro.

La estructura de este libro se organiza de la siguiente manera: El primer capítulo se centra en la comprensión teórica del cianuro en procesos de lixiviación de oro. En el segundo capítulo, se profundiza en el trasfondo teórico de las distintas sales del amonio cuaternario. El tercer capítulo está dedicado a la presentación metodológica, los resultados y la discusión del estudio. Finalmente, el cuarto capítulo aborda las conclusiones, recomendaciones y reflexiones derivadas de la investigación.

CAPÍTULO I

EL CIANURO EN PROCESOS DE LIXIVIACIÓN DE ORO

1.1 Información general del oro

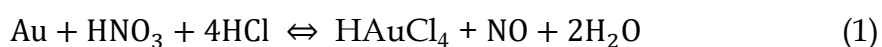
Shamsuddin (2021) indica que el oro se destaca como un metal único en la naturaleza debido a sus excepcionales propiedades. Posee un distintivo y agradable color amarillo pajizo brillante, y cuando se pule, su brillo se intensifica aún más, lo que lo convierte en un material sumamente atractivo desde el punto de vista estético. Además de su atractivo visual, el oro es conocido por ser un metal extremadamente suave, maleable y dúctil, lo que significa que es fácil de trabajar y dar forma. Un dato impresionante es que, a partir de tan solo un gramo de oro, es posible estirar un cable de hasta 3,5 kilómetros de longitud. Esto ilustra la capacidad del oro para ser transformado en formas delicadas y largas, lo que lo hace especialmente valioso en la industria de la joyería y la fabricación de objetos decorativos.

En el ámbito de la transparencia, el oro también presenta una característica única. Cuando se procesa adecuadamente, el oro puede ser tan fino que permite que la luz lo atraviese, con un grosor que no supera los 0,0001 mm, lo que crea una apariencia de tintes verdosos. Este tipo de láminas extremadamente delgadas de oro se conocen como hojas de oro y se utilizan en diversas aplicaciones, en particular en decoraciones ornamentales de alto valor.

Además de sus propiedades estéticas y físicas, el oro también exhibe características notables en términos de su posición en la tabla periódica y sus propiedades químicas. En la tabla periódica de elementos, el oro se encuentra en el número 79. Su peso atómico es de 197,2 y tiene una densidad de 19,26 g/cm³. Tiene un punto de fusión relativamente alto, a 1063 °C.

Un detalle asombroso sobre el oro es que, a pesar de su suavidad y maleabilidad, una pequeña cantidad de este metal tiene un peso considerable. Por ejemplo, una bola de oro puro con un diámetro de tan solo 46 mm tiene un peso de 1 kg. Esta característica se traduce en que, si se llenara densamente una habitación de 20 m² con lingotes de oro y una altura de 3 m, la masa total sería impresionante, alcanzando las 1150 toneladas.

En el contexto de su grupo en la tabla periódica, que incluye elementos como la plata, el platino, el paladio y otros, el oro puede considerarse el metal más noble. La característica más destacada es su estabilidad química. El oro permanece sin oxidarse en la atmósfera, incluso bajo altas temperaturas, y presenta una notable resistencia a la humedad. Asimismo, no muestra reacciones con ácidos, bases ni sales, lo que lo convierte en un metal excepcionalmente estable en entornos químicos diversos. Sin embargo, es importante mencionar que el oro puede disolverse con ácido clorhídrico y nitrógeno, dando lugar a una reacción química específica, presentándose la reacción:



Esta capacidad de disolución selectiva es un aspecto interesante de la química del oro y puede tener aplicaciones particulares en ciertos procesos industriales y analíticos.

La reacción química que se produce, después de una cuidadosa evaporación de la solución resultante, da lugar a la formación de cristales amarillos de ácido hipocloroso dorado con la fórmula química $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Estos cristales poseen un llamativo color dorado y representan una de las formas en que el oro se puede obtener y manipular en el ámbito químico.

La extracción y procesamiento del oro se basa en una variedad de técnicas (Shamsuddin, 2021), siendo una de las más notables el uso de cianuro en un proceso llamado lixiviación. Este proceso permite la disolución selectiva del oro presente en minerales y rocas, facilitando su recuperación para su posterior refinamiento y utilización. Además del cianuro, otro disolvente eficaz para el oro es una solución acuosa de tiourea que contiene cloruro férrico o sulfato ferroso como oxidante. Estas soluciones acuosas, junto con una serie de otros agentes complejos, desempeñan un papel fundamental en la extracción y purificación del metal precioso oro.

El oro puede manifestar diferentes estados de oxidación en sus compuestos químicos, siendo los más comunes +1 y +3. Estos estados de oxidación se

traducen en una variedad de compuestos químicos del oro que, de manera interesante, son relativamente frágiles. Uno de los rasgos más notables es que estos compuestos de oro pueden ser restaurados de nuevo al estado metálico mediante un proceso de calcinación relativamente simple. Estas propiedades de los compuestos de oro, su fragilidad y su reversibilidad química, son aprovechadas en la preparación de metales químicamente puros mediante técnicas de afinación.

En resumen, el oro se puede obtener y manipular en forma de cristales de ácido hipocloroso dorado, y su procesamiento químico involucra la utilización de cianuro y soluciones de tiourea. Los compuestos químicos del oro presentan estados de oxidación +1 y +3, y su fragilidad y reversibilidad química son características esenciales que se aprovechan en la obtención de oro puro y en la refinación de metales. Estas complejas técnicas químicas y propiedades únicas hacen que el oro sea un elemento de gran importancia tanto en la industria como en la ciencia.

1.2 Presencia del oro en la naturaleza

Los geoquímicos han realizado cálculos que indican que, en promedio, la corteza terrestre contiene alrededor de 5 miligramos de oro por tonelada, mientras que la cantidad de plata es aproximadamente 20 veces mayor que la de oro en nuestro planeta. Aunque existe una cantidad significativa de oro en los océanos, la extracción de este metal a partir del agua marina no resulta económicamente viable debido a su baja concentración, que oscila entre 0,001 y 0,01 miligramos por metro cúbico.

Al igual que ocurre con otros minerales, la distribución del oro en la corteza terrestre es extremadamente desigual, concentrándose en áreas específicas. Gracias a su extraordinaria estabilidad química, el oro se halla en minerales únicamente en su estado metálico nativo. Aunque la composición química de las partículas de oro nativo puede variar considerablemente, generalmente se distingue por su alta concentración de oro. En estas pepitas de oro, es común

encontrar impurezas como plata, cobre, hierro, y ocasionalmente trazas de elementos como arsénico, bismuto, telurio, platino y otros.

La pureza del oro en las pepitas, expresada como el contenido de oro en milésimas en relación con otras sustancias presentes, a menudo oscila entre 600 y 950 partes por mil. Esto significa que, en una aleación natural, el oro puede representar una proporción significativa y valiosa (Fleuriault et al., 2021).

En los minerales, el oro nativo se presenta en una variedad de formas, desde partículas diminutas hasta fragmentos considerables. Algunas partículas son tan diminutas que requieren un microscopio para su observación, mientras que existen trozos grandes que pueden pesar desde 1 hasta 100 kilogramos. No obstante, en la actualidad, es raro encontrar pepitas grandes de oro. La mayor cantidad de oro se encuentra en forma de pequeñas partículas, con un tamaño que no excede los 0,5 milímetros.

El tamaño de las partículas de oro es una característica crítica en su procesamiento. Según las tecnologías modernas de procesamiento de minerales, se suelen distinguir tres grupos de tamaños:

- Oro grueso, con partículas de tamaño superior a 0,07 milímetros.
- Oro medio, con partículas de tamaño que oscilan entre 0,01 y 0,07 milímetros.
- Oro fino, con partículas de tamaño menor a 0,01 milímetros.

El oro de mayor tamaño se puede moler y capturar fácilmente mediante procesos de enriquecimiento gravitacional. En cambio, el oro fino presente en minerales molidos se encuentra en estado libre o en asociación con otros minerales, y las partículas pequeñas tienden a flotar, lo que permite su disolución con cianuración, pero su extracción resulta más difícil mediante métodos gravitacionales.

El oro fino, que a menudo se asocia con minerales sulfurosos, libera solo una pequeña parte de su contenido de oro cuando el mineral se muele, ya que el resto

permanece en el mineral. La cianuración de este oro no lo disuelve por completo, y en el proceso de sedimentación y flotación, se extrae junto con los minerales con los que está mezclado. La eficiencia en la recuperación de oro mediante cianuración está fuertemente influenciada por la superficie del metal. En algunos casos, la superficie del oro puede estar recubierta por películas de óxidos de metales no ferrosos y ferrosos, lo que dificulta su proceso de disolución.

Es común encontrar formaciones que recubren el oro, como películas de óxidos de hierro y manganeso, argentita (Ag_2S), sulfuro de cobre (CuS), galena (PbS) y otros minerales. El comportamiento del oro en las operaciones tecnológicas depende de la naturaleza de estas películas; las películas sólidas y densas impiden que el oro se disuelva en el proceso de cianuración. En casos en los que los recubrimientos son porosos o solo cubren parcialmente el oro, la cianuración es posible, pero se lleva a cabo a un ritmo más lento (Munhoz Junior, 2019).

1.3 Estado actual de la extracción de cobre de soluciones cianuradas

La recuperación de metales preciosos a partir de minerales que contienen cobre ha sido históricamente un desafío en el contexto de la cianuración convencional. El cobre, en particular, se considera un metal problemático en el proceso de lixiviación de oro debido a la rápida formación de complejos de cianuro de cobre cuando se tratan minerales fácilmente solubles, como la azurita, malaquita, cuprita, calcocita y bornita. Esta formación de complejos de cianuro de cobre conduce a un exceso en el consumo de cianuro y, por ende, a costos elevados asociados con su eliminación en los residuos.

Cuando se emplea carbón activado para la recuperación de oro y plata, la presencia de complejos de cianuro de cobre disminuye la eficiencia del proceso, ya que los iones de cuprocianuro compiten con los iones de aurocianuro por los sitios de absorción disponibles en el carbón activado. Por otro lado, durante el proceso de cementación con zinc para la recuperación de los metales preciosos, el complejo de cianuro de cobre también precipita junto con el oro y la plata, lo que resulta en una disminución de la pureza de estos últimos.

Para abordar estas problemáticas relacionadas con la presencia de cobre en la solución de cianuración, se han explorado diversas técnicas con el objetivo de mitigar sus consecuencias negativas. Estas técnicas se pueden clasificar en diferentes categorías:

- **Lixiviación selectiva de cobre:** Antes de la lixiviación del oro y la plata, se pueden aplicar métodos como la lixiviación ácida de cobre, la lixiviación selectiva de oro en minerales de oro con cobre, la lixiviación con tiosulfato y la lixiviación de tiourea. Estos métodos permiten separar selectivamente el cobre de la solución, facilitando así la extracción de los metales preciosos.
- **Eliminación del cobre disuelto:** Se pueden emplear procesos como la degradación natural, la biodegradación, la cloración alcalina y la oxidación con peróxido de hidrógeno para eliminar el cobre disuelto de la solución de cianuración. Estos métodos ayudan a reducir la concentración de cobre en la solución, lo que mejora la eficiencia del proceso de extracción de oro.
- **Recuperación conjunta de cobre y cianuro:** Se han desarrollado procesos como el proceso de acidificación-volatilización-regeneración (AVR) y el proceso SART de sulfuración-acidificación-reciclaje-espesamiento para recuperar tanto el cobre como el cianuro de la solución. Estos métodos permiten reciclar los reactivos y minimizar los residuos generados durante el proceso de extracción de oro.
- **Extracción con solventes y uso de resinas de intercambio iónico:** Estas técnicas implican el uso de solventes y resinas de intercambio iónico para extraer selectivamente el cobre de la solución de cianuración. Esto ayuda a purificar la solución y mejorar la calidad del producto final obtenido durante el proceso de extracción de oro y plata.

Estos enfoques representan estrategias clave para superar los retos asociados con la presencia de cobre en la cianuración, contribuyendo a una mejora significativa

en la eficiencia y la pureza de la recuperación de metales preciosos (Alonso-González et al., 2010).

Dado que los complejos de cobre y cianuro tienen carga negativa, es posible eliminarlos de la solución mediante precipitación utilizando compuestos de carga positiva de alto peso molecular. Entre estos compuestos, destacan las sales de amonio cuaternario, que se disocian en soluciones acuosas, generando cationes relativamente grandes. Estas sustancias se emplean en una variedad de aplicaciones, como emulsionantes, espumantes y detergentes. En particular, en la industria de procesamiento de minerales, se utilizan como recolectores en procesos de flotación para minerales no metálicos y como solventes extractantes en la recuperación de metales.

Las sales de amonio cuaternario son especialmente atractivas para su utilización en aplicaciones específicas de extracción con solventes debido a su excelente selectividad y alta capacidad de carga. Han sido empleadas con éxito para concentrar complejos de cianuro de oro en solución en procesos de extracción por solventes. Además, se ha investigado su uso en la eliminación de complejos de cianuro de cobre a través de procesos de extracción con solventes.

Este último enfoque está siendo objeto de estudio continuo para obtener una comprensión más profunda de la utilidad de las sales de amonio cuaternario en la remoción de complejos de cobre presentes en soluciones cianuradas, particularmente después de los procesos de lixiviación de metales preciosos. El objetivo es formar precipitados que puedan ser fácilmente separados por filtración, lo que permitiría el reciclaje del cianuro libre y su reutilización en el proceso de lixiviación, contribuyendo así a una gestión más eficiente y sostenible de los recursos (Alonso-González et al., 2013).

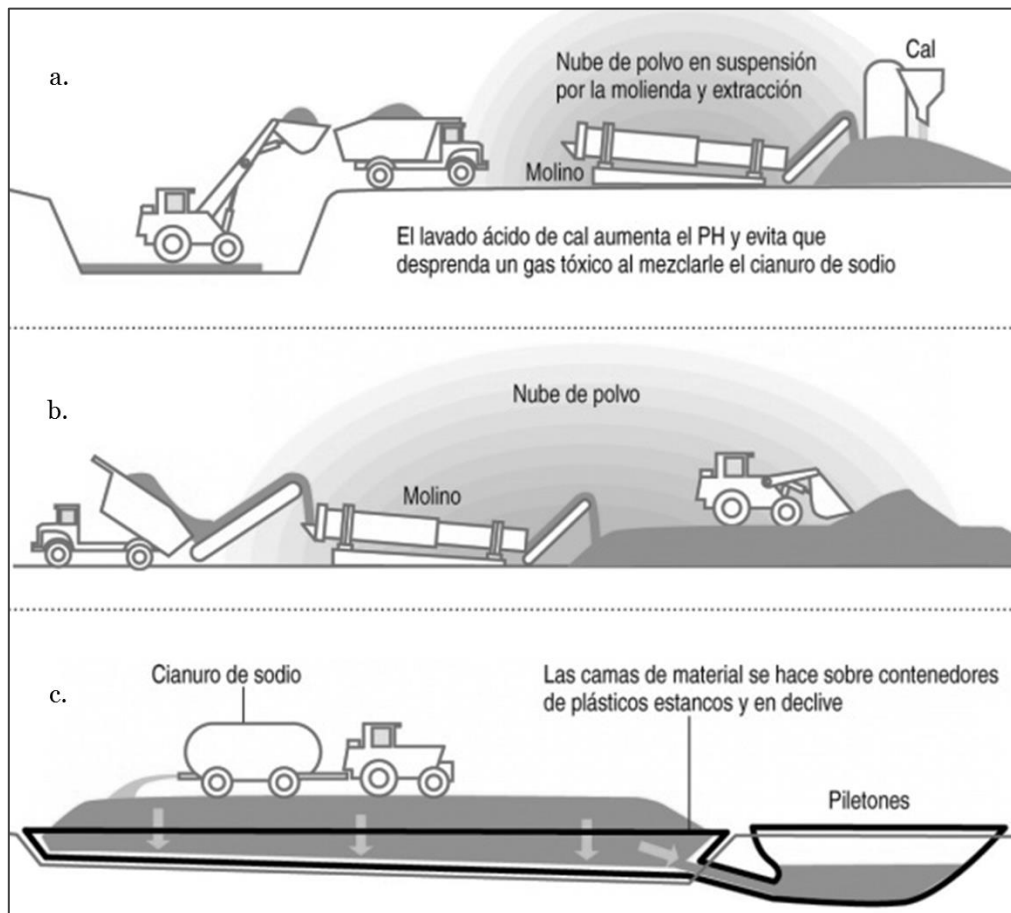
1.4 Procesos de lixiviación de oro

La recuperación de metales preciosos, como el oro, es un procedimiento comúnmente llevado a cabo a través de la lixiviación con cianuro, el proceso que se desarrolla en la minería se observa en la Figura 1. Sin embargo, en este proceso,

además del oro que se encuentra en el mineral, suelen coexistir otros elementos que tienen el potencial de reaccionar y disolverse, lo que puede plantear desafíos considerables en el desarrollo exitoso de la operación. Uno de estos constituyentes, el cual ocasionalmente se halla en cantidades sustanciales, superando en ocasiones la cantidad de oro presente, es el cobre.

Figura 1

Gráfica normal de efectos estandarizados



Nota. Adaptado de *Lixiviación con cianuro* (ECyT-ar, 2012). ^a Los minerales son extraídos, triturados y luego se aplica un lavado ácido con óxido de calcio (CaO). ^b Son vueltos a moler hasta una consistencia similar a la harina, tras lo cual se conforma una extensa acumulación de este material, denominada pila. ^c Al mineral depositado en las pilas de lixiviación se le vierte solución cianurada (cianuro de sodio NaCN) de hasta 500 ppm. El cianuro decanta arrastrando el oro y la plata que por declive va escurriendo en piletones, este proceso se denomina lixiviación. La solución rica, cargada con oro y plata es llevada hacia

las pozas de operaciones a través de tuberías colectoras. Desde los piletones se bombea a la planta de procesamiento, pero antes se le agrega carbón para mejorar la separación del oro y plata u otros metales.

El cobre, al ser un metal con propiedades químicas que lo predisponen a la formación de complejos con el cianuro, puede interferir de manera significativa en la eficiencia del proceso de lixiviación del oro. Su presencia en concentraciones elevadas puede dar lugar a la rápida formación de complejos de cianuro de cobre, lo que conlleva a un mayor consumo de cianuro y dificulta la recuperación eficaz de los metales preciosos.

Por lo tanto, gestionar la presencia del cobre en la lixiviación de oro es de vital importancia para garantizar un proceso eficiente y económico en la recuperación de los metales preciosos, y ha llevado al desarrollo de numerosas estrategias y técnicas en la industria minera.

Un comportamiento típico que se observa en las plantas de cianuración es que, al inicio de la operación, generalmente se logra una disolución efectiva del oro y una alta eficiencia en su precipitación. Sin embargo, con el transcurso de unas semanas, la eficiencia tiende a disminuir, incluso si la concentración de cianuro en la solución se mantiene constante. Este fenómeno es particularmente notorio cuando se procesan minerales que contienen cobre soluble, como la calcocita, bornita, malaquita, azurita, covelina y cuprita.

En las operaciones de cianuración en las que se recircula la solución de cianuro, el aumento gradual en la concentración de cobre en la solución se traduce en lo que comúnmente se conoce como contaminación de la solución. Esta contaminación del sistema deteriora la eficiencia de la extracción de oro y se convierte en un problema económico, ya que requiere un exceso de cianuro para mantener una lixiviación adecuada del oro.

Además, cuando se utiliza carbón activado como parte del proceso de recuperación de oro, los complejos de cianuro de cobre generan una competencia

por los sitios de adsorción en el carbón activado, lo que disminuye la eficiencia del proceso.


En este contexto, la eliminación del cobre de la solución y la recuperación del cianuro de los efluentes producidos durante la cianuración se convierten en asuntos de gran interés tanto desde una perspectiva ambiental como económica. Esto se debe a la necesidad de reducir el impacto ambiental y mitigar el exceso de consumo de cianuro, lo que hace que la investigación en esta área sea fundamental para la optimización de los procesos de extracción de metales preciosos (Gao et al., 2016).

1.5 Fundamentos del proceso de cianuración

La cianuración es el método primordial para extraer oro y plata de minerales y concentrados, destacándose por su eficacia y amplia aplicación a nivel global. En su esencia, este proceso implica la interacción del mineral triturado, que contiene valiosos metales nobles, con soluciones alcalinas diluidas de cianuro de sodio (ver tabla 1). Este contacto provoca la disolución del oro y la plata, permitiendo que estos metales preciosos pasen a la solución.

Tabla 1

Niveles máximos y mínimos de los factores

Nombre del producto		Cianuro de sodio	
Sinónimos		Prusiato de soda, cymag, sal sódica del ácido cianhídrico.	
Formula química		NaCN	
Nombre y porcentaje (%) de los componentes		Cianuro de sodio = 9.8 % HNCOONa = 1% H ₂ O = 0.3% Na ₂ CO ₃ = 0.6 % NaOH = 0.1 %	
EPP		Guantes de goma, equipo de protección respiratoria aprobada por NIOSH, protección para el rostro, ropa de goma, delantales y botas.	
Grados de riesgos		Salud	3
		Inflamabilidad	0
		Reactividad	0
Peso molecular: 49.01 g/mol		Humedad: 0.5% máx.	

Nota. Adaptado de *Cianuro de Sodio* (Grupo Casa Lima, s.f.). El NaCN es peligroso al contacto con la piel y los ojos, su inhalación puede causar irritación

respiratoria, dolor de cabeza, mareo, latidos rápidos, pérdida de conocimiento e incluso la muerte.

La eficacia de la cianuración se fundamenta en la selectividad relativa del cianuro de sodio como solvente, lo que lo convierte en un agente idóneo para la combinación de procesos de disolución y precipitación de metales nobles. Además, la simplicidad en la configuración del proceso productivo y otras ventajas intrínsecas a la cianuración hacen que sea un proceso altamente eficiente y productivo. En consecuencia, esta tecnología se aplica de manera extensiva en la extracción de oro y es un pilar fundamental de la industria minera.

A nivel mundial, importantes naciones productoras de oro, como Sudáfrica, Canadá, Estados Unidos, Australia, Rusia y otras, han adoptado en gran medida el método de lixiviación con cianuro de sodio para llevar a cabo la extracción de oro. Esta elección se basa en la eficacia probada de la cianuración, su rentabilidad y su éxito continuo a lo largo del tiempo (Shandilya et al., 2021).

Es ampliamente reconocido que los cianuros alcalinos, en particular el cianuro de potasio y el cianuro de sodio, son sustancias de alto riesgo y altamente tóxicas, lo que conlleva la aplicación de normativas rigurosas en cuanto a su manipulación, almacenamiento y transporte. La dosis letal de cianuro se sitúa en torno a los 100 mg, subrayando la importancia de un control exhaustivo de estos compuestos. Esto se traduce en la existencia de estrictos límites máximos permitidos en el agua, diseñados para supervisar las emisiones de cianuro en cuerpos de agua, además de la necesidad imperante de tratar las soluciones cianuradas presentes en los residuos antes de su descarga en los cuerpos receptores, con el fin de mitigar su concentración y volumen.

El tratamiento de las soluciones cianuradas es una práctica ampliamente conocida y aplicada. En la mayoría de los casos, se lleva a cabo la descomposición del cianuro empleando diversos oxidantes químicos, como cloro, ozono, peróxido de hidrógeno y otros, lo que resulta en la formación de compuestos que contienen nitrógeno y dióxido de carbono, que son sustancias no tóxicas para el medio ambiente. Este enfoque, combinado con la utilización de soluciones

cianuradas en concentraciones bajas para la lixiviación, la falta de agresividad de estas soluciones en relación con otros reactivos químicos utilizados en la extracción del oro, y la capacidad de tratamiento de los residuos de cianuro hasta alcanzar los Límites Máximos Permisibles (LMP), convierten a esta tecnología en la opción más adecuada en comparación con otros métodos que hacen uso de ácidos, álcalis concentrados o soluciones salinas.

Como resultado, la tecnología de lixiviación de oro con cianuro de sodio, desarrollada hace más de un siglo, no ha perdido relevancia, sino que, por el contrario, sigue evolucionando y consolidándose como la metodología preeminente en el procesamiento de materias primas de oro. Esto se debe a su eficacia, su continua innovación y su posición destacada entre las diversas técnicas metalúrgicas utilizadas en la obtención de oro (Tyagi & Ningthoujam Editors, 2022).

1.5.1 Pérdida de cianuro durante la lixiviación

En el proceso de lixiviación de minerales de oro, uno de los factores críticos que influyen en los aspectos técnicos y económicos es el consumo de los reactivos utilizados en el proceso, lo que tiene un impacto directo en el costo del producto final. En este contexto, el consumo de cianuro es un aspecto de gran relevancia, ya que su eficiencia y utilización adecuada son fundamentales para lograr una extracción eficaz de oro.

El consumo de cianuro en la práctica de lixiviación es influenciado por diversos factores y se manifiesta en múltiples formas. Este alto consumo de disolvente se puede atribuir a pérdidas que ocurren como resultado de dos causas principales: mecánicas y químicas.

Las pérdidas de cianuro de naturaleza mecánica se producen debido a fugas de la solución que atraviesan dispositivos y equipos debido a la falta de impermeabilidad. Esto significa que, en ocasiones, las estructuras y sistemas utilizados para contener y transportar las soluciones de cianuro no son lo suficientemente herméticos, lo que conlleva a la fuga del reactivo. Esto no solo

representa una pérdida económica sino también una preocupación ambiental, ya que puede dar lugar a la contaminación del entorno.

Por otro lado, las pérdidas de cianuro de naturaleza química se refieren a la transformación del cianuro en otros compuestos que no participan en el proceso de lixiviación del oro. Estas transformaciones pueden ser causadas por diversos factores, como la interacción del cianuro con ciertos minerales presentes en la mena o con otras sustancias químicas que pueden estar presentes en la solución.

La gestión y reducción de las pérdidas de cianuro son de gran importancia tanto desde un punto de vista económico como ambiental. Minimizar las pérdidas de cianuro no solo implica un uso más eficiente de este reactivo costoso, sino que también contribuye a la preservación del entorno y la mitigación de los impactos ambientales negativos asociados con la liberación no controlada de cianuro.

En consecuencia, la optimización de la utilización de cianuro y la implementación de prácticas que reduzcan las pérdidas, tanto mecánicas como químicas, son aspectos cruciales en la lixiviación de minerales de oro y son objeto de investigación y desarrollo continuos en la industria minera (Wang & Wang, 2021).

1.6 Proceso de disolución del oro en soluciones cianuradas

La capacidad del oro para disolverse en soluciones acuosas de cianuro se ha conocido desde mediados del siglo XIX. Inicialmente, en 1843, el científico ruso Bagration fue el primero en descubrir la solubilidad del oro en cianuro. Posteriormente, 10 años después, los científicos ingleses Elsner y Faraday profundizaron en esta reacción y formularon una ecuación clásica que sienta las bases del proceso de lixiviación de minerales que contienen oro. En 1846, Elsner fue el primero en considerar la importancia vital del oxígeno en la cianuración del oro. Aunque los descubrimientos de Elsner se confirmaron posteriormente, la aplicación práctica de estos conocimientos no se desarrolló hasta unos 40 años después (Guzman et al., 1999).

En 1887, McArthur y Forrest presentaron la primera patente de extracción de oro y plata con soluciones de cianuro a partir de minerales que contienen oro y plata. Desde entonces, a pesar de los intensos trabajos de investigación en este campo, la lixiviación del oro con soluciones de cianuro no ha cambiado sustancialmente.

Hace treinta años, Habashi publicó uno de los artículos más relevantes sobre la cianuración del oro. Propuso que la lixiviación del oro en soluciones de cianuro es un proceso electroquímico heterogéneo controlado por la difusión de iones de cianuro y oxígeno hacia la superficie del oro a través de la capa límite de Nernst. Sus conclusiones se basaban en el hecho de que la velocidad de cianuración del oro depende linealmente de las concentraciones de cianuro y oxígeno, es función de la velocidad de agitación y las energías de activación del proceso están en el rango de 8 - 20 kJ mol⁻¹, valores típicos de un proceso controlado por difusión.

En el mismo artículo, Habashi se refiere a la posibilidad de que exista otro mecanismo de cianuración bajo control químico para velocidades de agitación superiores a 150 min⁻¹, ya que la velocidad de disolución del oro es entonces proporcional al cuadrado de la presión de oxígeno, y la energía de activación resulta ser de 58,9 kJ mol⁻¹.

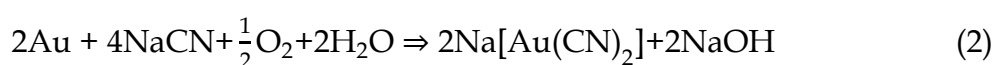
La investigación de Szczygiel, publicado en 1984, se enfoca en la cianuración del oro, un proceso que implica el uso de una solución acuosa diluida de cianuro de sodio o potasio. Este método se sustenta en la capacidad del oro y la plata para disolverse fácilmente en dicha solución, especialmente bajo condiciones oxidantes favorables.

Adicionalmente, se observó que la oxidación mediante ozono de un mineral de oro y plata tuvo un impacto positivo en su estructura, logrando una disolución de plata del 70,78 % en un período de 48 horas. Esto contrasta con el 61,7 % de disolución obtenido en el proceso de cianuración convencional sin preoxidación.

En cuanto a la disolución de oro, se encontró que para el mineral preoxidado con ozono, esta alcanzó el 93 % en 48 horas de proceso, en comparación con el 40 %

de disolución de oro en el mineral cianurado sin preoxidación, el cual requirió 72 horas de reacción.

Es crucial destacar que la solución generada contendrá cianuro de hidrógeno, resultado de la reacción entre el cianuro de sodio o potasio y el ácido sulfúrico. No obstante, aún conservará algunos iones cianuro libres. Esta característica es de relevancia fundamental para comprender el mecanismo de la cianuración. Se ha establecido que la disolución del oro en soluciones cianuradas tiene lugar en presencia de oxígeno a través de la siguiente reacción química:



Este proceso, conocido como la reacción de Elsner, es fundamental para la recuperación de oro a partir de minerales y concentrados, y ha sido un componente esencial de la industria minera aurífera durante más de un siglo. La capacidad del oro para formar complejos de cianuro en condiciones específicas es una característica distintiva que permite su disolución en soluciones de cianuro y su subsiguiente extracción en aplicaciones industriales.

El papel fundamental del oxígeno en el proceso de disolución del oro en soluciones de cianuro se estableció de manera definitiva en un experimento pionero llevado a cabo en 1921 por los científicos Julian y Smart. Este experimento proporcionó una comprensión más profunda de cómo el oxígeno influye en la reacción de disolución del oro y confirmó su importancia en el proceso (Flynn et al., 1986).

El experimento consistió en un recipiente dividido en dos compartimentos por un tabique poroso. En un lado se vertió una solución de cianuro de sodio, y en el otro se sumergieron dos electrodos: uno de oro puro y otro de pirita. Estos electrodos se conectaron a través de un galvanómetro para medir la corriente eléctrica que fluía a través del circuito externo.

Al principio, al cerrar el circuito eléctrico, el galvanómetro mostró una desviación de la corriente, lo que indicaba que se estaba produciendo un flujo eléctrico desde el electrodo de oro hacia el de pirita. Sin embargo, en un período relativamente

corto, la corriente en el circuito comenzó a disminuir y finalmente desapareció por completo.

La revelación clave surgió cuando se introdujo aire u oxígeno en la solución ubicada en el compartimento con el electrodo de pirita. Esto resultó en la restauración de la corriente eléctrica en el circuito exterior. Este hallazgo demostró de manera concluyente la importancia del oxígeno en el proceso de disolución del oro en soluciones de cianuro.

El hidrógeno liberado en el cátodo de pirita fue identificado como la causa principal de la reducción de la corriente eléctrica. La presencia de oxígeno permitió la eliminación eficiente del hidrógeno de la superficie del cátodo, lo que a su vez intensificó el proceso de disolución del oro.

Este experimento respalda dos conclusiones fundamentales:

1. El oxígeno no participa directamente en la reacción de disolución del oro. En cambio, su función es eliminar el hidrógeno liberado en el cátodo, lo que facilita la continuación y la eficiencia de la disolución del oro.
2. La validación de la teoría de la disolución del oro en soluciones de cianuro, respaldada por este experimento, ha sido esencial para comprender y optimizar el proceso de lixiviación de minerales que contienen oro en la industria minera.

El experimento demostró la validez completa de la teoría de la disolución de oro en solución de cianuro. El hidrógeno liberado en el cátodo es causa de la reducción de la corriente, su eliminación de la superficie del cátodo mediante el oxígeno inmediatamente intensifica el proceso de disolución de oro. De aquí, se puede llegar a una segunda conclusión, que el oxígeno en el proceso de disolución de oro no participa directamente (Flynn et al., 1986; Guzman et al., 1999).

1.7 Efecto de las especies de cianuro de cobre

El cobre representa uno de los mayores desafíos en el proceso de lixiviación de oro debido a su rápida formación de complejos con el cianuro. Este fenómeno es

especialmente problemático debido a que muchos minerales de oro contienen cantidades significativas de cobre soluble en su estructura. La presencia de cobre en estos minerales da lugar a un alto consumo de cianuro en el proceso de lixiviación, lo que aumenta los costos operativos.

La complicación principal relacionada con la presencia de cobre ocurre en las etapas posteriores de recuperación del oro. En estos pasos, el cianuro de cobre compite con el ion aurocianuro por los sitios activos en el carbón activado utilizado para la adsorción del oro. Esta competencia conduce a una disminución en la eficiencia de la adsorción del oro en el carbón activado, lo que afecta negativamente la recuperación del metal precioso.

Para superar estos desafíos al tratar minerales con alto contenido de cobre, se han desarrollado diversas opciones y estrategias:

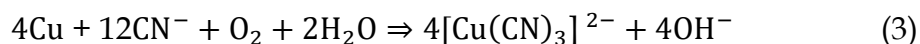
1. Recuperación selectiva del cobre por flotación: Este enfoque implica la separación del cobre de los minerales antes de la lixiviación de oro, lo que reduce la interferencia del cobre en el proceso de lixiviación.
2. Lixiviación selectiva del oro con amoniaco-cianuro: Este proceso utiliza una combinación de amoníaco y cianuro para disolver selectivamente el oro sin afectar el cobre.
3. Cianuración del oro y adsorción del oro con una resina selectiva: Se emplean resinas de intercambio iónico para adsorber selectivamente el oro sin afectar el cobre en la solución.
4. Procesos SART (Sulfidización, Acidificación, Reciclaje y Espesamiento): En este enfoque, se lleva a cabo la precipitación de cianuro de cobre antes de la cianuración del oro, lo que permite separar el cobre del oro.
5. Recuperación del cobre y cianuro, con posterior recuperación del oro: En esta estrategia, se recupera el cobre de la solución antes de la cianuración del oro. El cianuro se recupera mediante el proceso AVR (Acidificación, Volatilización, Regeneración) para hacer que el proceso sea más económico.

Además de estas opciones, se están llevando a cabo investigaciones en torno a la aplicación de la precipitación química de los componentes que interfieren en el proceso de lixiviación y contaminan la solución cianurada. Uno de los enfoques en estudio implica el uso de amonio cuaternario para abordar estos desafíos. Estas investigaciones representan avances importantes en la búsqueda de soluciones más efectivas y sostenibles para la lixiviación de minerales de oro con alto contenido de cobre (Tyagi & Bhattacharyya, 2022).

1.8 Interacción del cobre con soluciones cianuradas

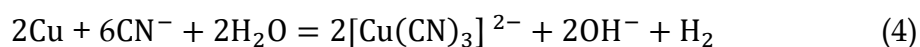
La presencia de minerales de cobre en los yacimientos minerales representa un desafío significativo en el proceso de lixiviación debido a su propensión a formar compuestos complejos de cianuro con el cobre. Los minerales de cobre y sus óxidos se disuelven de manera notablemente rápida en soluciones cianuradas, dando lugar a la formación de complejos de cianuro de cobre. Esta interacción puede describirse mediante varias reacciones químicas:

1. Reacción de disolución del cobre en oxígeno:

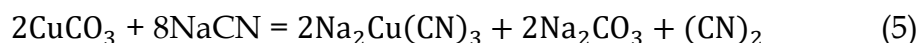


El cobre es capaz de oxidarse incluso en ausencia de oxígeno en el agua, a diferencia del oro y la plata.

2. Reacción de disolución del cobre en cianuro:



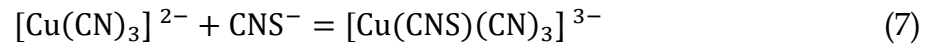
3. Reacción de carbonatos de cobre con cianuro:



La interacción del azufre con iones de cianuro da lugar a la formación del ion rodanuro (sulfocianuro):



Cuando el rodanuro se combina con el complejo de cianuro de cobre, se forma un complejo aún más complejo de cianuro-rodanuro:



La interacción activa del cobre con la solución cianurada para la extracción de oro resulta en un alto consumo de cianuro, incluso en presencia de pequeñas cantidades de cobre, lo que puede hacer que la aplicación de la lixiviación tradicional no sea rentable. Además del aumento del consumo de cianuro, la presencia de los aniones complejos de cobre también provoca una notoria disminución en la velocidad de disolución del oro.

Para abordar este desafío, especialmente cuando los minerales de cobre están presentes en las cantidades antes mencionadas, se requieren métodos especiales de procesamiento y técnicas que permitan una extracción más eficiente y rentable del oro de los minerales de cobre (Gao Etaiw & El-bendary, 2013).

1.8.1 Deposición del oro de la solución cianurada

La extracción del oro a partir de soluciones cianuradas se lleva a cabo mediante varios métodos, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones. Los métodos más comunes para la recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas son:

1. **Deposición de zinc:** Este método, que ha sido utilizado desde los primeros días del desarrollo de la lixiviación, implica la precipitación del oro disuelto en la solución cianurada mediante la adición de zinc. El oro se deposita en forma de polvo de oro, lo que hace que sea relativamente fácil de recuperar. Aunque es un método probado y aún se utiliza en varias ubicaciones en todo el mundo, puede generar una gran cantidad de lodo de cianuro de zinc como subproducto.
2. **Deposición de aluminio:** Inicialmente, este método se utilizó para extraer la plata de las soluciones cianuradas. Sin embargo, en la actualidad, se considera un método obsoleto para la extracción de oro y se ha desplazado por métodos más eficientes y sostenibles.
3. **Sorción por resinas de intercambio iónico:** Esta técnica implica el uso de resinas de intercambio iónico que tienen una afinidad selectiva por los iones de oro en la solución cianurada. Las resinas se cargan con oro y, posteriormente, se regeneran para recuperar el metal precioso. Es un

método eficiente y se utiliza en aplicaciones de menor escala y donde la calidad del oro es un factor crítico.

4. **Adsorción por carbones activos:** Este método, que ha ganado popularidad en los últimos años, implica la adsorción del oro disuelto en carbones activados. Los carbones activos tienen una gran área superficial y una alta afinidad por los complejos de oro en solución. Después de la adsorción, los carbones se desorben y el oro se recupera a través de la electrodeposición o la fundición de los carbones cargados. Es un método efectivo y se está utilizando cada vez más debido a su eficiencia y versatilidad.
5. **Extracción por solventes:** Este método implica el uso de solventes orgánicos para extraer selectivamente el oro de las soluciones cianuradas. Aunque es un proceso en constante investigación, todavía no se ha generalizado en la industria debido a la complejidad y los costos asociados con el uso de solventes.

Cada uno de estos métodos tiene sus propias aplicaciones específicas y ventajas, y su elección dependerá de las condiciones y requisitos específicos de la operación minera. La extracción de oro es una parte crucial del proceso de recuperación de metales preciosos y desempeña un papel fundamental en la industria de procesamiento de minerales (Cheng et al., 2006).

1.8.2 Tratamiento de las soluciones cianuradas

Los compuestos de cianuro en relaves mineros son altamente contaminantes y tóxicos. Se emplean diversos métodos para su tratamiento, como la oxidación avanzada con reactivos químicos, la adición de leche de cal y cloro para oxidar el cianuro, y técnicas como el intercambio iónico y la ósmosis inversa. El tratamiento electroquímico es más adecuado para concentraciones significativas de cianuro. En la electrólisis los efluentes alcalinos que contienen cianuros se oxidan en el ánodo formando iones de cianato y su posterior electro oxidación química a productos finales como:

De uno u otro modo, los relaves de cianuro tienen que ser tratados antes de ser descargados al medio ambiente aplicando diversos métodos para su oxidación y estabilización, esto encarece el proceso de extracción de oro, por ello, se proponen en diversas investigaciones métodos para la recuperación de metales y cianuro que pueden ser comercializados, de esta forma, se devuelve cierta cantidad de cianuro al proceso de lixiviación, disminuyendo su generación en los relaves lo que a su vez minimiza su tratamiento y costo (Yang et al., 2020).

Los compuestos de cianuro son conocidos por su alta toxicidad y su potencial contaminante en los relaves mineros. Para tratar estos compuestos y reducir su impacto ambiental, se utilizan una variedad de métodos que abarcan lo químico, fisicoquímico, electroquímico y bioquímico.

Métodos fisicoquímicos

Los métodos de tratamiento por intercambio iónico son eficaces para extraer cianuros simples y complejos de las soluciones. En este proceso, los cianuros se capturan en resinas de intercambio iónico y luego se pueden regenerar para recuperar el cianuro. Este método es particularmente útil cuando se deben eliminar concentraciones significativas de cianuro.

La ósmosis inversa es otro método fisicoquímico que puede eliminar hasta un 90% de los compuestos de cianuro de las soluciones. Este proceso utiliza membranas semipermeables para filtrar y separar los iones de cianuro de las soluciones.

Métodos Electroquímicos

En el tratamiento electroquímico de efluentes alcalinos que contienen cianuros, se lleva a cabo la oxidación en el ánodo, donde los cianuros se convierten en iones de cianato. A continuación, se someten a una electrooxidación química que produce productos finales como amonio NH_4^+ y carbonato CO_3^{2-} . Este método es especialmente efectivo en situaciones donde se requiere una reducción significativa de cianuro en los efluentes.

Estos métodos de tratamiento del cianuro son fundamentales para garantizar que los relaves mineros no contaminen el medio ambiente. Además, se están investigando enfoques para la recuperación de metales y cianuro, como el cobre, a partir de los relaves. Esto no solo reduce los costos asociados con el tratamiento de residuos, sino que también contribuye a la sostenibilidad y la gestión responsable de los recursos en la industria minera (Cosmos et al., 2020; Yang et al., 2020).

1.9 Interacción del cobre con soluciones cianuradas

El átomo de cobre es conocido por su baja actividad química, lo que significa que no tiende a reaccionar con otros elementos o compuestos con facilidad. A pesar de esta baja actividad, el cobre tiene la capacidad de combinar químicamente con otras especies en función de su valencia. La valencia es una propiedad que determina la capacidad de un átomo para formar enlaces químicos con otros átomos y está influenciada por el número de electrones en la capa más externa del átomo.

El cobre puede exhibir valencias de +1 (cuproso), +2 (cúprico) y ocasionalmente +3. Sin embargo, la valencia más comúnmente observada y con la que con mayor frecuencia forma compuestos es la valencia +2. La valencia +3 es relativamente poco común y se encuentra en casos de sustancias inestables.

Un dato interesante es que, en soluciones acuosas, los iones de cobre con valencia +2 confieren a la solución un característico color azul. Por otro lado, los iones de cobre con valencia +1 son incoloros, lo que proporciona una distinción visual útil para identificar la valencia predominante de los iones de cobre en una solución (Manktelow et al., 1984).

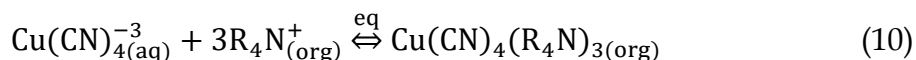
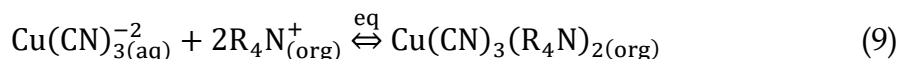
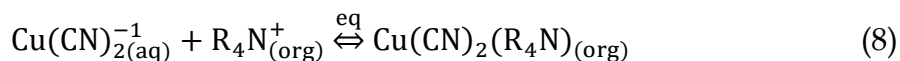
El cobre, en particular, dentro de soluciones que contienen iones cianuro, actúa con una valencia de +1, también conocida como una forma reducida Cu^+ . En esta valencia, el cobre forma diversas especies químicas, como CuCN (cianuro de cobre): $\text{CuCN}_{(s)}$, $\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}$, $\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$ y $\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}$. Este comportamiento químico es notable ya que resulta en un desequilibrio de carga eléctrica en las últimas tres

especies cianuradas de cobre, que presentan cargas de -1, -2 y -3 respectivamente. Esto significa que estas especies tienen carga negativa y, por lo tanto, tienen la capacidad de enlazarse con sustancias que tienen carga positiva.

Una de las sustancias con las que estas especies cianuradas de cobre pueden enlazarse son los compuestos que contienen amonio, específicamente aquellos que contienen amonio cuaternario. Este tipo de enlace entre el cobre y el amonio cuaternario es de particular interés en diversos contextos químicos y se deriva de las propiedades únicas de estas especies cargadas en solución.

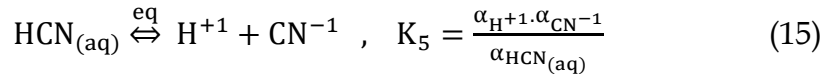
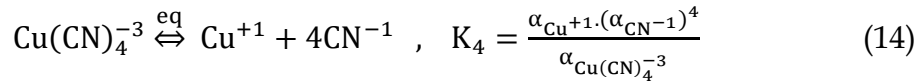
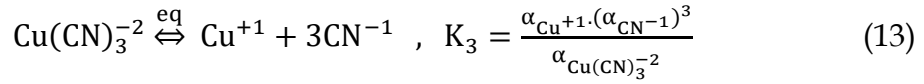
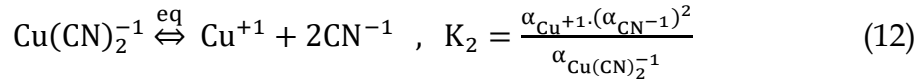
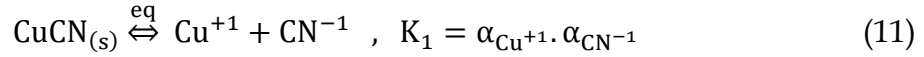
Este comportamiento químico es relevante en aplicaciones que involucran la extracción y procesamiento de minerales, así como en otros procesos químicos en los que se manejen soluciones que contienen cianuro y cobre. La capacidad de formar enlaces con sustancias con carga positiva tiene implicaciones importantes en la separación y recuperación de metales valiosos en dichos procesos.

Para separar el cobre de soluciones cianuradas, que a menudo se obtienen de los procesos de lixiviación de oro, con el objetivo de recuperar el cianuro y garantizar que su reutilización no cause problemas, se recurre a la utilización de compuestos de amonio cuaternario para llevar a cabo su precipitación. Las especies químicas resultantes de este proceso se originan a través de las siguientes reacciones:



La concentración de cada una de estas especies en la solución se verá influida por varios factores clave, entre los que destacan la temperatura, el pH y la relación de iones cianuro y cobre (cianuro/cobre) (Botz et al., 2001).

De acuerdo a lo mencionado, y con el propósito de predecir la presencia de ciertas concentraciones de las especies indicadas se realiza el estudio de equilibrio termodinámico para el sistema compuesto por cobre, cianuro y agua.



Donde K_i son las constantes de equilibrio para cada una de las reacciones en equilibrio. α_i , es la actividad de la especie i , que se calcula mediante el producto de la concentración molar de la especie i y el coeficiente de actividad γ_i . $\alpha_i = [\text{Ci}] \gamma_i$. Con relación a las constantes de equilibrio, dentro de la bibliografía especializada se encontró datos de las constantes de equilibrio para para estas reacciones de cobre y cianuro a una temperatura de 25 °C.

Tabla 2

Constantes de equilibrio

Constante de equilibrio	Magnitud
K_1	1.065×10^{-20}
K_2	1.026×10^{-24}
K_3	9.286×10^{-30}
K_4	2.869×10^{-31}
K_5	6.031×10^{-10}

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 44) por Poma Palacios (2022).

Con estas constantes, es factible determinar la distribución de las concentraciones correspondientes a cada especie resultante, basándonos en la concentración inicial de la especie reaccionante. Sin embargo, para obtener un diagrama que permita visualizar la distribución de todas las especies en el sistema cobre-cianuro-agua, es necesario expresar estas relaciones en forma de ecuaciones

matemáticas que relacionen las concentraciones de las especies con cada conjunto de condiciones de pH y las concentraciones totales de cobre y cianuro (Alonso-González et al., 2013).

Para llevar a cabo este proceso, es fundamental establecer relaciones de balance de masa tanto para el cobre como para el cianuro. Asimismo, se ha observado en la literatura que en el intervalo de valores de pH entre 3 y 12, no se produce la precipitación de cianuro de cobre o CuCN en estado sólido (Alonso-González et al., 2010). Por lo tanto, en este rango de pH, el balance de masa para el total de cobre y cianuro, cumple con lo siguiente:

$$[\text{Cu}_T] = [\text{Cu}^+] + [\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}] + [\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}] + [\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}] \quad (16)$$

$$[\text{CN}_T] = [\text{CN}^-] + [\text{HCN}_{(\text{acuoso})}] + 2[\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}] + 3[\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}] + 4[\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}] \quad (17)$$

Para pH menores a 3, aparece precipitado de cianuro de cobre. En esta situación, se verifica que $[\text{CN}^-][\text{Cu}^+] > K_1$ y además el balance de masa para el cobre y cianuro totales, es del siguiente modo:

$$[\text{Cu}_T] = [\text{Cu}^+] + [\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}] + [\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}] + [\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}] + [\text{CuCN}_{\text{sólido}}] \quad (18)$$

$$[\text{CN}_T] = [\text{CN}^-] + [\text{HCN}_{(\text{acuoso})}] + 2[\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}] + 3[\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}] + 4[\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}] + [\text{CuCN}_{\text{sólido}}] \quad (19)$$

Para determinar la concentración de cada especie en un rango de pH que va de 3 a 12, es necesario resolver el sistema de ecuaciones 16 y 17. A partir de esta solución, se obtendrán las concentraciones molares del cianuro $[\text{CN}^-]$ y el cobre $[\text{Cu}^+]$, pero para lograrlo, es imperativo expresar ambas ecuaciones en función de estas concentraciones y las concentraciones iniciales. Para llevar a cabo esta tarea, nos apoyaremos en las relaciones establecidas por las constantes de equilibrio, las cuales están representadas en las ecuaciones del 12 y 15.

Para valores de pH inferiores, es necesario resolver tanto las ecuaciones 16 y 17, las cuales también se expresan en función de las concentraciones de $[\text{CN}^-]$, $[\text{Cu}^+]$ así como las concentraciones totales. Una vez determinadas las concentraciones de cianuro y cobre, se procederá a verificar si se forma un precipitado, tal como lo indica la ecuación 11. Luego, haciendo uso de estas

cantidades y aplicando las ecuaciones 18 y 19, se calculará la concentración de $[\text{CuCN}_{\text{sólido}}]$ (Alonso-González et al., 2013).

Las expresiones matemáticas resultantes en términos de las $[\text{CN}^-]$, $[\text{Cu}^+]$, $[\text{H}^+]$ y las concentraciones totales, para determinar la concentración de CuCN sólido son las ecuaciones 20 y 21:

$$[\text{CuCN}_{\text{sólido}}] = [\text{Cu}_T] - \frac{K_1}{[\text{CN}^-]\gamma_{\text{CN}^-}\gamma_{\text{Cu}^+}} \left(1 + \frac{[\text{CN}^-]^2\gamma_{\text{CN}^-}^2\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_2\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})^-}} + \frac{[\text{CN}^-]^3\gamma_{\text{CN}^-}^3\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_3\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})_3^-2}} + \frac{[\text{CN}^-]^4\gamma_{\text{CN}^-}^4\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_4\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})_4^-3}} \right) \quad (20)$$

$$[\text{CuCN}_{\text{sólido}}] = [\text{CN}_T] - [\text{CN}^-] - \frac{[\text{H}^+]\gamma_{\text{H}^+}[\text{CN}^-]\gamma_{\text{CN}^-}}{K_5} - \frac{K_1}{[\text{CN}^-]\gamma_{\text{CN}^-}\gamma_{\text{Cu}^+}} \left(\frac{2[\text{CN}^-]^2\gamma_{\text{CN}^-}^2\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_2\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})^-}} + \frac{3[\text{CN}^-]^3\gamma_{\text{CN}^-}^3\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_3\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})_3^-2}} + \frac{4[\text{CN}^-]^4\gamma_{\text{CN}^-}^4\gamma_{\text{Cu}^+}}{K_4\gamma_{\text{Cu}(\text{CN})_4^-3}} \right) \quad (21)$$

Con respecto a los coeficientes de actividad, se pueden calcular mediante la aproximación propuesta por Davies, ecuación 22.

$$-\log\gamma_i = Az^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1+\sqrt{I}} - 0.2I \right) \quad (22)$$

Donde I es la fuerza iónica de la solución y para ello se debe considerar todos los iones presentes. A es una constante que depende de la temperatura y de la constante dieléctrica del agua (disolvente). En este caso a 25 °C, $A = 0,51$. La fuerza iónica se calcula con la ecuación 23:

$$I = 0.5 \sum C_i Z_i^2 \quad (23)$$

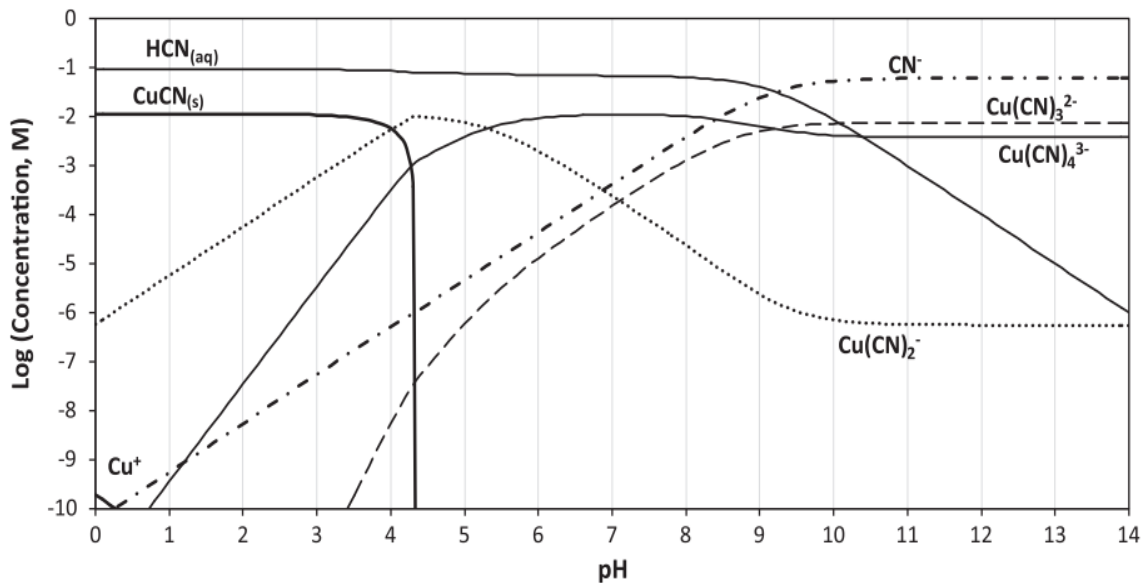
Las concentraciones de los iones se representan con C_i , mientras que Z_i refleja la carga correspondiente de cada ion. En el estudio realizado por (Alonso-González et al., 2013), se presenta el diagrama que ilustra la distribución de especies en el sistema compuesto por cianuro, cobre y agua. En este diagrama se observa que las especies predominantes, presentes a pH mayor que 4,3 son $\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}$, $\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$ y $\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}$. Mientras que a partir de pH igual a 9 las especies en mayor concentración son las dos últimas.

La Figura 2 es diagrama de distribución de especies, el cual es una herramienta útil para entender cómo las diferentes especies químicas interactúan en una

solución. El eje horizontal representa el pH de la solución, mientras que el eje vertical representa la fracción molar de cada especie química presente en la solución. Las diferentes especies químicas se representan mediante diferentes líneas. En el diagrama, podemos ver que la especie predominante a pH 5 es $\text{Cu}(\text{CN})_2^{-1}$, mientras que a pH 11, la especie predominante es $\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$ y se ve que a pH 9, la especie predominante es $\text{Cu}(\text{CN})_4^{-3}$. Así mismo se observa para pH entre 7 y 11 se encuentran todas las especies de cianuro-cobre o cianuro. Del análisis termodinámico se puede conocer la concentración de cada especie de cobre-cianuro para cualquier valor de pH para cualquier solución de cobre-cianuro.

Figura 2

Diagrama de especies sistema cobre cianuro agua



Nota. Diagrama a 25 °C, 2700 mg/L CN y 730 mg/L Cu (molar CN/Cu ratio = 9). Tomado de *Copper cyanide removal by precipitation with quaternary ammonium salts* (Alonso-Gonzales et al., 2013) citado por Poma Palacios (2022).

1.10 Tecnologías limpias

El desarrollo de las tecnologías limpias representa un esfuerzo significativo en la búsqueda de soluciones ambientales sostenibles y la reducción de la contaminación. Este proceso involucra una serie de enfoques y acciones coordinadas que buscan optimizar los procesos industriales y promover

prácticas más respetuosas con el medio ambiente. Según Nasibov et al. (1998), las tecnologías limpias se conciben como parte integral del concepto de "Producción más limpia". Este enfoque implica la implementación de medidas desde el inicio de cualquier proceso productivo para reducir la contaminación y minimizar el impacto ambiental. A su vez, estas tecnologías se integran en el marco de la ecoeficiencia, como señalan los mismos autores. La ecoeficiencia busca maximizar el valor del producto final utilizando menos recursos, lo que implica una gestión más eficiente de la energía y la materia prima.

El control exhaustivo de los procesos productivos es fundamental en el desarrollo de tecnologías limpias. Tal como lo destaca Yang (2022), este enfoque implica un análisis detallado de cada etapa del ciclo productivo con el objetivo de identificar áreas de mejora y reducir la generación de residuos y emisiones contaminantes. Este control exhaustivo no solo se centra en la optimización de los procesos industriales, sino también en la adopción de medidas preventivas para evitar la contaminación desde sus fases iniciales.

Además, el desarrollo de tecnologías limpias está estrechamente vinculado con la conciencia empresarial y la búsqueda de una ventaja competitiva en el mercado. Figueroa et al. (2021) resaltan que las empresas e industrias están cada vez más conscientes de la importancia de adoptar prácticas ambientales responsables. Esto no solo mejora su imagen corporativa, sino que también les permite diferenciarse en un mercado cada vez más orientado hacia la sostenibilidad. De esta manera, las tecnologías limpias se convierten en una herramienta clave para promover la rentabilidad empresarial en armonía con la conservación del medio ambiente.

1.11 Producción sin residuos y tecnologías limpias

El proceso de producción sin residuos, también conocido como producción más limpia o tecnologías limpias, representa un cambio fundamental en la forma en que las industrias abordan su actividad productiva en relación con el medio ambiente. Este enfoque, como lo describe Polyak (1992), reconoce la necesidad imperante de alejarse de los enfoques tecnológicos tradicionales que ignoran las restricciones ambientales. En lugar de ello, propone un nuevo paradigma que se

fundamenta en la utilización racional y eficiente de los recursos naturales, con una clara tendencia hacia la maximización del reúso.

En este sentido, Gudim et al. (2009) destacan que la producción más limpia se centra en optimizar los procesos productivos y reducir los impactos ambientales al mínimo, fomentando a las industrias a adoptar prácticas y tecnologías que minimicen la generación de desechos y la contaminación. Este enfoque busca promover la sostenibilidad económica al mismo tiempo que se minimizan los impactos negativos en el entorno, lo que contribuye a un equilibrio más armonioso entre la producción industrial y la conservación del medio ambiente. El proceso de producción sin residuos implica la implementación de tecnologías avanzadas y métodos de gestión que maximicen la eficiencia en el uso de los recursos naturales, la energía y los materiales, y que reduzcan al mínimo los desechos. Como señala Valuev et al. (2011), estas tecnologías están diseñadas para generar una menor cantidad de residuos o, idealmente, evitar la generación de residuos en su totalidad. Se promueve la incorporación de tecnologías limpias que impulsan una producción industrial con una reducción significativa en la generación de residuos y permiten la reutilización de los residuos resultantes a través de innovadoras y eficientes técnicas y procesos.

Además, como subraya Salas (2020), la producción más limpia se distingue por su enfoque rentable y preventivo en la protección del medio ambiente. En lugar de abordar únicamente la gestión de residuos y la mitigación de la contaminación después de que se ha producido, busca prevenir estos problemas desde el inicio del proceso productivo. Esto implica evaluar y adaptar los procesos de producción a nuevas tecnologías limpias que son más seguras para el medio ambiente, aunque esta transformación presenta diversos obstáculos y dificultades, como la falta de información sobre estas tecnologías, la carencia de personal capacitado y el alto costo económico de las inversiones necesarias para implementarlas.

CAPÍTULO II

AMONIO CUATERNARIO

2.1 Amonio cuaternario

De acuerdo con Diomedi et al. (2017), los amonios cuaternarios, también conocidos como compuestos de amonio cuaternario o cuaternarios de amonio, son una clase de compuestos orgánicos que contienen un átomo de nitrógeno cuaternario y cuatro grupos orgánicos unidos a este átomo central de nitrógeno. La estructura básica de estos compuestos es el catión amonio (NH_4^+), en el cual un átomo de nitrógeno está rodeado por cuatro átomos de hidrógeno, lo que le confiere una carga positiva.

La característica principal es que uno o más de los átomos de hidrógeno en el grupo amonio son reemplazados por grupos orgánicos más grandes, lo que resulta en una molécula con una carga positiva permanente. Estos grupos orgánicos pueden variar en tamaño y estructura, lo que afecta las propiedades físicas y químicas del compuesto resultante.

Son solubles tanto en agua como en alcohol, lo que los hace adecuados para una variedad de aplicaciones en la limpieza y desinfección. Además, muestran actividad desinfectante en medios ácidos, aunque su acción principal se da en entornos alcalinos. Esto significa que son efectivos para desinfectar superficies en condiciones alcalinas, como las que se encuentran comúnmente en entornos hospitalarios.

Otra propiedad importante es su capacidad para actuar como agentes tensoactivos, lo que significa que pueden reducir la tensión superficial del agua y ayudar a dispersar grasas y aceites. Esta propiedad los hace útiles en la limpieza de superficies contaminadas con materia orgánica, aunque es importante tener en cuenta que su eficacia desinfectante puede disminuir en presencia de grandes cantidades de materia orgánica.

2.2 Remoción de cobre de soluciones cianuradas

Tabla 3

Remoción de cobre con sales de amonio cuaternario

Técnica	Descripción	Autores
Lixiviación selectiva del cobre	Extracción selectiva del cobre antes de la lixiviación con cianuro del oro y la plata.	Muir et al. (1989), Sceresini (2005)
Lixiviación con tiosulfato	Lixiviación selectiva para oro en minerales de oro y cobre.	Abbruzzese et al. (1995), Aylmore y Muir (2001)
Lixiviación con tiourea	Lixiviación selectiva para oro en minerales de oro y cobre.	Chen et al. (1980), Deschênes y Ghali (1988)
Degradación natural	Eliminación natural del cobre disuelto en solución.	Botz y Mudder (2000), Marsden y House (2006)
Biodegradación	Proceso de eliminación del cobre disuelto mediante actividad biológica.	Akcil y Mudder (2003), White et al. (2000)
Cloración alcalina	Tratamiento mediante cloración alcalina para precipitar el cobre.	Ingles y Scott (1987)
Oxidación con peróxido de hidrógeno	Oxidación del cobre disuelto utilizando peróxido de hidrógeno.	Knorre y Griffiths (1984), Vickell (1989)
Proceso de oxidación Inco SO₂/aire	Oxidación del cobre disuelto mediante el proceso de Inco con SO ₂ /aire.	Devuyt et al. (1989), Robbins (1996)
AVR	Proceso de acidificación-volatilización-regeneración para recuperación de cobre y cianuro.	McNamara (1989)
SART	Proceso de sulfidización-acidificación-reciclaje-espesamiento para recuperación de cobre y cianuro.	MacPhail et al. (1998)
Extracción con disolventes	Extracción selectiva de cobre y cianuro utilizando disolventes específicos.	Davis et al. (1999), Xie y Dreisinger (2009a, b)
Resinas de intercambio iónico	Utilización de resinas de intercambio iónico para la recuperación selectiva de cobre y cianuro de la solución.	Fleming (2005), Fleming et al. (1998), Satalic et al. (1996)

Nota. Los autores considerados fueron citados por Alonso-Gonzales et al. (2013).

Según Lu et al. (2002), las constantes de estabilidad de las especies de cianuro de cobre están sujetas a una serie de factores interrelacionados, como la relación molar entre el cianuro y el cobre, la concentración total de cianuro, el pH y la temperatura. Esta interdependencia subraya la necesidad de una comprensión detallada de los parámetros que influyen en la estabilidad de estas especies para optimizar los procesos de extracción.

La cianuración, como método industrialmente aceptado para la recuperación de oro y plata, implica la conversión de estos metales en complejos solubles en agua, facilitando su extracción de minerales de baja calidad. Sin embargo, el proceso se ve desafiado cuando se trata de minerales de cobre-oro que contienen óxido de cobre y sulfuro secundario. Durante la cianuración, el cobre forma complejos con el cianuro, lo que resulta en la degradación del cianuro y la solubilización del cobre como complejos de cianuro cuproso. Esta situación no solo puede afectar adversamente la eficiencia del proceso, sino que también puede tener un impacto económico significativo debido al consumo excesivo de cianuro y la pérdida de cobre valioso.

La destrucción del cianuro, es un paso crucial para minimizar el impacto ambiental y garantizar la seguridad en las operaciones mineras. Se describen varios métodos para este fin, incluida la cloración alcalina y la oxidación térmica, destacando la importancia de una gestión adecuada de estos procesos. En cuanto a la recuperación de cobre y cianuro de las soluciones de lixiviación, se han desarrollado diversas estrategias. Estas incluyen métodos como la acidificación-volatilización-regeneración (AVR), el intercambio iónico y la electrólisis. Además, se han explorado innovadoras técnicas como la extracción por solventes-electroobtención, que ofrece una prometedora alternativa para recuperar tanto el cobre como el cianuro de los efluentes mineros.

Otro enfoque interesante es el propuesto por Alonso-González et al. (2013), quienes investigaron la viabilidad de eliminar los complejos de cobre-cianuro mediante la precipitación con sales de amonio cuaternario. Esta técnica podría permitir la recirculación del cianuro restante en el proceso de cianuración, mitigando así los efectos adversos de la presencia de especies de cobre.

La precipitación con sales de amonio cuaternario implica la formación de un precipitado insoluble de complejos de cobre-cianuro, lo que resulta en la separación efectiva de estos complejos de la solución de lixiviación. Este método presenta varias ventajas, como su capacidad para funcionar en condiciones de pH amplias y su alta eficiencia en la eliminación de cobre, lo que reduce el riesgo

de interferencia con el proceso de cianuración. Al implementar esta técnica, se sugiere que la solución restante, que ahora está libre de cobre y contiene cianuro libre, puede reciclarse nuevamente en el proceso de cianuración. Esto no solo reduce los costos asociados con la adquisición de nuevos reactivos de cianuro, sino que también minimiza el impacto ambiental al disminuir la cantidad de desechos generados.

Además, la precipitación con sales de amonio cuaternario puede ser una opción viable para las operaciones mineras que buscan cumplir con regulaciones ambientales más estrictas en cuanto a la concentración de cianuro en los efluentes. Al eliminar los complejos de cobre-cianuro de manera efectiva, este método contribuye a la gestión responsable de los residuos mineros y al mantenimiento de estándares ambientales más altos.

2.2.1 Recuperación de cobre y cianuro

Según Xie et al. (2013), la extracción de oro a partir de minerales auríferos continúa siendo un proceso fundamentalmente dependiente de la lixiviación mediante soluciones alcalinas acuosas de cianuro. Sin embargo, la presencia de minerales de cobre dentro de la matriz aurífera presenta desafíos considerables. La interacción entre los minerales de cobre y el cianuro resulta en la formación de complejos de cianuro de cobre durante el proceso de lixiviación. Esta reacción conduce al agotamiento del cianuro libre en la solución, lo que, a su vez, conlleva a una penalización económica significativa.

Para contrarrestar esta situación, se requiere mantener niveles elevados de cianuro libre durante todo el proceso. Este agotamiento no solo incurre en costos adicionales debido al consumo excesivo de cianuro, sino que también resulta en la pérdida de cobre valioso en los residuos. Además, en un contexto global de crecientes restricciones ambientales en torno a la descarga de cianuro proveniente de la industria minera, es imperativo desarrollar y adoptar tecnologías que permitan la recuperación eficiente tanto del cobre como del cianuro de las soluciones cianuradas estériles.

Estas tecnologías deben ser capaces de abordar las limitaciones operativas y los costos asociados con los métodos tradicionales de recuperación directa, como la acidificación-volatilización-reneutralización (AVR) y sus variantes, especialmente en el tratamiento de soluciones de baja concentración o con un alto contenido metálico. En este sentido, se ha prestado una atención considerable a las tecnologías de recuperación indirecta, tales como el uso de carbón activado, resinas de intercambio iónico (IX) y extracción por solvente (SX), las cuales muestran promesas en la preconcentración del cobre y el cianuro para su posterior recuperación.

2.2.2 Disolución del oro y supresión del cobre

En la minería de oro y cobre, es crucial optimizar el proceso de disolución del oro y la supresión del cobre para mejorar la eficiencia de extracción del metal precioso y reducir el consumo de cianuro (Oraby & Eksteen, 2016). Se ha observado que los yacimientos que contienen cantidades significativas de cobre soluble en cianuro tienden a generar un alto consumo de cianuro con una extracción baja de oro. Además, la presencia de niveles considerables de cianuro disociable en ácido débil implica la necesidad de eliminarlo antes de verter los desechos en el entorno, lo cual incrementa los costos para las compañías mineras de oro.

Para abordar este desafío, se han comparado diferentes procesos de lixiviación de oro, como el cianuro-caústico, cianuro-amoníaco y cianuración convencional. Se ha observado que la lixiviación final en el sistema cianuro-caústico logra una extracción superior de oro y una concentración menor de cobre en comparación con otros métodos.

Un hallazgo significativo es que a un pH superior a 12, la velocidad de disolución del oro aumenta considerablemente en soluciones que contienen soda cáustica y cianuro. La aplicación de soda cáustica como modificador del pH durante la lixiviación selectiva de oro sobre el cobre en un concentrado que presenta cantidades considerables de cobre soluble en cianuro, demuestra la posibilidad

de mejorar la disolución del oro y reducir el consumo de cianuro mediante la optimización de los parámetros de lixiviación.

Entre las condiciones cruciales para la lixiviación están la concentración de cianuro, la relación CN/cobre reactivo y el pH de la solución de lixiviación. Estos parámetros son fundamentales para garantizar una extracción eficiente del oro y una supresión efectiva del cobre, lo que a su vez reduce el consumo de cianuro y los costos asociados.

2.2.3 Tratamiento de un mineral rico en cobre y oro

De acuerdo con Alonso-González et al. (2010), precisa el desafío que representa la presencia de cobre en la solución de lixiviado durante el proceso de cianuración. Este problema se debe a que el cobre puede reaccionar con el cianuro, formando complejos de cuprocianuro que interfieren negativamente en la extracción de los metales preciosos, como el oro. Para abordar esta limitación, los autores proponen el uso de sales de amonio cuaternario como extractantes para la remoción del cobre de la solución. Utilizando una solución sintética que simula las condiciones de las plantas de cianuración, los investigadores demuestran que es posible eliminar hasta el 90% del cobre en el precipitado al agregar ciertas concentraciones de extractantes a valores específicos de pH.

Por otro lado, Alonso-González et al. (2013), se profundiza en la problemática del cianuro de cobre en el proceso de extracción de metales preciosos. Se confirma que la formación de complejos de cuprocianuro puede afectar adversamente la eficiencia del proceso de lixiviación y resultar en un alto consumo de cianuro. Nuevamente, se propone el uso de sales de amonio cuaternario para eliminar estos complejos mediante precipitación, lo que permite recircular la solución tratada al proceso de lixiviación. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de esta técnica, destacando la importancia de la eliminación del cobre para mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso de extracción de metales preciosos.

Por su parte, Bas y Deveci (2012) abordan el desafío que presentan los minerales de cobre en la extracción de oro durante el proceso de lixiviación. El cianuro de cobre formado durante esta etapa puede impactar negativamente en los procesos posteriores, como la absorción de oro por carbono activado. Para mitigar este problema, los autores proponen el uso de amoniaco como pretratamiento, demostrando que esta técnica mejora significativamente la extracción de oro al eliminar el cobre soluble presente en el mineral. Los resultados muestran un aumento notable en la obtención de oro, así como una reducción significativa en el consumo de cianuro. Además, se evidencia que la lixiviación del complejo cianuro-amoniaco proporciona buenos resultados en la extracción de oro, lo que sugiere su efectividad como alternativa en el tratamiento de minerales de oro refractarios.

CAPÍTULO III

USO DEL AMONIO CUATERNARIO EN LA SEPARACIÓN DE COBRE Y RECUPERACIÓN DE CIANURO

3.1 Razones de la investigación

La motivación detrás de la investigación sobre la regeneración del cianuro y la recuperación del cobre en la lixiviación de minerales auríferos está profundamente arraigada en las implicaciones ambientales, económicas y regulatorias que enfrenta la industria minera. Este estudio se fundamenta en una serie de consideraciones críticas.

Primero, el impacto ambiental asociado con la lixiviación de cianuro es considerable, dado que este proceso puede conducir a la contaminación del agua, aire y suelo si no se maneja adecuadamente (Shamsuddin, 2021). La capacidad del cianuro para formar compuestos tóxicos y su potencial para afectar negativamente a los ecosistemas y la salud humana subraya la urgencia de desarrollar métodos que permitan su reutilización y minimicen su presencia en los desechos. La regeneración del cianuro ofrece una solución prometedora, permitiendo que este compuesto sea reciclado y utilizado nuevamente en el proceso de lixiviación, reduciendo así la cantidad total de residuos generados y mitigando los riesgos ambientales asociados.

En segundo lugar, la contaminación por cianuro, destacan las vulnerabilidades en las prácticas actuales de manejo del cianuro en la minería (Fleuriault et al., 2021). Estos eventos subrayan la necesidad crítica de mejorar las estrategias de gestión del cianuro para prevenir futuras catástrofes ambientales, fortaleciendo así la seguridad y sostenibilidad de las operaciones mineras.

Además, la eficiencia en la extracción de oro de minerales de baja concentración es un desafío significativo, dada la escasa presencia de este metal precioso en la corteza terrestre (Munhoz Junior, 2019). La recuperación y el reciclaje del cianuro se presentan como estrategias clave para optimizar el uso de este reactivo en la extracción del oro, permitiendo una operación más económica y ambientalmente responsable.

Desde una perspectiva regulatoria, la adopción de tecnologías limpias y métodos de recuperación del cianuro responde a la necesidad de cumplir con legislaciones

ambientales cada vez más estrictas (Alonso-González et al., 2010). Estas regulaciones, destinadas a proteger el medio ambiente y la salud pública, ejercen presión sobre la industria para implementar prácticas que limiten la liberación de sustancias tóxicas y promuevan la sostenibilidad en las operaciones mineras.

Por último, la recuperación del cobre de las soluciones de lixiviación no solo se alinea con los principios de eficiencia en el uso de recursos y minimización de residuos, sino que también representa una oportunidad económica significativa (Alonso-González et al., 2013). Al extraer cobre como subproducto valioso, las operaciones mineras pueden generar ingresos adicionales mientras reducen el impacto ambiental de sus desechos.

3.2 Objetivo de la investigación

El objetivo principal es evaluar el proceso de remoción de cobre por precipitación en soluciones sintéticas de cianuro mediante el uso de amonio cuaternario, considerando las características de la solución sintética de cianuro contaminada con cobre, la influencia de variables como la dosificación de amonio cuaternario, el pH de la solución, el tiempo de mezcla; y obtener los valores de recuperación del cobre para su reutilización. Con el fin de obtener valores óptimos de recuperación tanto para el cianuro como para el cobre, para su posterior reutilización.

3.3 Método, diseño y tipo de investigación

La aplicación de una metodología de enfoque cuantitativo es justificada en este estudio debido a su naturaleza experimental, donde se busca medir de manera objetiva y cuantificable el efecto de diferentes variables, como la concentración de amonio cuaternario, el pH y la temperatura, en la remoción de cobre de soluciones sintéticas de cianuro. El alcance explicativo del diseño experimental permite no solo medir las variables, sino también estudiar sus relaciones e interacciones entre ellas para comprender los factores que intervienen en el proceso de remoción de cobre (Hernández-Sampieri & Mendoza Torres, 2018; Reza Berrecil, 1997). El diseño factorial es apropiado para este estudio porque

analiza todas las posibles combinaciones de las condiciones de las variables en el experimento, permitiendo una evaluación exhaustiva de cómo cada factor influye en la variable de interés, que en este caso es la remoción de cobre (N^f). Los factores seleccionados, como la concentración de amonio cuaternario (X_1), el pH (X_2) y la temperatura (X_3), son relevantes en el proceso de remoción de cobre y son susceptibles de ser controlados y manipulados en el diseño experimental para evaluar su impacto en el resultado deseado.

Donde:

$Número\ de\ pruebas = N^f$

N	=	Indica los niveles
f	=	Representa los niveles o variables estudiadas

Tabla 4

Niveles máximos y mínimos de los factores

Factores	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
X1: Concentración de amonio cuaternario	2,5 g/L	7,5 g/L
X2: pH	8	10
X3: Temperatura	17 °C	22 °C

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 57) por Poma Palacios (2022).

La población en este estudio se refiere al conjunto total de solución sintética de cianuro que puede ser producida en el laboratorio, abarcando todas las posibles variantes y cantidades. Se destaca que esta población es finita, lo que significa que tiene un límite definido y conocido. En este caso, la muestra consiste en la solución sintética cianurada preparada en el laboratorio, con una composición precisa y concentraciones específicas de cobre y cianuro, por lo tanto, la muestra está compuesta por 2,4 litros de solución sintética cianurada, preparada en el laboratorio con una concentración precisa de 700 ppm de cobre y 2500 ppm de cianuro. Esta se elaboró mediante la adición de cantidades definidas de sulfato de cobre pentahidratado, cianuro de sodio y óxido de calcio.

Tabla 5

Sustancias empleadas para la preparación de la solución sintética

Sustancia	Pureza	Cantidad adicionada a un litro de solución
CuSO ₄ .5H ₂ O	99% en peso	2,7774 g/L
NaCN	99,1 % en peso	4,7516 g/L
CaO	92,8 % en peso	1,1840 g/L

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 57) por Poma Palacios (2022).

La técnica de recopilación de datos en el proyecto de investigación incluyó la recopilación documental, aprovechando datos de antecedentes para iniciar la experimentación, así como la observación experimental mediante un diseño factorial completo de dos niveles y tres factores, realizando tres réplicas de los experimentos para garantizar la validez estadística (DOE factorial 2³).

Tabla 6

Diseño factorial 2³ como plan de experimentos

Ítem	Matriz de experimentos			Plan de experimentación			% de remoción de Cu		
	1	2	3	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
1	-	-	-	2.5	8	17	R -, -, -	R -, -, -	R -, -, -
2	+	-	-	7.5	8	17	R +, -, -	R +, -, -	R +, -, -
3	-	+	-	2.5	10	17	R -, +, -	R -, +, -	R -, +, -
4	+	+	-	7.5	10	17	R +, +, -	R +, +, -	R +, +, -
5	-	-	+	2.5	8	22	R -, -, +	R -, -, +	R -, -, +
6	+	-	+	7.5	8	22	R +, -, +	R +, -, +	R +, -, +
7	-	+	+	2.5	10	22	R -, +, +	R -, +, +	R -, +, +
8	+	+	+	7.5	10	22	R +, +, +	R +, +, +	R +, +, +

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 58) por Poma Palacios (2022).

Tabla 7

Equipos y reactivos utilizados

Equipos y materiales	Reactivos
- Mezclador magnético	- Sulfato de cobre pentahidratado
- Medidor de temperatura	- Cianuro de sodio
- Medidor de pH	- Óxido de calcio
- Balanza analítica	- Ácido sulfúrico grado reactivo
- Vasos de precipitado	- Amonio cuaternario (Cloruro de benzalconio)
- Fiola (matraz aforado) de 0,5 L y 1 L	- Agua destilada
- Equipo de filtración al vacío	- Agua desionizada
- Filtro de fibra de vidrio con tamaño de poro de 1,0 μm	
- Micropipetas de 1000 a 5000 μL y de 100 a 1000 μL	
- Instrumental de laboratorio	
- Recipientes plásticos con tapa para toma de muestra	

Nota. Adaptado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 58-60) por Poma Palacios (2022).

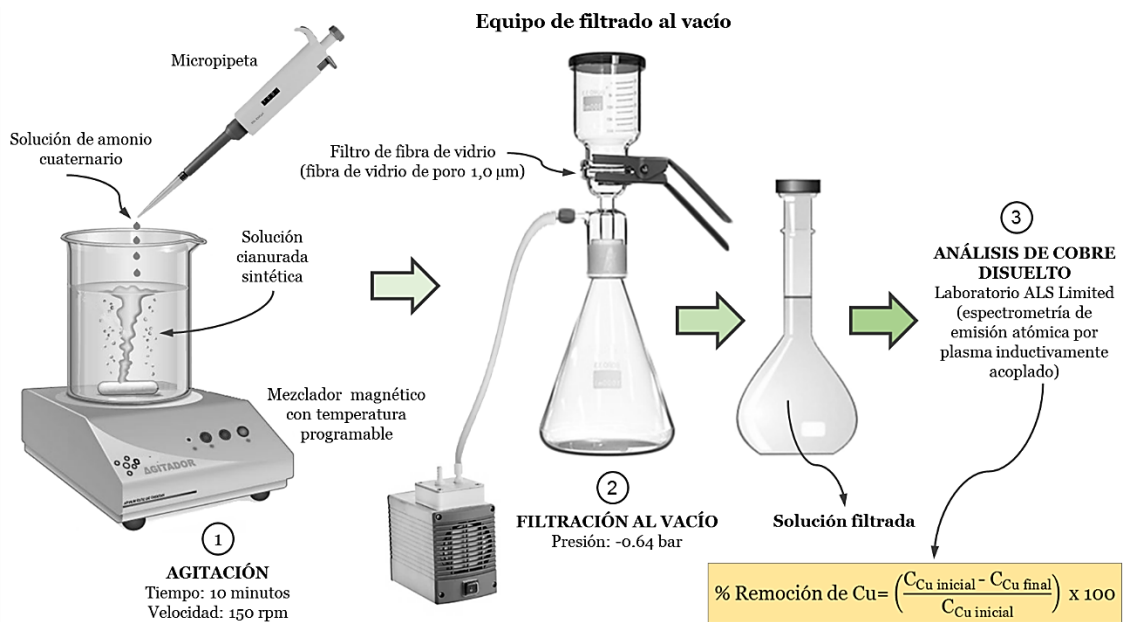
Para la preparación de las soluciones, se siguieron procedimientos específicos. La *solución sintética cianurada* se elaboró disolviendo en un litro de agua destilada 2,7774 g de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 4,7516 g de NaCN y 1,184 g de CaO, mediante la adición gradual de estos compuestos a aproximadamente 500 ml de agua destilada en una fiola, seguida de agitación manual hasta su completa disolución, luego se completó el volumen hasta un litro con más agua destilada. Por otro lado, la *solución de ácido sulfúrico 2,5N* se preparó añadiendo 3,438 ml de ácido sulfúrico (grado reactivo) a aproximadamente 25 ml de agua destilada en una fiola de 50 ml, y luego se completó el volumen hasta 50 ml con más agua destilada. Finalmente, la solución de amonio cuaternario (cloruro de benzalconio) se utilizó en la misma concentración suministrada por el fabricante, que era de 33 g por cada 100 ml de agua desmineralizada, sin necesidad de preparación adicional.

El procedimiento experimental para la recolección de datos sobre la precipitación de cobre de la solución cianurada sintética siguió un esquema detallado. En

primer lugar, se ajustó el mezclador magnético a una velocidad de agitación específica, con un tiempo y temperatura definidos. Se adicionó la cantidad necesaria de solución de H₂SO₄ para ajustar el pH según el plan experimental, seguido de la adición de amonio cuaternario para alcanzar la concentración deseada. Posteriormente, se activó el mezclador magnético durante un tiempo determinado y se filtró la mezcla resultante a través de un filtro de fibra de vidrio. Finalmente, el filtrado se dispuso en frascos herméticos para su envío al laboratorio de análisis químico en Lima, donde se determinó la concentración de cobre disuelto mediante espectrometría de emisión atómica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) por ALS Limited.

Figura 3

Esquema del procedimiento experimental



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 62) por Poma Palacios (2022).

La técnica de procesamiento de datos descrita en el texto es el análisis de varianza (ANOVA). El ANOVA se utilizó para evaluar la significancia de los efectos utilizando un valor p de 0,05 ($\alpha = 5\%$). Esta técnica es comúnmente utilizada para comparar la media de tres o más grupos para determinar si hay diferencias

significativas entre ellos. En este caso, se aplicó para analizar los efectos y las interacciones de los factores en el experimento.

Donde:

$$\% \text{remoción de Cu} = \left(\frac{C_{Cu \text{ inicial}} - C_{Cu \text{ final}}}{C_{Cu \text{ inicial}}} \right) * 100$$

$C_{Cu \text{ inicial}}$ = Es la concentración de Cu (mg/L) en la solución sintética cianurada antes de la precipitación con el amonio cuaternario.

$C_{Cu \text{ final}}$ = Es la concentración de Cu (mg/L) en la solución sintética cianurada y filtrada, después de la precipitación con amonio cuaternario.

3.4 Consideraciones éticas

La investigación puso en práctica una estrategia enfocada en minimizar el impacto ambiental de la lixiviación de cianuro, un tema de relevancia crucial en la industria minera. Al investigar la regeneración del cianuro y la recuperación del cobre, el estudio no solo busca mejorar la eficiencia y seguridad de estos procesos sino también reducir significativamente la liberación de compuestos tóxicos al ambiente. Este enfoque no solo atestigua un compromiso con la conservación ambiental y la sostenibilidad, sino que también subraya la función de la ciencia en la promoción de prácticas más ecológicas y responsables en sectores industriales críticos.

Por otro lado, se implementó rigurosos protocolos de seguridad para manejar de forma responsable el cianuro y el cobre, dos sustancias conocidas por sus riesgos potenciales. El uso de equipo de protección personal, la capacitación exhaustiva en el manejo de sustancias peligrosas y los procedimientos detallados para situaciones de emergencia son aspectos prioritarios para la seguridad y el bienestar del estudio. Esta atención meticulosa a la seguridad no solo cumple con altos estándares éticos, sino que también sirve como modelo para otras investigaciones que involucran materiales peligrosos.

Y, por último, se diseñó y ejecuto dentro de un marco estricto que respeta las leyes y regulaciones pertinentes a la gestión ambiental y la seguridad química. Al adherirse a estas normativas, la investigación garantiza su integridad y

credibilidad, asegurando que sus métodos y resultados de interés para la comunidad científica. Esto refleja una conciencia profunda de la importancia de la legalidad y la ética en la investigación, destacando el papel de la ciencia en la promoción de un futuro más seguro y sostenible.

3.5 Resultados de la investigación

Con el fin de evaluar la validez que sugiere la semejanza entre la solución de cianuro y cobre y los líquidos industriales empleados en la extracción de metales preciosos, se elaboró una solución artificial disolviendo 2,7774 gramos de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 4,7516 gramos de NaCN y 1,1840 gramos de CaO en un litro de agua destilada.

3.5.1 Características de la solución sintética de cianuro

a) Concentración de cobre disuelto

La tabla 5 muestra variaciones significativas en la concentración de cobre disuelto en respuesta a las distintas condiciones experimentales. Por ejemplo, se observa que a una concentración de 2,5 g/L de cloruro de benzalconio y pH 8, la concentración de cobre disuelto varía desde 425,828 mg/l hasta 452,054 mg/l entre las tres réplicas, sugiriendo una posible influencia de la aleatoriedad o la variabilidad experimental en la solubilidad del cobre bajo estas condiciones. Además, se destacan diferencias sustanciales en la concentración de cobre disuelto entre las distintas combinaciones de concentración de cloruro de benzalconio, pH y temperatura, lo que sugiere una interacción compleja entre estas variables en la solubilidad del cobre en la solución.

Tabla 8

Concentración de cobre disuelto

Nº	Conc. Cl Benz. (g/L)	pH	Temperatura (°C)	Cobre remanente, disuelto en solución filtrada (mg/l)		
				Replica I	Replica II	Replica III
1	2,5	8	17	428,97	425,828	452,054
2	2,5	8	22	392,02	389,189	404,918
3	2,5	10	17	453,828	453,36	454,768
4	2,5	10	22	411,218	411,58	417,652
5	7,5	8	17	59,251	56,163	55,265
6	7,5	8	22	46,52	43,302	41,501

7	7,5	10	17	133,102	135,298	135,872
8	7,5	10	22	129,646	133,784	132,634

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 65) por Poma Palacios (2022).

La variación observada sugiere la presencia de una relación compleja y posiblemente interdependiente entre estas variables en la solubilidad del cobre en la solución. La amplia gama de valores de concentración de cobre remanente disuelto entre las réplicas indica la influencia de factores experimentales variables o aleatorios en la estabilidad de la solución. Esto implica que la interacción entre la concentración de cloruro de benzalconio, pH y temperatura puede tener un impacto significativo en la capacidad de la solución para retener el cobre disuelto.

b) Concentración de cobre disuelto

Al analizar los datos de la tabla 6, se observa una variación significativa en los porcentajes de cobre removido entre las diferentes condiciones experimentales. Por ejemplo, para una concentración de cloruro de benzoilo de 2.5 g/L y un pH de 8, la remoción de cobre varió desde aproximadamente el 27% hasta el 31%, con una media del 29.67% y una desviación estándar de aproximadamente 1.24%. Además, al aumentar la concentración de cloruro de benzoilo a 7.5 g/L y mantener el pH en 8, se observó una mayor remoción de cobre, con un promedio del 91.92% y una desviación estándar de aproximadamente 0.39%. Estos resultados sugieren una relación significativa entre la concentración de cloruro de benzoilo y la eficacia en la remoción de cobre, con mayores concentraciones tendiendo a producir una mayor remoción de cobre disuelto en las soluciones.

Tabla 9

Concentración de cobre disuelto

Conc. Cl Benz. (g/L)	pH	Temperatura (°C)	% de cobre removido			
			Replica I	Replica II	Replica III	Media
2,5	8	17	30,7428523	31,2501278	27,0207872	29,6712558
2,5	8	22	36,7084248	37,1654893	34,6260444	36,1666528

2,5	10	17	26,7295317	26,8050902	26,5777688	26,7041302
2,5	10	22	33,6089103	33,5504655	32,5701419	33,2431726
7,5	8	17	90,4339342	90,9324914	91,0774733	90,814633
7,5	8	22	92,4893524	93,008898	93,2996692	92,9326399
7,5	10	17	78,5107004	78,1561565	78,0634842	78,2434470
7,5	10	22	79,0686711	78,4005916	78,5862589	78,6851739

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 65) por Poma Palacios (2022).

Estos resultados destacan una influencia significativa de la concentración de cloruro de benzoilo en la remoción de cobre disuelto en las soluciones. Se observa que a concentraciones más altas de cloruro de benzoilo, se logra una mayor remoción de cobre, indicando una relación positiva entre estas dos variables. Esto sugiere que la concentración del agente quelante juega un papel crucial en la eficacia del tratamiento para eliminar el cobre de las soluciones. Además, la estrecha dispersión de los resultados en las condiciones experimentales indica una consistencia en la efectividad del tratamiento bajo diferentes réplicas, respaldando la fiabilidad de los datos y la consistencia del método experimental.

En síntesis, se destaca la variación significativa en la concentración de cobre disuelto en respuesta a condiciones como la concentración de cloruro de benzalconio, el pH y la temperatura, lo que sugiere una interacción compleja entre estos factores. Además, se observa una relación importante entre la concentración de cloruro de benzalconio y la eficacia en la remoción de cobre disuelto en las soluciones, evidenciando que concentraciones más altas del agente quelante resultan en una mayor remoción de cobre.

3.5.2 Influencia de factores

a) Análisis de varianza

Se realizó un análisis de varianza para un diseño factorial 2³, en el cual se manipularon la concentración de amonio cuaternario (cloruro de benzalconio), el pH de la solución cianurada sintética y la temperatura de dicha solución.

Tabla 10

Análisis en remoción de cobre

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	18016.0	2573.7	2581	0
Lineal	3	17808.5	5936.2	5952.99	0
Conc Cl.Bz	1	17316.1	17316.1	17365.16	0
pH	1	401.1	401.1	402.28	0
Temperatura	1	91.3	91.3	91.52	0
Interacciones de 2 términos	3	206.4	68.8	68.98	0
Conc Cl.Bz*pH	1	164.2	164.2	164.69	0
Conc Cl.Bz*Temperatura	1	41.1	41.1	41.25	0
pH*Temperatura	1	1	1	1.01	0.33
Interacciones de 3 términos	1	1.1	1.1	1.1	0.309
Conc Cl.Bz*pHTemperatura	1	1.1	1.1	1.1	0.309
Error	16	16	1		
Total	23	18031.9			

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 66) por Poma Palacios (2022).

La tabla 7 revela que las variables relacionadas con la remoción de cobre, como la concentración de Cloruro de Bencilo (Conc Cl.Bz), el pH y la temperatura, muestran una significancia estadística notable, con todos los valores p registrados como 0. Esto indica que estas variables tienen un impacto sustancial en el proceso de remoción de cobre. Además, las interacciones entre estas variables también son importantes, como se evidencia por los valores p significativos en las interacciones entre Conc Cl.Bz y pH, así como Conc Cl.Bz y temperatura. Esto sugiere que la eficacia de la remoción de cobre puede ser influenciada por la interacción entre la concentración de Cloruro de Bencilo y las condiciones del medio, como el pH y la temperatura, lo que subraya la complejidad de este proceso y la necesidad de considerar múltiples factores en el diseño de estrategias efectivas de remoción de cobre.

Tabla 11

Análisis en el modelo ajustado

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	5	18013.9	3602.8	3589.97	0
Lineal	3	17808.5	5936.2	5915.07	0
Conc Cl.Bz	1	17316.1	17316.1	17254.55	0
PH	1	401.1	401.1	399.72	0
Temperatura	1	91.3	91.3	90.94	0
Interacciones de 2 términos	2	205.4	102.7	102.31	0
Conc Cl.Bz*pH	1	164.2	164.2	163.64	0
Conc Cl.Bz*Temperatura	1	41.1	41.1	40.99	0
Error	18	18.1	1		
Falta de ajuste	2	2.1	1.1	1.06	0.37
Error puro	16	16.0	1		
Total	23	18031.9			

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 67) por Poma Palacios (2022).

De acuerdo a la tabla 7, el análisis del modelo ajustado revela una cantidad significativa de la variabilidad en los datos, como se evidencia por la suma de cuadrados ajustada (SC Ajust.) de 18013.9 y una media de cuadrados ajustada (MC Ajust.) de 3602.8. El valor F asociado al modelo es de 3589.97, con un valor p de 0, lo que indica una significancia estadística muy alta. Este resultado sugiere que el modelo ajustado es capaz de explicar de manera efectiva la variabilidad en la variable de respuesta. Además, se observa que las variables incluidas en el modelo, como la Concentración de Cl.Bz, el pH y la Temperatura, así como las interacciones entre ellas, contribuyen de manera significativa a la explicación de la variabilidad en los datos, como se refleja en los valores de SC Ajust. y MC Ajust. específicos para cada variable o interacción.

Por otro lado, se encontró que la concentración de cloruro de benzalconio tiene un valor de p igual a 0.000 en el análisis de varianza, lo que demuestra un efecto significativo en la remoción de cobre. Además, se observa que un cambio de pH de 8 a 10 también tiene un valor de p de 0.000, indicando una influencia considerable en la remoción de cobre, con un pH de 8 mostrando la mayor eficacia. Asimismo, se identifica que la variación de la temperatura, con un valor

de p igual a 0.000, afecta la remoción de cobre, aunque con un efecto no muy pronunciado. Estos hallazgos sugieren que la optimización de la concentración de cloruro de benzalconio y el control del pH en la solución cianurada pueden mejorar significativamente la eficiencia de remoción de cobre, mientras que los cambios en la temperatura podrían tener un impacto menos significativo, pero aún relevante. Sin embargo, se advierte que aumentar la temperatura podría resultar en costos económicos adicionales, lo que limitaría su aplicabilidad en condiciones de explotación real de metales preciosos.

En síntesis, se observa que la dosificación de amonio cuaternario tiene un efecto notable en la eficacia de la remoción de cobre. Además, se destaca que un cambio en el pH de las soluciones cianuradas, controlado dentro de un rango específico, también muestra una influencia considerable en la remoción de cobre, siendo el pH óptimo un factor crucial para maximizar la eficiencia del proceso. Por último, el tiempo de mezcla del amonio cuaternario en las soluciones sintéticas de cianuro es un factor que debe ser considerado, sugiriendo que puede tener un impacto en la eficacia general del proceso.

b) Modelo de regresión

Tabla 12

Valores para la validación del modelo de regresión

S	R-cuadrado	R-Cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)
0.998587	99.91%	99.87%	99.80%

Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 68) por Poma Palacios (2022).

La tabla 9 presenta resultados estadísticos clave para la validación de un modelo de regresión. Con un valor de S (la raíz del error cuadrático medio) de 0.998587, el modelo muestra un ajuste preciso a los datos, lo que indica que las predicciones del modelo están muy cerca de los valores reales. Además, los valores de R -cuadrado (99.91%) y R -cuadrado ajustado (99.87%) son excepcionalmente altos, lo que sugiere que el modelo explica una gran parte de la variabilidad en la variable dependiente. Estos resultados indican una alta capacidad predictiva del

modelo, respaldada por el R-cuadrado pred (99.80%), que muestra su eficacia en la predicción de nuevos datos.

$$\% \text{ cobre removido} = -41.34 + 24.246 \text{ Conc CI.Bz} + 1.146 \text{ pH} + \text{Temperatura} - 1.0463 \text{ Conc. CI. Bz} \\ * \text{pH} - 0.2095 \text{ Con CI. Bz} * \text{Temperatura}$$

La ecuación proporcionada relaciona el porcentaje de cobre removido con varios factores, incluyendo la concentración de un compuesto Conc CI.Bz, el pH del sistema y la temperatura. Por ejemplo, un aumento en la concentración del compuesto CI.Bz, representado como Conc CI.Bz, incrementará el porcentaje de cobre removido en 24.246 unidades, mientras que un aumento en el pH contribuirá positivamente con 1.146 unidades al porcentaje de cobre removido. De manera similar, un incremento en la temperatura del sistema también aumentará el porcentaje de cobre removido. Sin embargo, las interacciones entre la concentración del compuesto y el pH, así como entre la concentración del compuesto y la temperatura, tendrán un efecto negativo en el porcentaje de cobre removido, según los coeficientes dados (-1.0463 y -0.2095 respectivamente).

Por lo tanto, se indica que solo se incluyeron las interacciones del amonio cuaternario con el pH y luego con la temperatura, ya que son significativas solo en presencia de la variable principal más influyente. Además, se menciona que las variables de interacción entre temperatura y pH, así como entre las tres variables, fueron eliminadas debido a que las variables principales tienen efectos individuales en la respuesta sin que la interacción entre ellas sea significativa.

a) Análisis de intensidad de los efectos

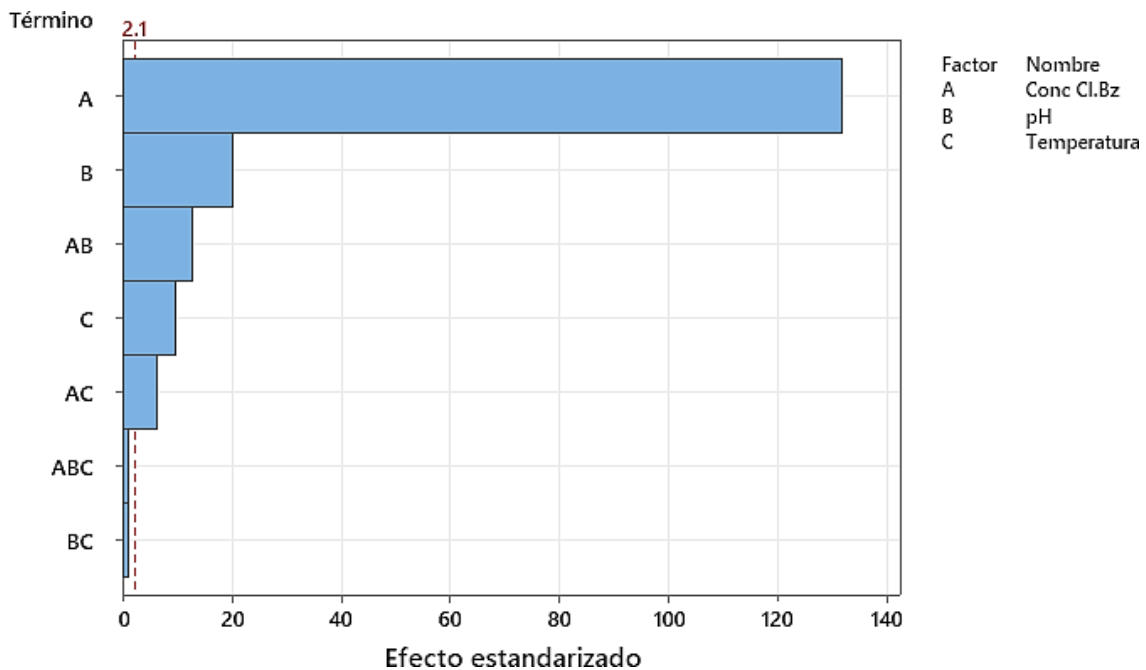
Para evaluar la fuerza de los efectos de los factores y sus interacciones, se asignan las variables de la siguiente manera: A representa la cantidad de cloruro de benzalconio, B corresponde al nivel de pH, y C indica la temperatura. Además, se consideró un Alfa = 0.05, teniendo como respuesta el % de Cu removido.

En la figura 4, se destaca que la concentración de cloruro de bencilo ejerce un efecto positivo y significativo en la respuesta, sugiriendo que a medida que esta concentración aumenta, también lo hace la respuesta. Contrariamente, el pH muestra un efecto negativo y significativo, indicando que un aumento en el pH

se asocia con una disminución en la respuesta. Por otro lado, aunque la temperatura exhibe un efecto positivo, este no alcanza significancia estadística, lo que sugiere que su influencia es relativamente menor en comparación con los otros factores. Además, no se detectaron interacciones significativas entre los factores, lo que sugiere una relación directa entre cada factor y la respuesta sin dependencia entre ellos.

Figura 4

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.



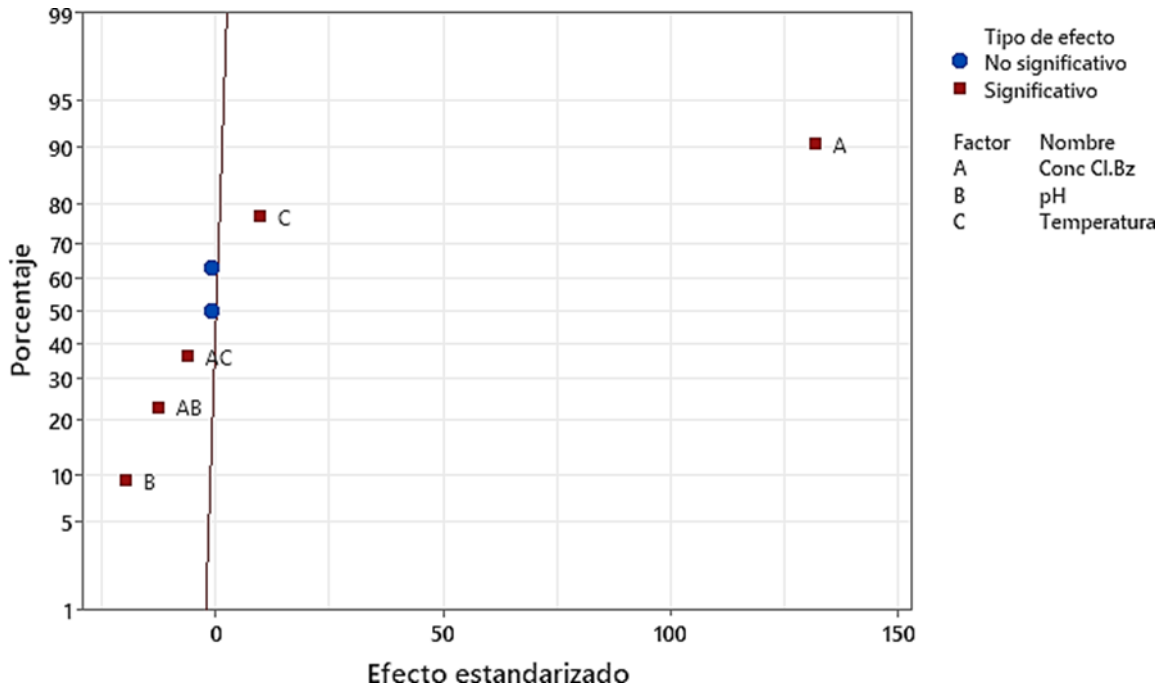
Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 70) por Poma Palacios (2022).

Esto se corrobora en la figura 5, donde se destaca la magnitud de estos efectos y su dirección (positiva o negativa), identificando claramente las variables que ejercen la mayor influencia en el proceso. Esto permite identificar qué condiciones son más favorables y cómo se relacionan entre sí las variables relevantes. Por ejemplo, se muestra que aumentar la concentración de cloruro de benzalconio y la temperatura puede aumentar significativamente la remoción de cobre, mientras que niveles bajos de pH pueden tener un impacto negativo. Además, se resalta el papel de las interacciones entre variables, como la relación

entre la concentración de amonio cuaternario y la temperatura, que evidencia cambios en la significancia de estas variables cuando interactúan.

Figura 5

Gráfica normal de efectos estandarizados



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 70) por Poma Palacios (2022).

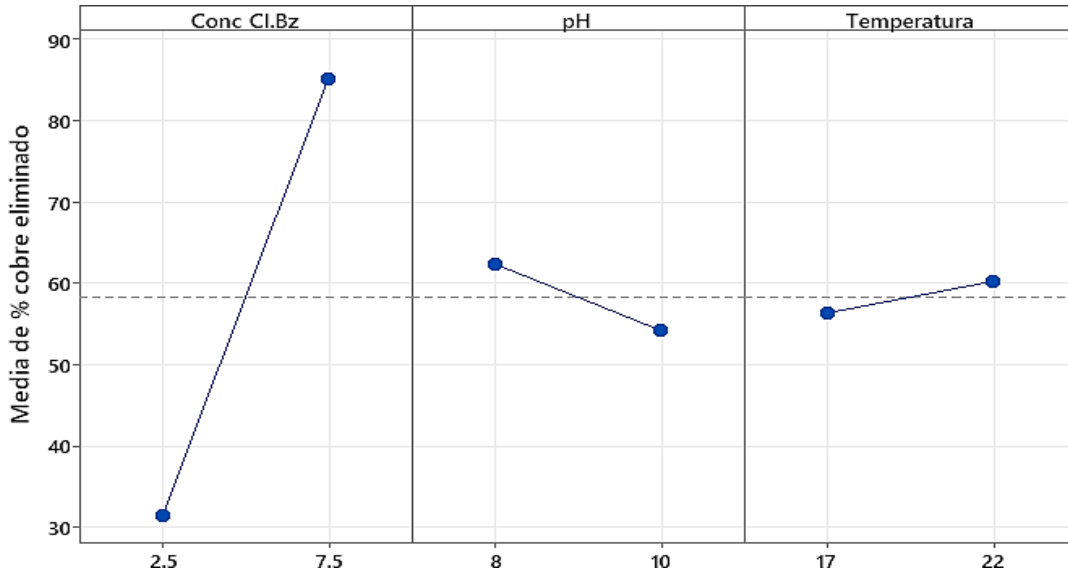
Ante ello, los efectos principales observados en la figura 6 condicionan que niveles más altos de amonio cuaternario y temperaturas más elevadas mejoran la remoción de cobre sugiere que ajustes en estas variables podrían aumentar la eficiencia del proceso, potencialmente reduciendo costos y tiempo. Sin embargo, la disminución en la remoción de cobre asociada con mayores niveles de pH señala la importancia de considerar cuidadosamente todos los factores para evitar comprometer la efectividad del proceso.

Sin embargo, es relevante la importancia del pH y la concentración de amonio cuaternario en el proceso, indicando que ciertas condiciones específicas, como un pH de 8 y una concentración de 7,5 g/L de amonio cuaternario, maximizan la remoción de cobre. Además, la falta de impacto significativo de la temperatura

sugiere que los ajustes en ese parámetro pueden no ser necesarios para mejorar la eficacia del proceso (Figura 7).

Figura 6

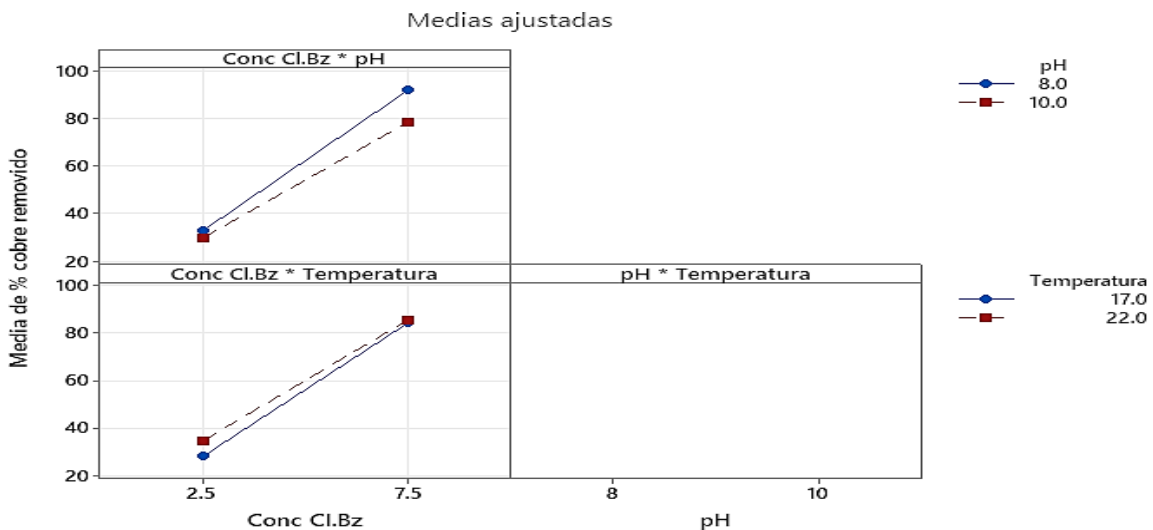
Principales efectos



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 72) por Poma Palacios (2022).

Figura 7

Efectos de interacciones

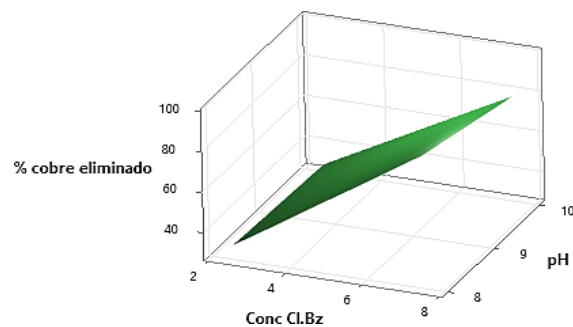


Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 73) por Poma Palacios (2022).

En ese sentido, las figuras 8 y 9 destacan que la concentración del amonio cuaternario y el pH, junto con la temperatura, influyen significativamente en la eficacia de la remoción del cobre. En la figura 8, se muestra que al aumentar la concentración del cloruro de benzalconio (un tipo de amonio cuaternario) y disminuir el pH, se logra la mayor remoción de cobre, lo que sugiere la importancia de estos parámetros en el proceso. Mientras tanto, en la figura 9, se revela que el incremento tanto en la concentración de cloruro de benzalconio como en la temperatura conlleva a una mayor remoción de cobre, subrayando aún más su influencia en el proceso.

Figura 8

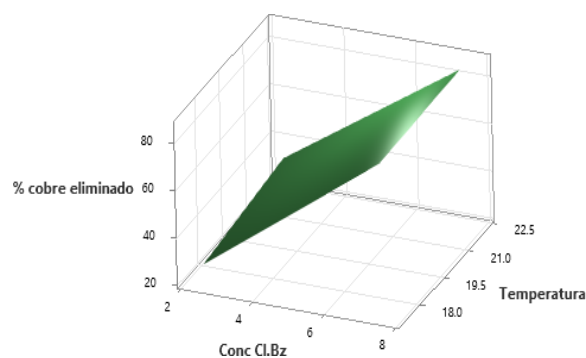
Superficie tridimensional de factores conc. de Cl.Bz y pH



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 74) por Poma Palacios (2022).

Figura 9

Superficie tridimensional de factores Cl.Bz y temperatura



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 74) por Poma Palacios (2022).

Por lo tanto, en el efecto de las interacciones en la figura tridimensional (figura 8) se observa una correlación positiva entre el pH y la temperatura, respaldada por los datos de puntos específicos como (26.7067, 78.2433, 22) y (33.2433, 78.6867, 10), donde a medida que el pH aumenta, la temperatura también lo hace. Este hallazgo sugiere una posible influencia del nivel de acidez o alcalinidad en las reacciones químicas que ocurren a diferentes temperaturas. Además, se evidencia una correlación positiva entre la temperatura y la concentración de cloro residual, apoyada por datos como (33.2433, 78.6867, 10) y (36.1700, 92.9333, 8), lo que sugiere que, a temperaturas más altas, la concentración de cloro residual tiende a aumentar. Por último, aunque menos marcada, se observa una correlación moderada entre el pH y la concentración de cloro residual, como se muestra en el punto (26.7067, 78.2433, 22), lo que indica una posible influencia combinada de la acidez o alcalinidad y la cantidad de cloro residual presente en la solución.

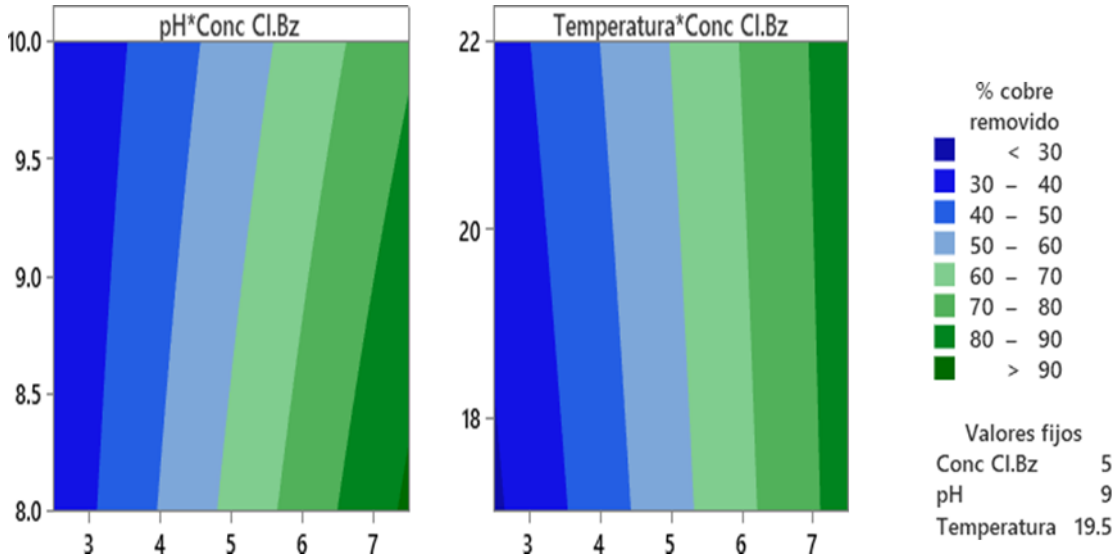
La figura 10 muestra los ejes X, Y y Z representan el pH (8.0 a 10.0), la temperatura (18 a 36 grados Celsius) y el porcentaje de cobre removido (30% a 90%), respectivamente. Se observa que a medida que aumenta tanto el pH como la temperatura, también lo hace el porcentaje de cobre removido, lo que sugiere una correlación positiva entre estas variables. Además, se proporcionan las coordenadas de tres puntos específicos en el gráfico: (8.0, 18.0, 30), (9.0, 27.0, 60) y (10.0, 36.0, 90), que representan diferentes combinaciones de pH, temperatura y porcentaje de cobre removido.

En la figura 11, se precisa que el proceso de optimización de la respuesta es crucial para maximizar la remoción de cobre en una solución cianurada. Los resultados muestran que se logró un valor máximo esperado de remoción del 92.5%, mediante la manipulación de variables clave. Específicamente, se determinaron valores óptimos de 7.5 g/L para la concentración de cloruro de benzalconio, un pH de 8 y una temperatura de 22 °C. Esta optimización no solo permite alcanzar altos niveles de remoción de cobre, sino que también ofrece la

flexibilidad de ajustar estos valores según las necesidades del entorno y los recursos disponibles.

Figura 10

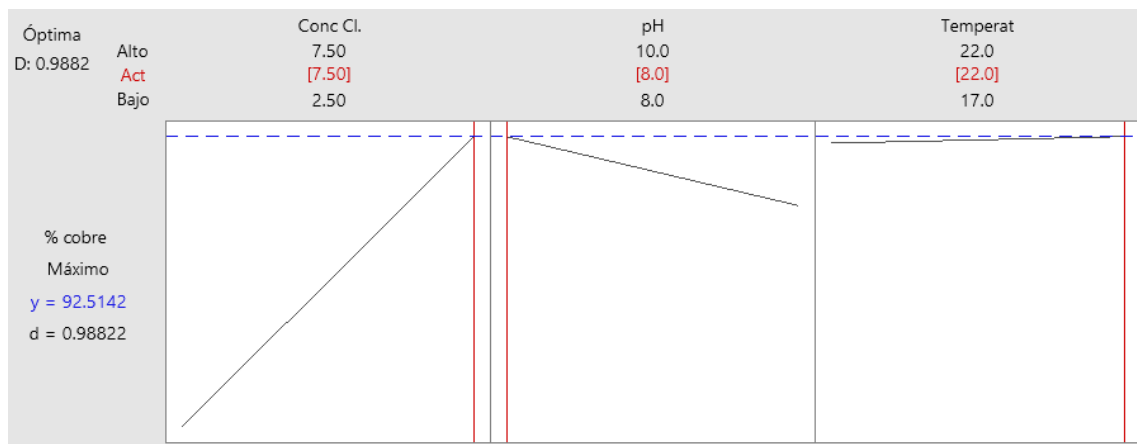
Contorno de porcentaje de cobre removido



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 76) por Poma Palacios (2022).

Figura 11

Optimización de la respuesta



Nota. Tomado de *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* (p. 76) por Poma Palacios (2022).

En síntesis, se sugiere que los valores obtenidos de estos elementos podrían ser reaprovechados en el proceso. Para ello, se analizó el porcentaje máximo de remoción de cobre de la solución cianurada, alcanzando un significativo 92,5%, superando los valores previamente conocidos de hasta el 50%. Esto implica que la solución cianurada regenerada del cobre podría ser recirculada eficientemente en el proceso sin comprometer su efectividad, lo que respalda la posibilidad de reutilizar los valores de cianuro y cobre recuperados en la obtención de metales preciosos.

3.6 Discusión de resultados

Los resultados revelaron que el amonio cuaternario desempeña un papel fundamental en la precipitación del cobre en soluciones sintéticas de cianuro, actuando como agente químico precipitante que forma complejos insolubles con iones metálicos como el cobre, facilitando así su remoción de la solución. La dosificación precisa de amonio cuaternario es esencial para asegurar una precipitación efectiva del cobre, mientras que el control del pH dentro de un rango específico influye significativamente en la eficiencia de la remoción, destacando la importancia de mantener un pH óptimo para maximizar el proceso. Además, el tiempo de mezcla del amonio cuaternario con la solución cianurada juega un papel crucial, ya que un tiempo adecuado de reacción es necesario para garantizar una precipitación completa del cobre. Este proceso de remoción eficiente del cobre por precipitación con amonio cuaternario permite la regeneración de la solución cianurada, con un alto porcentaje de remoción de cobre, respaldando así la posibilidad de recircular la solución regenerada en el proceso sin comprometer su efectividad.

La investigación exhaustiva de Alonso-González et al. (2009, 2010, 2013) aporta una comprensión integral sobre cómo diversas aminas y agentes como Adogen 464 pueden influir significativamente en la extracción y precipitación del cobre, una temática que se alinea estrechamente con los resultados, sobre la eficacia del amonio cuaternario. Esta correlación subraya una visión compartida en la comunidad científica respecto a la necesidad crítica de seleccionar meticulosamente los agentes químicos para optimizar la recuperación del oro. La

interdependencia entre la elección de estos agentes y las variables operativas, incluyendo la dosificación precisa y el control del pH, resalta la complejidad y la necesidad de un enfoque integrado en la química de procesos mineros.

La contribución de Arias-Lafargue et al. (2017) y Guerra Lu (2021) amplía este marco de análisis al incluir factores adicionales como la granulometría y la temperatura, respectivamente, que también afectan la eficiencia de la extracción. Estos estudios concuerdan con nuestros resultados al enfatizar que la optimización de los procesos mineros trasciende el ámbito puramente químico, abarcando una gama más amplia de variables operativas que requieren un monitoreo y ajuste riguroso. Esta perspectiva más holística subraya cómo la eficiencia del proceso de extracción es el resultado de la interacción de múltiples factores, no solo la química involucrada.

En el contexto de la gestión del cianuro y la recuperación del cobre, los estudios de Rupay Güere (2016) e Inderique Samaniego y Rivera Mayta (2021) enfatizan la importancia de una administración eficiente de estos recursos, alineándose con los resultados. La eficiencia en la recuperación de recursos y la minimización de los residuos son esenciales para la sostenibilidad económica y ambiental en la minería, destacando que la gestión prudente del cianuro y la recuperación efectiva del cobre son fundamentales para lograr un equilibrio entre la rentabilidad y la responsabilidad ambiental.

Oraby y Eksteen (2016) y Bas et al. (2015) abordan el consumo de cianuro, una preocupación central en los resultados. La reducción del consumo de cianuro a través de la optimización de la relación CN/cobre y el control del pH es crucial para mitigar los costos operativos y reducir el impacto ambiental, ilustrando la conexión esencial entre la química aplicada y la sustentabilidad en la industria minera.

En la misma línea, Campos y De la Torre (2015) revelan la eficacia del método INCO modificado en el tratamiento de soluciones sintéticas y efluentes cianurados industriales. La capacidad de este método para lograr concentraciones de cianuro total inferiores a los límites permitidos y su eficiencia en la remoción de cianuro y metales subrayan una solución integral para la

mitigación de contaminantes. La importancia de una dosificación gradual de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, para evitar reacciones no deseadas y maximizar la eficiencia del proceso, resalta la necesidad de optimizar el uso de reactivos y el tiempo de tratamiento, lo cual está en concordancia con los resultados que destacan la importancia de la dosificación precisa y el control del pH en la optimización de los procesos mineros.

La perspectiva ambiental, destacada por Salas Canales (2020) y Estrada Montoya (2019), sobre la adopción de tecnologías limpias y el tratamiento efectivo de los efluentes, resalta la integración necesaria de prácticas sostenibles en las operaciones mineras. Estas prácticas no solo reflejan un compromiso con la protección del medio ambiente, sino que también demuestran que la sostenibilidad puede ser parte integral de la eficiencia operativa y económica, ofreciendo un camino hacia la minería responsable.

Por otro lado, Ramos Avilez (2012) introduce una dimensión innovadora al evaluar el uso del biochar, producido a diferentes temperaturas de pirólisis, en la adsorción de cianuro en soluciones de relave aurífero. El alto porcentaje de adsorción y la capacidad máxima de adsorción del biochar no solo ofrecen una estrategia efectiva para mitigar la contaminación por cianuro, sino que también destacan el potencial del biochar como recurso sostenible, aludiendo a su poder calorífico y a su viabilidad económica y ambiental. Este enfoque complementa los resultados al proporcionar una alternativa sostenible para la gestión de residuos y la mejora de la calidad del agua en la industria minera.

Por último, el trabajo de Garay Pablo y Llatas Legoas (2019) brinda evidencia concreta sobre la factibilidad de eliminar de manera efectiva contaminantes críticos como el cianuro y el cobre de los efluentes. Este estudio se alinea con los resultados sobre la utilidad del amonio cuaternario en la precipitación del cobre, destacando la posibilidad de alcanzar altos estándares ambientales sin sacrificar la rentabilidad. Este enfoque enfatiza que los avances en la química y la ingeniería de procesos pueden y deben ser diseñados para cumplir tanto con los objetivos de producción como con los criterios de sostenibilidad.

Ante lo anterior, una propuesta investigativa para profundizar sería llevar a cabo una serie de experimentos enfocados en examinar detalladamente la interacción entre el amonio cuaternario y otros agentes químicos, como Adogen 464, durante el proceso de precipitación del cobre en soluciones de cianuro. Esta investigación podría explorar cómo variables adicionales, como la temperatura, la granulometría y el tiempo de reacción, influyen en la eficacia de este proceso. Al obtener una comprensión más completa de estos factores, se podrían desarrollar estrategias más efectivas para la recuperación del cobre y la gestión sostenible de los efluentes en la industria minera, lo que contribuiría significativamente a mejorar tanto la rentabilidad como la responsabilidad ambiental de las operaciones mineras.

En ese sentido, la importancia de los resultados desde una perspectiva técnica, revela la importancia crítica del amonio cuaternario en la precipitación del cobre y la necesidad de una dosificación precisa y control del pH para optimizar los procesos de extracción. Además, resaltan la interdependencia de múltiples factores operativos, como la granulometría y la temperatura, en la eficiencia de la recuperación de minerales.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y REFLEXIONES

4.1 Conclusiones

La evaluación del proceso de remoción de cobre por precipitación en soluciones sintéticas de cianuro mediante el uso de amonio cuaternario revela su papel fundamental en la formación de complejos insolubles con iones metálicos, como el cobre, facilitando así su eliminación de la solución. Esto implica la necesidad de una dosificación precisa de amonio cuaternario, así como el control meticuloso del pH y el tiempo de mezcla para garantizar una precipitación efectiva del cobre. Esta evaluación resalta la importancia de mantener un pH óptimo y un tiempo de reacción adecuado para lograr una remoción completa del cobre, lo que permite la regeneración de la solución cianurada con un alto porcentaje de remoción de cobre, respaldando así la posibilidad de recircular la solución regenerada en el proceso sin comprometer su eficacia.

La selección meticulosa de agentes químicos en los procesos mejora de la eficiencia en la extracción de metales como el oro y el cobre. Esta selección cuidadosa no solo afecta directamente la productividad de la operación, sino que también puede influir significativamente en la rentabilidad a largo plazo. Además, al considerar aspectos como la dosificación precisa de reactivos y el control del pH, se reconoce que estos factores no solo tienen impacto en la extracción del metal objetivo, sino también en la minimización de residuos y en la mitigación del impacto ambiental.

Por otro lado, la importancia de adoptar prácticas sostenibles destacando su implicancia directa en la sostenibilidad económica y ambiental. La gestión eficiente de recursos y la minimización de residuos no solo contribuyen a la reducción de costos operativos, sino que también ayudan a mejorar la imagen corporativa y a cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas. La exploración de alternativas sostenibles, como el uso de biochar para la adsorción de cianuro, no solo ofrece soluciones para problemas ambientales específicos, sino que también demuestra un compromiso más amplio hacia la responsabilidad social y la preservación del entorno natural para las generaciones futuras.

4.2 Recomendaciones

Para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en los procesos de extracción de metales, se recomienda evaluar exhaustivamente el uso del amonio cuaternario como precipitante de cobre en la regeneración de cianuro en procesos de lixiviación de metales. Esto implica considerar todos los factores relevantes, como la dosificación precisa del amonio cuaternario, el control del pH y el tiempo de reacción, para garantizar una remoción efectiva del cobre y una regeneración óptima del cianuro. Para ello, se debe realizar estudios experimentales detallados que evalúen el desempeño de esta técnica en condiciones representativas, llevando a cabo pruebas a escala piloto que reproduzcan las condiciones reales de los procesos de lixiviación de metales. Además, se deben considerar aspectos económicos y ambientales al evaluar la viabilidad de implementar esta técnica a nivel industrial. Esto permitirá mejorar la eficiencia operativa y la sostenibilidad ambiental en la industria minera.

Para promover prácticas más limpias y sostenibles, se recomienda investigar el número de ciclos de utilización del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales. Esto implica explorar la viabilidad técnica y económica de repetir este proceso varias veces, promoviendo el uso de tecnologías limpias. Para ello, se debe realizar estudios experimentales y análisis económicos que evalúen el rendimiento y la viabilidad de repetir el proceso de utilización del amonio cuaternario como precipitante de cobre en la regeneración de cianuro. Esto puede incluir la determinación de los costos asociados con la dosificación y recuperación del amonio cuaternario, así como la evaluación de la calidad del cianuro regenerado en cada ciclo. De esta manera, se podrán identificar oportunidades para optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental asociado con la extracción de metales.

Para gestionar adecuadamente los residuos generados en los procesos de regeneración de cianuro, se recomienda investigar y desarrollar tratamientos para la disposición final del precipitado formado entre el amonio cuaternario y el cobre. Esto implica identificar opciones de disposición que sean

ambientalmente seguras y que permitan la conservación del medio ambiente a largo plazo. Para ello, se debe realizar estudios de investigación y desarrollo que evalúen diferentes opciones para la disposición final del precipitado generado en los procesos de regeneración de cianuro. Esto puede incluir el desarrollo de tecnologías de tratamiento y disposición, así como la evaluación de su viabilidad técnica, económica y ambiental. Además, se deben considerar las regulaciones y normativas locales relacionadas con la gestión de residuos y la protección del medio ambiente al diseñar e implementar soluciones de disposición final.

4.3 Reflexiones

Al considerar la importancia de la dosificación precisa de reactivos y el control meticuloso del pH en los procesos de extracción de metales, surge la delicada entre la ciencia y la práctica industrial. Más allá de los números y las fórmulas, estas operaciones son un equilibrio delicado entre el conocimiento científico y la experiencia práctica. Cada ajuste en la dosificación de los reactivos o en el control del pH puede tener un impacto significativo en la eficiencia del proceso y en el medio ambiente circundante. Esto nos lleva a reconocer la importancia de la experiencia humana y la habilidad técnica en la optimización de procesos industriales complejos.

La investigación continua y la evaluación de nuevas técnicas nos invitan a reflexionar sobre la necesidad de adaptación y evolución constante en el campo de la extracción de metales. A medida que cambian las demandas económicas y ambientales, es fundamental que la industria esté en constante búsqueda de soluciones innovadoras y sostenibles. Esto nos lleva a reconocer la importancia de la flexibilidad y la apertura al cambio en un campo tan dinámico como la minería, donde la innovación puede marcar la diferencia entre el éxito y el estancamiento.

La gestión adecuada de residuos nos plantea una reflexión profunda sobre nuestra responsabilidad hacia el medio ambiente y las generaciones futuras. La disposición final de los residuos generados en los procesos mineros no solo afecta el entorno inmediato, sino que también tiene implicaciones a largo plazo para la

salud del ecosistema y la comunidad circundante. Esto nos desafía a considerar no solo los beneficios económicos a corto plazo, sino también las consecuencias ambientales a largo plazo de nuestras actividades industriales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso-González, O., Nava-Alonso, F., Jimenez-Velasco, C., & Uribe-Salas, A. (2013). Copper cyanide removal by precipitation with quaternary ammonium salts. *Minerals Engineering*, 42, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.013>
- Alonso-González, O., Nava-Alonso, F., Uribe-Salas, A., & Dreisinger, D. (2010). Use of quaternary ammonium salts to remove copper-cyanide complexes by solvent extraction. *Minerals Engineering*, 23(10), 765-770. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.05.017>
- Alonso-González, O., Zertuche-Salas, M., Nava-Alonso, F., & Uribe-Salas, A. (2009). Aplicación del diseño de experimentos factorial 2k en la evaluación del uso de aminas para la remoción de complejos cobre-cianuro de soluciones de cianuración. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 1(2), 821-6.
- Arias-Lafargue, T., Fernández-Compta, D., Sánchez-Rodríguez, Y., & Lasserra-Portuondo, A. (2017). Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 37(3), 461-476. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445552858008>
- Bas, A. D., Koc, E., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (2015). Treatment of copper-rich gold ore by cyanide leaching, ammonia pretreatment and ammoniacal cyanide leaching. *Transactions of nonferrous metals society of China*, 25(2), 597-607. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(15\)63642-1](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(15)63642-1)
- Bas, A. D., Yazici, E. Y., & Deveci, H. (setiembre de 2012). *Treatment of a copper-rich gold ore by ammonia assisted cyanide leaching* [Conferencia]. Proceedings of the XXVI International Mineral Processing Congress (IMPC), New Delhi, India
- Botz, M. M., Dimitriadis, D., Polglase, T., Phillips, W., & Jenny, R. (2001). Processes for the regeneration of cyanide from thiocyanate. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 18(3), 126-132. <https://doi.org/10.1007/BF03402884>
- Campos, C. L., & De la Torre, E. (2015). Estudio de la detoxificación de efluentes

- cianurados por oxidación con dióxido de azufre, aire y catalizadores de cobre. *Revista Politécnica*, 36(2), 49-49.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773648010>
- Cheng, S. C., Gattrell, M., Guena, T., & MacDougall, B. (2006). Electrochemical studies of gold ore processing wastewater containing cyanide, copper, and sulfur compounds. *Journal of Applied Electrochemistry*, 36(12), 1317-1326.
<https://doi.org/10.1007/s10800-006-9203-2>
- Cosmos, A., Erdenekhuyag, B.-O., Yao, G., Li, H., Zhao, J., Laijun, W., & Lyu, X. (2020). Principles and methods of bio detoxification of cyanide contaminants. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(4), 939-954. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-01013-6>
- Diomedi, A., Chacón, E., Delpiano, L., Hervé, B., Jemenao, M. I., Medel, M., Quintanilla, M., Riedel, G., Tinoco, J., & Cifuentes, M. (2017). Antisépticos y desinfectantes: apuntando al uso racional. Recomendaciones del Comité Consultivo de Infecciones Asociadas a la Atención de Salud, Sociedad Chilena de Infectología. *Revista Chilena de Infectología*, 34(2), 156-174.
<https://doi.org/10.4067/S0716-10182017000200010>
- ECyT-ar. (2012). *Lixiviación con cianuro*. <https://cutt.ly/dw4k2WWW>
- Estrada Montoya, C. C. (2019). *Evaluación de la remoción de cianuro y metales pesados en efluentes líquidos provenientes del beneficio de oro de la pequeña minería, mediante adsorción con carbón activado y peróxido de hidrógeno* [Tesis de Maestría, Universidad de Manizales].
<https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3653>
- Figueroa A. M., Pintor L. L., Sapuay G. P., Ancheta A. A., Atienza V. A., Hintural W. P., Abris M. I. & Ghosh S. K. (2021). Circular Economy Strategies and Implementation in the Philippines en Ghosh, S.K., Ghosh, S.K. (Eds) . *Circular Economy: Recent Trends in Global Perspective*. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0913-8_7
- Fleuriault, C., Gokelma, M., Anderson, A., & Olivetti, E. A. (2021). REWAS 2022: Developing Tomorrow's Technical Cycles. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(2), 406-411. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00378-8>

- Flynn, T., Trexler, D. T., & Hendrix, J. L. (1986). *Geothermal enhancement of mineral processing in Nevada: Final report, April 25, 1985-June 30, 1986*. University Nevada. <https://doi.org/10.2172/7011778>
- Gao Etaiw, S. E. H., & El-bendary, M. M. (2013). The Influence of Copper-Copper Interaction on the Structure and Applications of a Metal-Organic Framework Based on Cyanide and 3-Chloropyridine. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 23(3), 510-518. <https://doi.org/10.1007/s10904-012-9808-3>
- Gao, T., Liu, K., Han, Q., & Xu, B. (2016). Enrichment of copper and recycling of cyanide from copper-cyanide waste by solvent extraction. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 23(11), 1258-1263. <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1347-4>
- Garay Pablo, J. Y., & Llatas Legoas, R. M. (2019). *Remoción de cianuro de sodio y cobre con peróxido de hidrógeno, sulfato de cobre y sulfhidrato de sodio de los efluentes de lixiviación en empresas mineras productoras de oro y plata* [Tesis para Título, Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/21967>
- Grupo Casa Lima. (s.f.). *Cianuro de Sodio*. Recuperado el 08 de novimebre de 2023 de <https://cutt.ly/3w4k95PE>
- Gudim, Y. A., Golubev, A. A., Ovchinnikov, S. G., & Zinurov, I. Y. (2009). Waste-free processing of steel-smelting slag. *Steel in Translation*, 39(7), 612-614. <https://doi.org/10.3103/S0967091209070237>
- Guerra Lu, J. A. (2021). *Influencia del cobre cianurable y sulfuro presente en minerales auríferos sobre el porcentaje de extracción de oro en la cianuración* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/17938>
- Guzman, L., Segarra, M., Chimenos, J. M., Cabot, P. L., & Espiell, F. (1999). Electrochemistry of conventional gold cyanidation. *Electrochimica Acta*, 44(15), 2625-2632. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(98\)00392-2](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(98)00392-2)
- Hernández-Sampieri, R. & Mendoza Torres, C (2018). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. Editorial McGraw

Hill Education.

- Inderique Samaniego, A., & Rivera Mayta, S. (2021). *Recuperación de cobre y cianuro de una solución agotada de lixiviación en la Planta de Procesamiento de Oro Laytaruma* [Tesis para Título, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/7158>
- Lu, J., Dreisinger, D. B., & Cooper, W. C. (2002). Thermodynamics of the aqueous copper-cyanide system. *Hydrometallurgy*, 66(1-3), 23-36. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00081-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00081-6)
- Manktelow, S. A., Paterson, J. G., & Meech, J. A. (1984). Removal of copper and cyanide from solution using activated carbon. *Minerals and the Environment*, 6(1), 5-9. <https://doi.org/10.1007/BF02072660>
- Munhoz Junior A. H., Figueiredo Galhardo G., Santos Ortega F., Batista de Lima N., Angelotti Moraes D., Figueiredo de Miranda L. & Valenzuela-Diaz F. R. (2019). Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019 en B. Li, J. Li, S. Ikhmayies, M. Zhang, Y. E. Kalay, J. S. Carpenter, J.-Y. Hwang, S. N. Monteiro, C. Bai, J. P. Escobedo-Diaz, P. R. Spena, & R. Goswami (Eds.), *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2019*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_44
- Nasibov, A. G., Shakhpazov, E. K. K., Shevelev, L. N., Yugov, P. I., & Baeva, L. A. (1998). Economic aspects of the use of clean technologies, the efficient use of energy resources, and the disposal and recycling of wastes in ferrous metallurgy. *Metallurgist*, 42(6), 204-206. <https://doi.org/10.1007/BF02765993>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2016). Gold dissolution and copper suppression during leaching of copper-gold gravity concentrates in caustic soda-low free cyanide solutions. *Minerals engineering*, 87, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.006>
- Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2016). Gold dissolution and copper suppression during leaching of copper-gold gravity concentrates in caustic soda-low free cyanide solutions. *Minerals Engineering*, 87, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.08.006>

- Polyak, V. E. (1992). Elements of waste-free manufacturing in metallurgy. *Metallurgist*, 36(6), 83–84. <https://doi.org/10.1007/BF00750559>
- Poma Palacios J. C. (2022). *Evaluación del amonio cuaternario como precipitante de cobre para regenerar cianuro en procesos de lixiviación de metales* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/8602>
- Ramos Avilez, H. V. (2012). *Remoción de cianuro en relaves auríferos utilizando biochar producido a partir de tallos de gliricida sepium* [Tesis de Grado, Universidad de Cartagena]. <https://hdl.handle.net/11227/135>
- Reza Berrecil F. (1997). *Ciencia, metodología e investigación* (1ª ed.). Pearson Prentice Hall.
- Rupay Güere, F. (2016). *Remoción del cianuro con el complejo (CuSO₄-H₂O₂) de los efluentes de cianuración de oro para evitar riesgos a la salud y al ambiente* [Tesis para Doctorado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12894/4169>
- Salas Canales, H. J. (2020). Tecnologías limpias como fuente de ventaja competitiva empresarial. *Academo (asunción)*, 7(1), 97-104. <https://doi.org/10.30545/academo.2020.ene-jun.10>
- Salas, H. J. (2020). Tecnologías limpias como fuente de ventaja competitiva empresarial. *ACADEMO Revista de Investigación En Ciencias Sociales y Humanidades*, 7(1), 97–104. <https://doi.org/10.30545/academo.2020.ene-jun.10>
- Shamsuddin, M. (2021). *Physical Chemistry of Metallurgical Processes* (2ª ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-58069-8>
- Shandilya, A.K., Singh, V.K., Bhatt, S.C., Dubey, C.S. (2021). Geological and Geo-Environmental Processes on Earth: Introduction en Shandilya, A.K., Singh, V.K., Bhatt, S.C., Dubey, C.S. (eds) *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth*. Springer Natural Hazards. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_1
- Tyagi, A. K., & Bhattacharyya K. (2022). Synthesis of Porous Materials en A. K.

- Tyagi & R. S. Ningthoujam (Eds.). *Handbook on Synthesis Strategies for Advanced Materials*. Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1803-1_6
- Valuev, A. G., Klesov, Y. L., Borisova, Y. A., Murashko, E. V., & Bosyakova, N. A. (2011). Development of waste-free technology for periclase-carbon refractory production. *Refractories and Industrial Ceramics*, 52(1), 9–11. <https://doi.org/10.1007/s11148-011-9354-5>
- Wang L. K. , Sung Wang M.H.,. Shammass N. K. & Hahn H. H. (2021). Physicochemical Treatment Consisting of Chemical Coagulation, Precipitation, Sedimentation, and Flotation en L. K. Wang, M.-H. S. Wang, & Y.-T. Hung (Eds.). *Integrated Natural Resources Research*. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61002-9_6
- Xie, F., Dreisinger, D., & Doyle, F. (2013). A Review on Recovery of Copper and Cyanide From Waste Cyanide Solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 34(6), 387–411. <https://doi.org/10.1080/08827508.2012.695303>
- Yang, J. (2022). *From Zero Waste to Material Closed Loop*. Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-7683-3>
- Yang, T., Cao, J., Cao, X., Dong, Z., Yang, Z., Chen, Z., & Qiu, S. (2020). Experimental study on cyanide-contaminated soil (China) treatment by leaching and decomposition. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(8), 8176–8187. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07528-2>

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES

**Javier Camilo Poma
Palacios**



Ingeniero Electrónico con Registro CIP N° 80965 con grado de Doctor en Ingeniería Química y Ambiental en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Magíster en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Docente principal en la Universidad Nacional de Huancavelica. Investigador registrado en CONCYTEC en temas de automatización y control, redes de sensores inalámbricos y metrología eléctrica/electrónica. En diciembre del año 2019 realizó pasantía en la Universidad Politécnica de Catalunya - España.

**Pascual Victor Guevara
Yanqui**



Ingeniero Químico con grado de Doctor en Ingeniería Química y Ambiental por la Universidad Nacional del Centro del Perú. Maestro en Ingeniería Química Ambiental por la Universidad Nacional de Trujillo. Docente principal en la Universidad Nacional del Centro del Perú. Investigador registrado en CONCYTEC en temas de procesos químicos, aguas residuales y tratamiento de aguas.

Este libro se terminó de publicar en la editorial

**Instituto Universitario
de Innovación Ciencia y Tecnología Inudi Perú**



ISBN: 978-612-5130-27-3

