



Universidad Nacional

SAN LUIS GONZAGA



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

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL SAN LUIS GONZAGA
EVALUACIÓN DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

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

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS PARA EL USO DE LEJIA EN LA ELIMINACION DEL CIANURO DE EFLUENTES DE LIXIVIACION DE MINERALES DE ORO

Presentado por:

JHOSELIN PUCHURI GALINDO

Autor de la tesis del nivel de **PREGRADO** de la Facultad de **INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA**. El Resultado obtenido es 17% (PORCENTAJE DE SIMILITUD) por lo cual se otorga el calificativo de:

APROBADO, según Reglamento de Evaluación de la Originalidad.

Se adjunta al presente el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Observaciones:

El porcentaje de similitud es menor del 20%, establecido como máximo por Reglamento de Evaluación de originalidad.

Ica, 16 de agosto del 2021


.....

SANTOS HUMBERTO OLIVERA MACHADO
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA”
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y PETROQUÍMICA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



**“DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS
ÓPTIMOS PARA EL USO DE LEJÍA EN LA
ELIMINACIÓN DEL CIANURO DE EFLUENTES DE
LIXIVIACIÓN DE MINERALES DE ORO”**

Tesis para optar Título Profesional de:
Ingeniero Químico

Presentado por:

Bach. PUCHURI GALINDO, Jhoselin

LINEA DE INVESTIGACIÓN:
Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías
sostenibles.

Asesor: Dr. Fernando E. Cano Legua

Ica, 31 de agosto del 2021

DEDICATORIA

A DIOS por permitir alcanzar este momento tan ansiado en mi vida. Por los triunfos y situaciones difíciles que me hicieron crecer profesionalmente cada día más.

A MI FAMILIA con amor, respeto, admiración y con una gratitud inmensa por ser el soporte integral, quienes me apoyaron siempre a buscar el éxito mediante, responsabilidad y honestidad en esta etapa de mi vida, que aun estando lejos los llevo en mi corazón

A NUESTROS MAESTROS por compartir sus conocimientos, y sabiduría en la elaboración de este trabajo.

JHOSELIN

AGRADECIMIENTOS

Indiscutiblemente a **DIOS TODOPODEROSO** por su protección en mi camino y por brindarme fuerzas para superar barreras y dificultades en toda mi vida.

A MIS PADRES EL SR. REGULO Y LA SRA. RAQUEL por su apoyo en todo momento y la confianza que depositan, demostrándome su amor en cada trayecto de mi vida, corrigiendo mis errores, que aun estando lejos los llevo en mi corazón.

A MÍ QUERIDA HERMANA MARICRIS por el apoyo emocional, y la confianza expresada en sus sonrisas, por el incentivo constante, dándome las fuerzas para seguir adelante.

A MIS QUERIDAS COMPAÑERAS DEL GRUPO DE ESTUDIO quienes de una y otra manera me apoyaron.

A MI ASESOR DR. FERNANDO E. CANO LEGUA un especial agradecimiento, por sus consejos y su gran sabiduría y paciencia, apoyo y ánimos que me brindo durante mi estancia donde he podido tener la oportunidad de aprender y acabar una parte de mi tesis.

AI ING. ALIPIO MANUEL MOLINA VALDEZ, y al **ING. ESPINOZA LA ROSA ENRIQUE** como principales colaboradores a lo largo de todo este proceso, quienes con su conocimiento, enseñanzas y sabiduría permitieron el desarrollo de este trabajo de investigación.

Finalmente, a todos que de manera directa o indirecta me apoyaron, siendo en la convivencia o simplemente en el incentivo a distancia.

LA AUTORA

RESUMEN

La presente tesis es un estudio teórico-experimental cuyo objetivo es la eliminación del cianuro residual que sale junto con los efluentes del área de lixiviación y son almacenados en relaveras. Para demostrar nuestra hipótesis se ha llevado a cabo ensayos utilizando diversas concentraciones de hipoclorito de sodio (lejía) en filtros lentos, con flujo regulado a fin de establecer las condiciones óptimas para su total eliminación. Los reportes de laboratorio indicaron que una concentración del 16% permite lograr el objetivo planteado, regulando el flujo a 100 mL/h, a una escala de laboratorio. En el estudio se ha comprobado que las concentraciones elevadas de lejía, dan la seguridad de su aplicación, ya que su pH es básico e impide la generación de HCN gaseoso que es extremadamente venenoso, pudiendo afectar la salud de los operarios y perjudicar el medio ambiente.

La importancia de la tesis radica en la disminución de los riesgos ambientales ya que la lejía después de neutralizar el cianuro y los compuestos cianurados, se disipa en el ambiente como cloro activo que rápidamente desaparece sin dejar residuos peligrosos, por tanto, no hay peligro de una contaminación ambiental de carácter colateral y tampoco habrá consecuencias para la salud humana, siempre y cuando el procedimiento se ejecute en condiciones controladas.

Palabras clave: Proceso de cianuración, hipoclorito de sodio, lixiviación de minerales, efluentes de lixiviación.

ABSTRACT

This thesis is a theoretical-experimental study whose objective is the elimination of the residual cyanide that comes out along with the effluents from the leaching area and is stored in tailings. To demonstrate hypothesis, tests have been carried with various concentrations of bleach (sodium hypochlorite) in slow filters, with regulated flow in order to establish the optimal conditions for its total elimination. Laboratory reports indicate that a concentration of 16% allows achieving the proposed objective, regulating the flow at 100 mL / h, a laboratory scale. In the study, it has been proven that high concentrations of bleach ensure the safety of its application, since its pH is basic and prevents the generation of gaseous HCN, which is extremely poisonous, which can affect the health of operators and harm the environment.

The importance of the thesis lies in the reduction of environmental risks since bleach, after neutralizing cyanide and cyanide compounds, dissipates in the environment as active chlorine that quickly disappears without leaving dangerous residues, therefore, there is no danger of collateral environmental contamination and there will be no consequences for human health, as long as the procedure is carried out under controlled conditions.

Keywords: Cyanidation process, sodium hypochlorite, mineral leaching, leaching effluent.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA	02
AGRADECIMIENTOS	03
RESUMEN	04
ABSTRACT	05
CONTENIDO	06
INTRODUCCIÓN	08
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	09
1.1. Los Antecedentes	09
1.2. Las Bases Teóricas	13
1.2.1. El oro y sus minerales	13
1.2.2. Procesos - operaciones metalúrgicas en recuperación de oro	14
1.2.3. Procesos de gravimetría y amalgamación	15
1.2.4. Operación artesanal de Gravimetría y amalgamación	20
1.2.5. El proceso de cianuración convencional	20
1.2.6. Efectos aceleradores y retardadores	23
1.2.7. El Cianuro	24
1.2.8. Usos, manipuleo, destrucción de cianuro	32
1.2.9. Métodos de cianuración	33
1.2.10. Determinación de la concentración de cianuro	37
1.2.11. Técnicas para eliminar el cianuro de efluentes mineros	38
1.2.12. Lejía (hipoclorito de sodio)	43
1.3. Marco Conceptual	47
CAPÍTULO II EL PROBLEMA, OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	50
2.1. Situación Problemática	50
2.2. Formulación del Problema	51
2.2.1. Problema general	51
2.2.2. Problemas específicos	51
2.3. Objetivos de la Investigación	51
2.3.1. Objetivo General	51

2.3.2. Objetivos específicos	51
2.4. Hipótesis	51
2.4.1. Hipótesis general	51
2.4.2. Hipótesis específicas	52
2.5. Variables e Indicadores	52
2.5.1. Variables	52
2.5.2. Indicadores	52
CAPÍTULO III METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	53
3.1 Tipo y Nivel de Investigación	53
3.2 Población y Muestra	53
3.3 Diseño de Investigación	53
3.4 Técnica e Instrumentos de recojo de Información	54
3.4.1. Técnica de recolección de datos	54
3.4.2. Instrumento de recolección de datos	54
3.5 Técnicas de Análisis de Resultados	54
CAPÍTULO IV MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	55
4.1 Materiales, Instrumentación y Equipos	55
4.2 Métodos y Procedimientos	55
4.2.1. Cianuro libre por volumetría	55
4.2.2. Cianuro libre en electrodo específico de cianuro	56
4.2.3. Cianuro total por destilación	58
CAPÍTULO V RESULTADOS, ANÁLISIS, DISCUSIÓN DE RESULTADOS, CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	60
5.1 Resultados	60
5.2 Análisis, Discusión de Resultados	70
5.3 Contrastación de la Hipótesis	72
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS	77

INTRODUCCIÓN

La enorme importancia financiera y comercial del oro en el mundo ha permitido que la producción de este metal nunca se detenga y que sean explotados yacimientos de mineral aurífero con el uso de leyes inferiores, sujeto a tratamiento por lixiviación con cianuro, especialmente cianuro de sodio, un compuesto químico altamente tóxico, pero de gran eficiencia en la recuperación del oro. El cianuro, es un elemento que ocasiona daños irreversibles no solamente a la salud del ser humano, sino también al medio ambiente, e incluso en concentraciones mínimas puede dañar el sistema respiratorio, al sistema cardiovascular, aparato ocular, dermis y sistema neurológico, absorbiendo por el contacto con la piel, afirmándose también que su inhalación en mínima concentración ($401\text{-}601\text{ mg/m}^3$) puede resultar mortal en las personas, y sus efectos nocivos pueden ser crónicos por meses e incluso años, corriendo el riesgo de sufrir cáncer, hipertiroidismo, daño al sistema reproductivo e incluso daños irreparables al sistema nervioso (Chang, 2010). De igual forma el cianuro es causante de una serie de efectos negativos en nuestro medio ambiente, contaminando el agua, la atmósfera y el suelo, por lo que se debe de eliminar todo residuo de esta sustancia que queda en los efluentes de la cianuración. En esta línea en la presente tesis se propone el uso de la lejía (hipoclorito de sodio) para transformar el cianuro en compuestos menos dañinos para la salud y el medio ambiente.

Teóricamente la presente investigación se justifica en tanto permitirá emplear un reactivo considerado oxidante enérgico, muy barato en la neutralización de los compuestos de cianuro, proceso que requiere de condiciones especiales para que sea eficiente como la presencia de oxígeno y un medio alcalino, como el que ofrece la lejía. El estudio es eminentemente experimental y en él se trató mediante diversos ensayos, de demostrar la hipótesis planteada como un nuevo método para el tratamiento de efluentes mineros.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Los Antecedentes

Hakamura, K. en el año 2017 en el estudio: “*Estudio de investigación experimental para la destrucción del cianuro en humedales con sustrato orgánico para mitigar la contaminación ambiental*”, a la Universidad San Luís Gonzaga, cuyo objetivo fue eliminar mediante métodos ecológicos el cianuro presente en efluente mineros, empleando para ello los humedales; la investigación obtuvo las siguientes conclusiones:

Mediante el tratamiento en humedales artificiales (método biológico), el cianuro presente en el relave de minerales auríferos se ha eliminado totalmente; el contenido inicial de cianuro en los efluentes de la planta de cianuración es de 23 mg/L y en los efluentes del humedal de 10, 20, 30 y 40 mg/L y regulando el flujo de líquido que pasa por el humedal a 15 mL/min, haciendo una permanencia de 7 días en el humedal, la eliminación del cianuro (20 mg/L) es total (Hakamura, 2017).

Gaviria, A y Meza, L. en el año 2015 ejecutaron una investigación de la Universidad de Colombia en Medellín, realizando el análisis de pruebas de degradación sujetas a oxidación empleadas en efluentes líquidos, sólidos y pulpas en diversas plantas de beneficio o tratamiento de minerales de tipo auroargentíferos que se encontraban en Municipio Segovia de Marmato y Antioquía de Caldas; en el estudio se evaluaron diversas alternativas tecnológicas para llevar a cabo la degradación por oxidación de cianuro de efluentes con cianuración líquidas y sólidas, utilizando los siguientes: peróxido de hidrógeno, hipoclorito de sodio y combinación de ambos reactivos, concluyendo en lo siguiente: (Gaviria & Meza, 2015).

Para realizar el tratamiento con hipoclorito de sodio, se necesita 12.5 kg de NaOCl/Kg CN durante 40 minutos, y para realizar dicho proceso

con la utilización de peróxido de hidrógeno, se debe emplear 3.5 kg H_2O_2/kg CN- durante 2.5 horas. Si se emplea la combinación de ambos métodos antes mencionados (hipoclorito de sodio y peróxido de hidrógeno) se adicionará 2.5 kg H_2O_2/kg y 5kg NaOCl/kg durante 20 minutos. En el caso de las muestras obtenidas del Municipio de Marmato, es decir las pulpas minerales resultantes del proceso extractivo, las cuales contienen altas concentraciones de cianuro, se utilizó la degradación de oxidación utilizando ácido de Caro (AC) y peróxido de hidrógeno, evidenciando que la velocidad de degradación permitió una disminución de las concentraciones de cianuro en un 93% con intervalos de 4 horas al utilizar el peróxido, y 5 minutos si se utiliza el ácido de Caro, mostrando relaciones entre H_2O_2/CN y AC/CN de 2.5 y 2.0 respectivamente. (Gaviria & Meza, 2015).

Carranza López, J., & Zambrano Cespín, F. (2014), en el estudio: "Influencia de dosificación de cloro y peróxido de hidrógeno sobre contenido final de cianuro total en tratamiento de aguas, Minera Yanacocha S.R.L". (Tesis de Pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014). Esta investigación identificó la influencia de dosificación con peróxido de hidrógeno y cloro en contenido de cianuro total, realizando en efluente de un proceso de ósmosis inversa de la Planta Yanacocha Norte, empleando un diseño bifactorial (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

Al analizar la variable dosificación con peróxido de hidrógeno, se identificó en niveles de 0.13, 0.15 y 0.17 g/l. En el caso de la variable dosificación con cloro, se analizó según niveles de 0.03, 0.05 y 0.07 g/l, realizándose 9 combinaciones según valores anteriormente descritos de cada una de las variables de estudio, repitiéndose 3 veces en cada combinación, logrando realizar 27 pruebas, las cuales se ejecutaron con 1000 ml de muestra obtenida del efluente. Los resultados obtenidos muestran que el contenido más inferior de cianuro total (0.06 ppm) se obtuvo con el empleo de dosificación con peróxido de hidrógeno de 0.17 g/l, y en el caso de la dosificación con

cloro, se obtuvo una mayor reducción con 0.07 g/l (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

Los resultados finales del análisis de efluente final, expresan que a mayor dosificación con peróxido de hidrógeno (entre 0.13 a 0.17 g/l) la concentración final de cianuro total se disminuye, de igual forma se evidencia que al incrementar la dosificación con cloro (entre 0.03 a 0.07 g/l) los valores finales de cianuro total se minimizan, según un nivel de confianza de 95%, ratificando según el análisis de varianza, que las variables estudiadas influyen de manera significativa en la disminución del cianuro, con lo cual se demuestra su factibilidad económica al utilizar dichos reactivos en procesos de detoxificación de efluentes mineros (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

Gómez Leiva, P. (2012). En la investigación “Degradación de Cianuros empleando Oxidación Química en Efluentes Industriales (Tesis de Máster). Universidad de Oviedo, Oviedo, España (Gómez Leiva, 2012).

La finalidad de la investigación fue comprobar mediante análisis de laboratorio la efectividad de 2 soluciones técnicas propuestas en Departamento de Investigación y desarrollo (I+D) como alternativa para el tratamiento de efluente industrial en instalaciones de la empresa Arcelor Mittal de Asturias, logrando de esta manera una mejora del medioambiente (Gómez Leiva, 2012).

Según resultados hallados en laboratorio, la finalidad fue identificar una primera aproximación del posible éxito de dichas técnicas en el ámbito industrial, concluyendo si dichas soluciones empleadas eran técnicamente factibles y con viabilidad económica, planteándose como alternativa efectiva de tratamiento; soluciones técnicas que han de ser desarrolladas, las cuales fueron planteadas en base a mejores técnicas accesibles en el BREF; siendo el primer método empleado la oxidación con peróxido de hidrógeno, el cual es una BAT empleado en la industria siderúrgica (Iron and Steel Production, año 2011) y el segundo método empleado (oxidación con cloración alcalina) es

empleado para la degradación de cianuro obtenido en BAT en tratamiento de aguas residuales (llamado también Common Water Waste and Waste Gas Management/Treatment System in Chemical Sector (Gómez Leiva, 2012).

Este estudio tiene gran implicación sobre seguridad y sostenibilidad del medio ambiente, ya que con ejecución se puede tratar efectivamente contaminantes que perjudican la salud humana y nuestro medio ambiente; por ello el estudio es factible para lograr una mejora continua que beneficio al medio ambiente con una producción sostenible (Gómez Leiva, 2012).

(Álvarez García, 2005). En el estudio: “Aplicación de sistema pasivo para tratamiento de soluciones residuales en procesos de cianuración para minería de oro (Tesis de Doctorado). Universidad de Oviedo, Oviedo, España (Álvarez García, 2005).

Las operaciones extractivas de oro producen gran diversidad de productos residuales, siendo alguno de ellos muy tóxicos por lo que deben ser tratados de acuerdo a oportunas regulaciones para el cuidado medioambiental; simultáneamente al resurgimiento de las mineras de oro (años 1972 a 1990), asociado con los avances de la tecnología, originaron una gran preocupación medioambiental que demandaba una eficiente gestión y manejo de residuos generados de dicha actividad; existiendo una justificable preocupación de interés público con respecto al uso del cianuro en industrias, considerando que es una sustancia muy tóxica para los seres vivos si ésta se inhala o ingiere en suficientes cantidades (Álvarez García, 2005). Tal es el caso del reciente accidente ocurrido en Rumanía, localidad de Maia Mare, donde se produjo la rotura de balsa estéril, con derrame de 100 mil m³ de aguas con alto contenido de cianuro, y que, a través de la cuenca del Danubio, terminaron en el Mar Negro, responsable de la muerte de miles de especies de flora y fauna silvestre de sistemas fluviales (Álvarez García, 2005).

Los residuos derivados de procesos de cianuración utilizados en mineras de extracción de oro, luego de ser sometidas a proceso de detoxificación (comúnmente con oxidación), suelen presentar importantes niveles de reactivo, convirtiéndola en un proceso atractivo para ser reutilizada, sin embargo cuando la planta de cianuración deje de funcionar, existirá un gran volumen de concentración de cianuro, iones (amonio, nitrato, sulfato, nitrito, etc) y otros metales tóxicos en la balsa de estériles, convirtiéndose en residuos altamente peligrosos y complicados de gestionar, con grandes costos relacionados a su tratamiento activo convencional que son dificultosos de asumir, sobre todo cuando ha cesado el proceso productivo (Álvarez García, 2005).

1.2. Las Bases Teóricas

1.2.1. El oro y sus minerales

El oro, mineral encontrado en forma nativa generalmente, se representa en filones y venas de cuarzo, en dicho cuadro tenemos a los diseminados; el oro es localizado también en depósitos y placeres aluviales de corrientes modernas y antiguas; el oro nativo en zonas de placeres y de oxidación, comúnmente contienen pequeñas cantidades de plata y otros metales (Portal Minero S. A., 2003).

El oro nativo puede encontrarse como oro revestido, cuprífero, limpio, empañado o electrum; y puede ser hallado en otros minerales como un producto secundario, en especies de antimonio, cobre, arsénico, plomo y plata (Portal Minero S. A., 2003).

Figura 1

Oro nativo



El oro, asociado a arsenopirita y pirita es presentada como solución sólida y extremadamente oro fino, presentándose también como micro venillas, ampolla de inclusiones, reemplazamientos, rellenos de intersticio, entre otros; el tamaño del oro en grano es establecido según el proceso metalúrgico aplicado, dividiéndose por tamaño según oro grueso o aluvial como pepitas, oro filoniano en forma de hilo o escama, con un tamaño no inferior de 0.2 mm (Wills & Napier-Munn, 2006).

El nombrado “oro fino” tendrá un tamaño según el rango entre oro ultra fino y oro grueso, es decir con un promedio de 0.2 mm (es decir 200 micrones) y 10 micrones, resultando el “oro ultra fino” el cual está encapsulado en un tamaño inferior a 10 micrones (Wills & Napier-Munn, 2006).

El tratamiento del oro se fundamenta en sus propiedades, según su peso específico, solubilidad en soluciones cianuradas y carácter hidrofóbico, permitiendo tener diversos esquemas de tratamiento metalúrgico para recuperación del oro (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

1.2.2. Procesos y operaciones metalúrgicas para recuperar el oro

Las operaciones tradicionales de clasificación, chancado y molienda, se ejecutan en minerales de oro en relación al grado de liberación que se desea obtener de dicho mineral; con respecto al tamaño del grano del oro “libre” y su grado de asociación con diversos minerales, determinará la elección del proceso metalúrgico a emplear, conociéndose 3 grandes procesos idóneos: Flotación, cianuración y gravimetría. En el caso del oro grueso” debe ser sometido a gravimetría, ya que su proceso se basa en el peso específico y alto del oro, sin embargo, hay equipos que se vienen construyendo con la finalidad de recuperar el oro fino libre (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

El oro catalogado como “fino” y “ultra fino”, si es totalmente expuesto y libre, es conveniente que se ejecute mediante proceso de cianuración tradicional o convencional; si el oro está estrechamente relacionado con sulfuros (en solución sólida) se deberá ejecutar el proceso de flotación convencional, lo que permite recuperar sulfuros que están anexados al oro; la decisión de ejecutar liberación del oro, depende principalmente de la factibilidad económica que demanda su procesamiento, si bien es necesario que el oro esté totalmente libre para ejecutar cualquiera de los procesos seleccionados, su liberación pasará por un análisis de costo-beneficio, y en relación a las decisiones empresariales, se realizarán los procesos de Cianuración y Gravimetría (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Se expondrán, seguidamente los conceptos fundamentales de la cianuración y la gravimetría que permitan evaluar la actual práctica, en búsqueda de una mejor calidad de vida del minero artesanal y amortiguar de manera efectiva la polución ambiental y evitar daños a la salud humana y al entorno biológico.

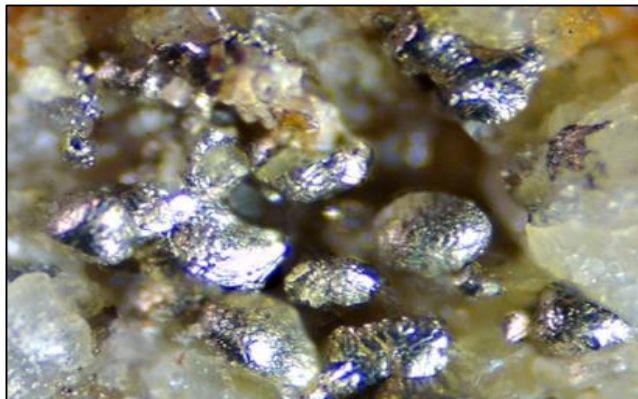
1.2.3. Procesos de gravimetría y amalgamación.

Gravimetría

Constituye un proceso metalúrgico que consiste en la concentración de minerales pesados y/o metales, basándose en la diferencia de densidad entre mena pesada (cerusita, oro, galena, etc) y la ganga, la cual es liviana (estériles) en donde podemos encontrar a la sílice, óxido de fierro, entre otros (Habashi, 1997).

Amalgamación

Consiste en que el metal de oro o plata entre en contacto con el mercurio en forma líquida, formando de esta manera una amalgama (aleación de mercurio-plata-oro) originándose partículas de metal que están revestidas de mercurio, estas partículas son adheridas unas a otras, formando una amalgama mayor (Wills & Napier-Munn, 2006).

Figura 2.*Amalgama de Oro nativo***El mercurio**

Este elemento tiene la principal característica de que es el único metal que es estable en estado líquido a la temperatura del medio ambiente, su símbolo y su nombre proviene del término griego “Hidargyrium”, con símbolo Hg y entre sus propiedades tenemos el punto de fusión 39°C, el peso específico de 13,5, y el punto de ebullición que alcanza los 357°C; los ácidos clorhídricos y ácido sulfúrico no lo atacan, pero por el ácido nítrico si es atacable. Se caracteriza porque forma amalgama conjuntamente con metales comunes, a excepción del platino y hierro; sus características comerciales son: Frasco con 76 libras, 99.99% en pureza de mercurio virgen (Cotton & Wilkinson, 2015).

Figura 3*Características del mercurio*

Efectos negativos del manejo del mercurio

Durante la ejecución de la Gravimetría – amalgamación, se inyecta al ambiente mercurio metálico, específicamente en a) relaves de amalgamación originados en el deslamado, b) en la preparación de amalgama hasta que se obtiene amalgama sólida, c) en pleno proceso de refogado, en el momento de sopletear la chamba o bola (Cotton & Wilkinson, 2015).

Tanto el vapor de mercurio en forma condensada, como el mercurio líquido, terminan en cursos de agua, y debido a la acción de microorganismos acuáticos, son transformados en compuestos muy tóxicos tales como el metilmercurio, el cual se absorbe fácilmente en la piel, vías respiratorias o mucosas gastrointestinales; el mercurio afecta al sistema nervioso central del ser humano, originando alteraciones sensoras (sordera o ceguera) y motoras (tales como la ataxia) en forma irreversible, característicamente el mercurio no produce la muerte en forma inmediata, ya que el envenenamiento se produce en forma gradual, en forma irreversible y crónica (Portal Minero S. A., 2003).

Los síntomas característicos originados por el envenenamiento con mercurio son: disminución de visibilidad, calambres abdominales, sangrado e inflamación de encías, cólicos y calambres abdominales, disminución de apetito, diarrea, debilidad o desgano, temblores en el cuero, ceguera, daño en sistema nervioso, cuadros depresivos e irritabilidad. (Portal Minero S. A., 2003).

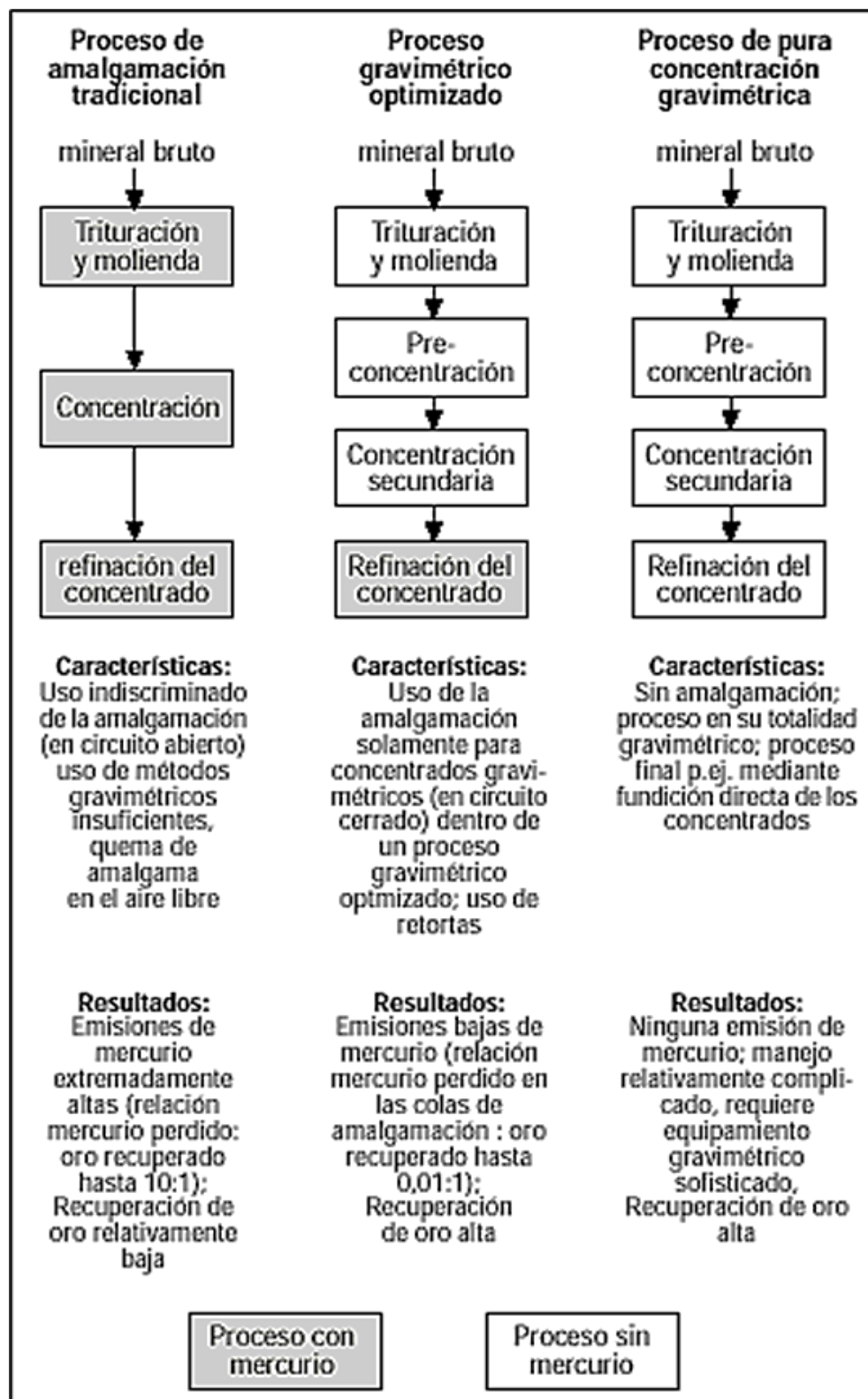
Utilización del Hg: Seguridad para su uso

- No vierta ni use mercurio en los vertederos
- En la etapa de amalgamación, evite que el mercurio tenga roce o contacto directo con la piel, para ello debe usar guantes especiales
- Al momento de usar el mercurio, no fume y evite ingerir alimentos
- Evitar almacenar bebidas o alimentos en envases que han contenido mercurio.

- Almacenar el mercurio cubriéndolo con agua.
- No almacene mercurio donde vive
- Antes de alimentarse lave cuidadosamente sus manos
- Los vapores de mercurio atacan a los más vulnerable como mujeres embarazadas y niños, apártelos de las labores
- Use un buen recuperador para quemar el mercurio
- El refogado de la amalgama debe ejecutarse al aire libre y alejado de viviendas.
- Acudir a un local o centro médico si se siente permanentemente molestias estomacales y dolor de cabeza, es posible que tenga intoxicación por mercurio (Portal Minero S. A., 2003).

Figura 4

Comparación esquematizada de procesos con y sin amalgamación en operaciones típicas



1.2.4. Operación artesanal de Gravimetría y amalgamación

En la minería de tipo artesanal se procesa el mineral en forma directa utilizando el quimbalete, moliendo previamente el mineral con molinos polveadores, para posteriormente ser alimentado en el quimbalete, adicionándole mercurio líquido y agua, pasando un tiempo de mezclado, se inicia a deslamar y desaguar la mezcla, lo que permite que en el fondo quede lo más pesado (amalgama de mercurio con oro), luego se retira dicha amalgama y se realiza la limpieza de impurezas de ganga, para posteriormente exprimirlo (ahorcamiento) con tela fina, obteniendo una amalgama sólida que será sopleteada para la eliminación de mercurio en medio ambiente, dando finalmente como resultado una bola de oro (oro refogado) apto para su comercialización (Portal Minero S. A., 2003).

La operación total para obtener oro refogado, se caracteriza porque en cada una de sus etapas existe altos niveles de contaminación por mercurio, sin embargo, existe mayor porcentaje de pérdida durante los relaves de amalgamación, los cuales son amontonados dentro o cerca de viviendas, produciendo una fuerte contaminación en personas que viven cerca a lugares donde se obtiene oro refogado (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

1.2.5. El proceso de cianuración convencional

Termodinámica en Cianuración

Los diagramas Pourbaix asociados al potencial de óxido-reducción (Eh) en metal con PH Medio (Figura 5), evidencian que compuestos tales como: ion $(Au)^{+3}$, $Au(OH)_3$; $(HAuO_3)^{-2}$ y AuO_2 , necesitan elevados potenciales de Redox (mayor al de descomposición de oxígeno) para poder formarse; por tanto, la lixiviación del oro metálico es muy difícil debido a su gran estabilidad (Gaviria & Meza, 2015).

Figura 5

Diagrama Pourbaix para especies de oro disueltas en sistema Au-H₂O a 25°C para [Au]=10⁻⁴ M (Hiskey & Atlury, 1988).

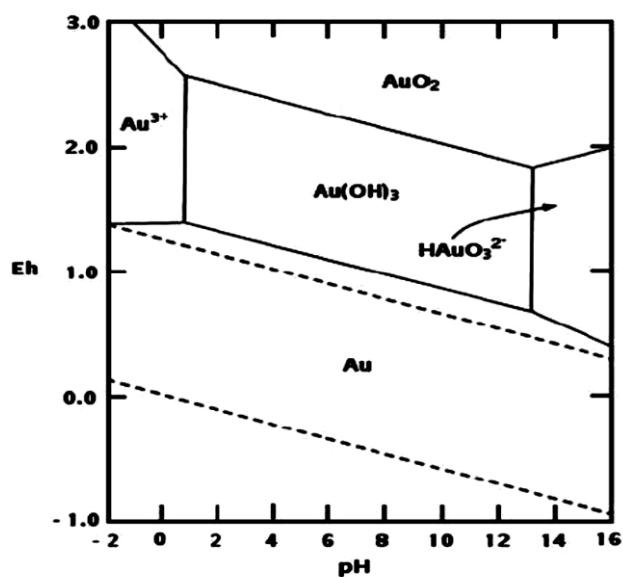
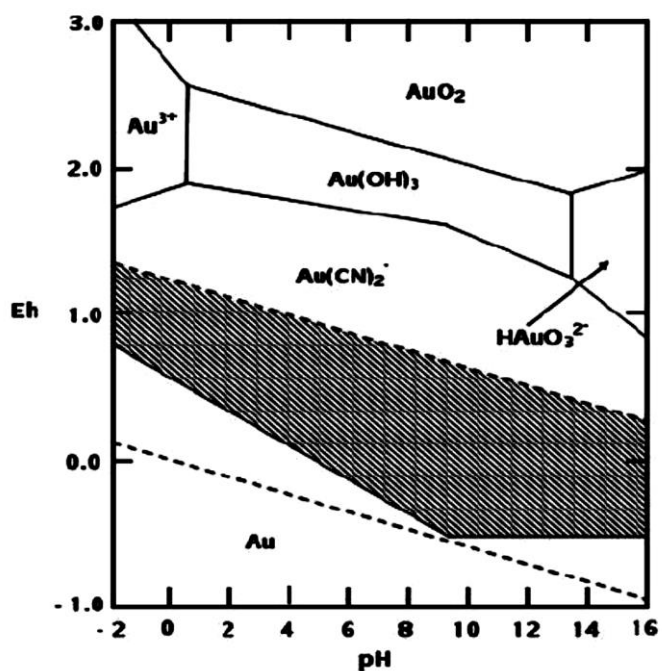


Figura 6

Diagrama Pourbaix para sistema Au-CN₂O a 25°C para [CN]=10⁻³ M y [Au]=10⁻⁴ M (Hiskey & Atlury, 1988).



Se observa, sin embargo, que en el diagrama de Pourbaix, la reacción se lleva a cabo $\text{Au}(\text{CN})_2 + e = \text{Au} + 2\text{CN}$ de acuerdo a la estabilidad del agua.

Con respecto al campo de estabilidad en el complejo aurocianuro, éste se encuentra limitado por una recta que en forma inicial muestra una pendiente marcada (por efecto de hidrólisis de cianuro a pH menor de 9), convirtiéndose posteriormente casi horizontal producto de la acción oxidante del oxígeno en entorno básico, situación que a su vez permite efectividad en la reacción de lixiviación mediante la formación de aurocianuros (Díaz & Condori, 2015). En este mismo gráfico se puede evidenciar que los compuestos: Au^{+3} , $\text{Au}(\text{OH})_3$, y $(\text{HAuO}_3)^{-2}$ son disminuidos debido a la introducción de cianuro.

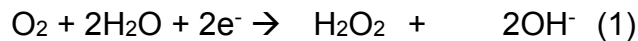
Mecanismo de la reacción electroquímicamente

La disolución del oro está dirigida por principios electroquímicos de corrosión, la reducción de oxígeno en superficie metálica en zona catódica se acompaña por oxidación de oro en zona anódica, en reacción a las reacciones siguientes. (Hiskey & Atlury, 1988).

Considerando a la enunciada ecuación esencial de cianuración



Se tienen las reacciones secundarias



Cinética de disolución del Oro

Según (Gaviria & Meza, 2015) una reacción fisicoquímica se caracteriza porque en ella se encuentran involucradas una fase líquida y otra sólida, cursando con 5 etapas vitales (Gaviria & Meza, 2015):

- Difusión de reactantes desde la solución a interface sólido líquido
- Adsorción de reactantes en superficie del sólido
- Reacción en superficie
- Desorción de productos de reacción de superficie del sólido
- Difusión de dichos productos de interfase sólido-líquido a la solución (Gaviria & Meza, 2015).

1.2.6. Efectos retardadores – aceleradores.

Efecto del oxígeno en disolución de oro

El elevado consumo de oxígeno retrasa la reacción, existiendo elevados consumidores de oxígeno tales como la pirrotina, el cual se descompone de manera fácil, formándose hidróxidos que son oxidados con el oxígeno, en esta situación es necesario emplear agentes oxidantes como peróxido de oxígeno, o en último caso debe airearse la pulpa para poder compensar el alto consumo de oxígeno (Gaviria & Meza, 2015).

Efecto del cianuro libre en disolución de oro

La existencia de cianuro libre, retrasa la disolución en caso que haya un elevado consumo de cianuro producto de: formación de complejos cianurados, producción de sulfuro auroso insoluble en superficie del oro, deposición de peróxidos, aparición de cianuro insoluble, absorción sobre ganga específicamente de aluminosilicatos y cuarzo, presencia de zantatos en mineral flotado formando capa fina de zantato áurico en forma insoluble que impide la disolución del oro; degradación de cianuro con hidrólisis, dependiendo de la proporción de álcali libre, y concentraciones mínimas de cianuro inferiores de 0.001% que no permiten disolver el oro (Hiskey & Atlury, 1988).

Efecto del tamaño de partícula en disolución de oro

Según el tamaño de la partícula, determinará el tiempo de su disolución, es decir que a mayor diámetro, el tiempo para disolverse será mayor, tal es el caso del oro grueso, en donde se asume una reducción de 3.36 micrones en una hora (datos evidenciados por Barsky), y en un grano de oro con 44 micrones de grosor (con malla 325) se tomará por lo menos 13 horas para disolverse, en otro grano con 199 micrones (con malla 100), tomará por lo menos 44 horas para disolverse; si el procedimiento se realiza con plata metálica, el tiempo será mayor; en el caso de que el oro grueso libre esté presente en los minerales, el procedimiento más efectivo es la gravimetría previa (Portal Minero S. A., 2003).

Según (Gómez Leiva, 2012) los efectos de alcalinidad en disolución del oro son los siguientes:

- a) Impide la pérdida de cianuro por hidrólisis.
- b) Impide la pérdida de cianuro en acción de dióxido de carbono de aire.
- c) Disuelve los bicarbonatos en agua antes de ser utilizado en la cianuración.
- d) Equilibra los compuestos ácidos que están contenidos en el mineral.
- e) Equilibra los contenidos en agua, sales férricas y ferrosas.
- f) Contribuye a la sedimentación de partículas finas
- g) Optimiza la extracción al tratar minerales que contienen por ejemplo telururos. (Gómez Leiva, 2012).

1.2.7. El Cianuro

Químicamente hablando el término Cianuro engloba un conjunto de sustancias donde están presentes el carbono y el nitrógeno unidos por un enlace covalente triple ($C\equiv N$), que constituye el ion cianuro con valencia -1 y puede encontrarse en la naturaleza integrando compuestos presentes en especies variadas de plantas superiores, bacterias, hongos, artrópodos, algas e insectos. Siendo las formas principales de cianuro originadas por el hombre (de forma antropogénica) el cianuro de hidrógeno gaseoso (HCN), cianuro de potasio (KCN) y cianuro de sodio (NaCN), visto desde el punto de vista comercial (Nebergal & Schmidt, 2015).

En síntesis, es aplicado a un conjunto de sustancias químicas que poseen carbono y nitrógeno (CN^-), el cianuro es producido por el ser humano para fines industriales en la minería, también es encontrado en el medio natural, formándose en plantas y animales, utilizadas a su vez como mecanismos de protección; existen también frutas, verduras y semillas que contienen cianuro tales como: yuca, durazno, soya, maíz, maníes, etc.; asimismo, el cianuro se produce en escapes de automóviles, o en el cigarrillo, etc. (SACC Ingenieros SRL.

Mollehuaca, Ica, 2004).

En la actualidad, el cianuro es producido en la industria empleando la combinación de amoníaco y gas natural en altas temperaturas con presiones, lo que permite producir cianuro de hidrógeno gaseoso (HCN), para posteriormente combinarlo con hidróxido de sodio (NaOH) dando lugar al cianuro de sodio (NaCN) presentándose en forma de briquetas sólidas y blandas, siendo su producción por año de aproximadamente 1.4 millones de toneladas; en todo el mundo existen 3 productores principales de cianuro de sodio: Tenemos a DUPONT en Norteamérica, GUSSA CORPORATION de Alemania, y ICI de Inglaterra (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Los diversos compuestos del cianuro son clasificados de la siguiente manera:

➤ **Cianuro Libre**

Término empleado para caracterizar al ion de cianuro (CN)⁻ el cual es disuelto en agua por un proceso similar al del cianuro de hidrógeno (HCN) formándose en la solución (Nebergal & Schmidt, 2015).

➤ **Compuestos Simples de Cianuro**

Los compuestos de cianuro simples son definidos como sales de ácido cianhídrico (NaCN, KCN, etc.). Estos se disuelven por completo en solución, dando lugar a aniones cianuros y cationes alcalinotérreos libres (Nebergal & Schmidt, 2015).

➤ **Compuestos Complejos de Cianuro.**

En este grupo tenemos a los ferrocianuros y cianuros de hierro, en el cual el hierro ha sido reducido con valencia +2 y ferrocianuros, encontrándose al hierro oxidado con valencia +3. El ferrocianuro es la forma más común en solución en potenciales redox ambientales, sin embargo, éste se puede oxidar rápidamente a ferricianuro. En el caso de cianuros de hierro, visto desde su impacto ambiental, necesitan especial atención por su alta estabilidad en la falta de luz, con tendencia a disociarse

durante su presencia; sin embargo, dichos complejos son resistentes a degradación natural hasta completarse totalmente la disipación del cianuro libre y de complejos de cianuro metálico, siendo éstos degradables en forma rápida. Los ferricianuros tienen la capacidad de desprender considerables niveles tóxicos de ácido cianhídrico cuando son expuestos a radiación ultravioleta intensa (Nebergal & Schmidt, 2015).

Figura 7

Consecuencias del uso del cianuro sin tratamiento



El cianuro posee una elevada toxicidad, siendo letal si inhala o ingiere en cantidad superior a 200 ppm.

Es preciso anotar que el cianuro, es el compuesto químico más empleado por el sector minero, especialmente en forma de cianuro de sodio, al tener una alta capacidad de disolver el oro, formando complejos estables; dicho compuesto, con gran toxicidad, tiene la calidad de formar complejos estables conjuntamente con otros metales tales como: mercurio, zinc, cobre, hierro y níquel (Smith & Mulder, 2016).

La exposición continua al cianuro origina bioacumulación, generando daños al ser humano, tales como cáncer y muerte, sobre todo a las personas que continuamente están expuestas a esta sustancia (Smith

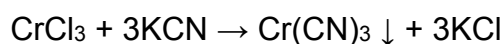
& Mulder, 2016).

Cianuro de hidrógeno (Ácido cianhídrico)

Uno de los compuestos de cianuro más importantes es el ácido cianhídrico (HCN), llamado también ácido prúsico es un líquido muy volátil, incoloro con un olor débil a almendras amargas, con temperatura de fusión de -13°C y su temperatura de ebullición de 26°C ; siendo miscible en agua con cualquier proporción. Sus propiedades ácidas son muy débiles, por lo tanto, los ácidos más fuertes desprenden HCN de las sales cianuradas (Smith & Mulder, 2016).

El ácido cianhídrico se emplea especialmente para la síntesis de sustancias orgánicas, y sus sales (NaCN y KCN), se usan para recuperar metales tales como la plata y oro, etc., tanto el ácido como sus sales son extremadamente venenosos; lo mismo que el ion CN^- , la mayoría de los cianuros son incoloros y las sales que forma con los metales activos son solubles en agua, las sales con metales poco activos son por regla general insolubles en agua, o poco solubles en ella (Smith & Mulder, 2016).

El ion CN^- se presenta muy a menudo como parte integrante de la composición interna de los compuestos complejos; en general los cianuros complejos se obtienen por la reacción entre el cianuro de sodio o de potasio con las sales de los metales correspondientes; para que estas reacciones sean posibles, es preciso que el cianuro de sodio y de potasio, se agreguen en exceso (Mudder, 2017). El mecanismo de estas reacciones perite que primeramente se precipiten los cianuros simples que se disuelven y luego el cianuro de sodio o de potasio excedente dan paso a la formación de cianuros complejos solubles. Las reacciones se desarrollan según el siguiente esquema (Mudder, 2017):



La estabilidad de dichos complejos depende en alto grado de la

naturaleza del átomo central (Mudder, 2017).

La molécula de HCN presenta una estructura lineal de acusado carácter polar; el ácido cianhídrico está constituido por una mezcla de moléculas $\text{H} - \text{C} \equiv \text{N}$ (forma normal) y $\text{H} - \text{N} \equiv \text{C}$ (isomorfa); ambas formas son susceptibles a transformación mutua (por salto de un protón), por esto entre ellas se establece un equilibrio dinámico, cuyo punto de equilibrio depende de la temperatura; en condiciones normales el ácido cianhídrico se encuentra casi exclusivamente en forma de la variedad normal, pero por acción de un calentamiento intenso el equilibrio se desplaza en favor de la isomorfa; los derivados orgánicos que se generan de estas dos variedades de ácido cianhídrico son los nitrilos (RCN) y los isonitrilos (RNC) (Mudder, 2017).

Cianuro de sodio

Características físicas y químicas:

Químicamente el cianuro de sodio, llamado también cianuro sódico cuya fórmula química es NaCN , es la sal que el sodio forma con el ácido cianhídrico (HCN), considerado un compuesto químico altamente tóxico (Sienko & Plane, 1970).

Físicamente el cianuro de sodio se muestra como compuesto incoloro y sólido, hidrolizado con facilidad en presencia de óxido de carbono (IV) y agua, produciéndose el ácido cianhídrico y carbonato de sodio; presenta un leve olor a almendras amargas (Sienko & Plane, 1970).

Según (Sienko & Plane, 1970), sus principales propiedades físicas son:

- Color y aspecto físico: Polvo blanco cristalino y delicuescente
- Olor: Ácido cuando se encuentra húmedo, o inodoro cuando está seco.
- Presión de vapor: No aplica.
- Su densidad relativa (agua=1): 1.6
- Presenta solubilidad en agua: 58 g/100 mL en 20°C.
- Con punto de ebullición: 1496°C
- Presenta punto de fusión: 564°C.

- Su peso molecular: 49.0
- Con estado de agregación: Sólido.
- Apariencia: Incoloro
- Con masa molar: 49.01 g/mol.
- Con punto de fusión: K (563.7°C)
- Y punto de ebullición: K (1496) (Sienko & Plane, 1970)

Figura 8

Cianuro de sodio usado en minería



Reactividad y estabilidad en cianuro de sodio

El cianuro de sodio es inflamable y al arder se descompone, ocasionando vapores de óxidos de nitrógeno tóxicos. Químicamente se comporta como una base resistente. Reacciona con violencia ante ácidos y corroe los metales blancos tales como aluminio y cinc. En presencia de fuertes oxidantes, entre ellos los nitratos y compuestos clorados, reacciona violentamente generando peligro de incendio y explosión. El cianuro de sodio se descompone cuando se expone al aire, la humedad o al CO_2 , lo que genera vapores de cianuro de hidrógeno inflamables y con alta toxicidad.

Almacenamiento y manipulación

Requisitos de manipulación:

- Se debe evitar todo contacto con esta sustancia.
- No exponer el cianuro de sodio a las llamas.
- Nunca en presencia de esta sustancia se debe fumar o producir chispas.
- El cianuro de sodio debe de estar alejado de los oxidantes enérgicos.
- El operario nunca debe estar trabajando solo, donde haya una posible fuga de cianuro de hidrógeno.

Condiciones de almacenamiento:

- Se almacena, como ya se dijo, separado de fuertes oxidantes, CO₂, ácidos, agua o productos que contengan agua, piensos y alimentos.
- El lugar donde se almacena debe estar bien ventilado, seco y bien cerrado.

Seguridad y equipos de protección

Siempre que se manipule cianuro de sodio debe evitarse su contacto directo, siendo necesario emplear diversos equipos de protección personal, tales como (Gómez Leiva, 2012):

- En protección de sistema respiratorio: Utilizar sistema cerrado y ventilación.
- Para proteger las manos: Utilizar guantes protectores.
- En protección ocular: Emplear anteojos con buen ajuste y seguros.
- Es recomendable utilizar pantalla facial que permite a su vez la protección de ojos en combinación con protección respiratoria, si el cianuro se manipula en forma de polvo.
- Protección general del cuerpo: Utilizar traje de protección.
- Las instalaciones de seguridad: Tener disponible lavaojos.
- (Gómez Leiva, 2012)

Según (Gómez Leiva, 2012) las medidas a tomar en consideración en caso de derrame o fuga son:

- Precauciones generales en lo personal: Colocarse traje completo de protección, utilizando a su vez un equipo autónomo para respiración.
- Precauciones del medio ambiente: Siendo una sustancia nociva para el ambiente, debe tomarse gran atención a los peces, por lo que debe evitarse que el químico entre en contacto o se introduzca en el ambiente (Gómez Leiva, 2012)

Advertencias en riesgos a la salud.

Efectos agudos en salud.

Los efectos agudos, es decir aquellos que se presentan a corto plazo en la salud de las personas pueden aparecer prontamente o en tiempo corto luego de haber sido expuesto al cianuro de sodio; produciendo irritación en ojos y piel; cuando se respira cianuro de sodio se presenta irritación en fosas nasales, pulmones y garganta, ocasionando sibilancia, tos, y dificultad respiratoria; cuando la exposición se presenta con alta concentración, puede producirse mareos, cefaleas, taquicardia, pérdida de conocimiento, e incluso la muerte (Smith & Mulder, 2016).

Efectos crónicos en salud

Los efectos sobre la salud que produce el cianuro de sodio a largo plazo o sus efectos crónicos, pueden aparecer tiempo después de haber estado expuesto al cianuro de sodio, pudiendo durar el daño por meses e incluso años, estos riesgos producen en las personas los siguientes síntomas o padecimientos (Smith & Mulder, 2016).

Riesgo para la reproducción

Existen ciertos indicios para afirmar que el cianuro de sodio constituye un teratógeno para los animales, sin embargo, hasta que se ejecuten más pruebas, debe ser considerado y manipularse como un teratógeno humano que daña al feto (Smith & Mulder, 2016).

Otros efectos en largo plazo

De igual forma el cianuro de sodio puede originar un agrandamiento de glándula tiroides y alterar la función normal de la tiroides; su exposición al individuo produce daño irreparable al sistema nervioso, y disminución de glóbulos en sangre, en exposiciones constantes puede producir hemorragia, secreción y lesiones en fosas nasales (Smith & Mulder, 2016).

1.2.8. Usos, manipuleo y destrucción del cianuro

En industria química orgánica, el cianuro es empleado como nitrilo, plásticos acrílicos, nylon y en otros procesos tales como galvanoplastia con la finalidad de endurecer el acero, en productos fotográficos, o en la producción de goma sintética, en la medicina, también se usa para producir pesticidas o insecticidas, y en la minería es utilizado en el proceso de flotación como un reactivo depresor de piritas y ganga durante la separación de molibdeno y cobre-bismuto (caso Antamina), utilizando la mayor cantidad en la cianuración de Oro (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Para lograr un uso eficiente se debe implementar prácticas sólidas en manipuleo de cianuro; en la producción de briquetas de cianuro, se debe mantener una humedad y temperatura bien controlada, colocándolas en contenedores sellados y rotulados, todo embarque de cianuro de sodio debe acompañarse con hojas especiales de seguridad (MSDS) en donde deben consignarse los datos de niveles de toxicidad y otros aspectos químico del mismo, con instrucciones precisas para su manipulación, empleando óptimas medidas de seguridad (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

En procesos constantes de cianuración, en el cual se desechan diversas soluciones cianuradas con porcentajes permitidos de cianuro libre, se ha de emplear tecnologías para destruir los residuos de cianuros, así como también utilizar métodos para recircular y recuperar el cianuro. (Gómez Leiva, 2012). Los métodos más

utilizados son: Adición de hipoclorito de sodio en solución, peróxido de sodio en solución, biodegradación con uso de microorganismos y degradación natural con volatilización en forma de HCN (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

1.2.9. Métodos de cianuración

La aplicación a los minerales de un determinado método de cianuración con la finalidad de recuperar el oro, es una decisión principalmente de tipo económico, sin descuidar la evaluación metalúrgica previa. Según sea el caso se disponen de los métodos que a continuación se describen.

Cianuración modelo DUMP LEACHING

Cianuración modelo HEAP LEACHING

Cianuración modelo VAT LEACHING

Cianuración modelo AGITACIÓN CARBÓN EN PULPA

En cada método anteriormente descrito, se obtiene una solución cargada con oro, su captación o recuperación en solución, es lograda de 2 formas: Mediante carbón activado en columna (CIC) o carbón en pila (CIP); la otra manera para recuperar oro en solución es con el método de Merrill Crowe, que consiste en la precipitación de oro con la utilización de polvos de Zinc (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

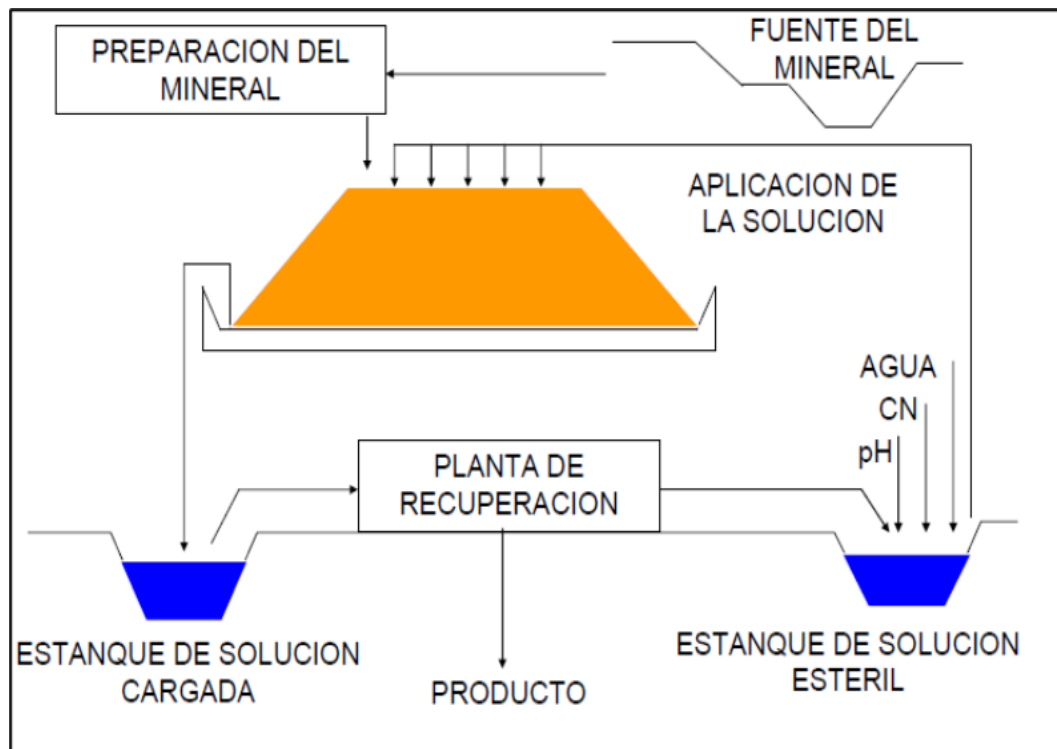
Método de Cianuración: “DUMP LEACHING”

Consiste en amontonar el mineral tal como se obtiene de la Mina, procurando un mínimo manipuleo del mismo, y procesándolo en grandes volúmenes (millones de toneladas), empleando camas con altura de 80 a más metros. El sistema de riesgo consiste en goteo utilizando soluciones cianuradas de baja concentración, la cantidad de oro en minerales es reducido, con alrededor de 1 gr. por cada tonelada de mineral, tal es el caso de las Mineras Pierina y Yanacocha, en donde el procedimiento para recuperar el oro en solución, se realiza utilizando el Merrill Crowe; luego de obtener el

cemento de plata y oro, se procede a su fundición y posterior comercialización (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

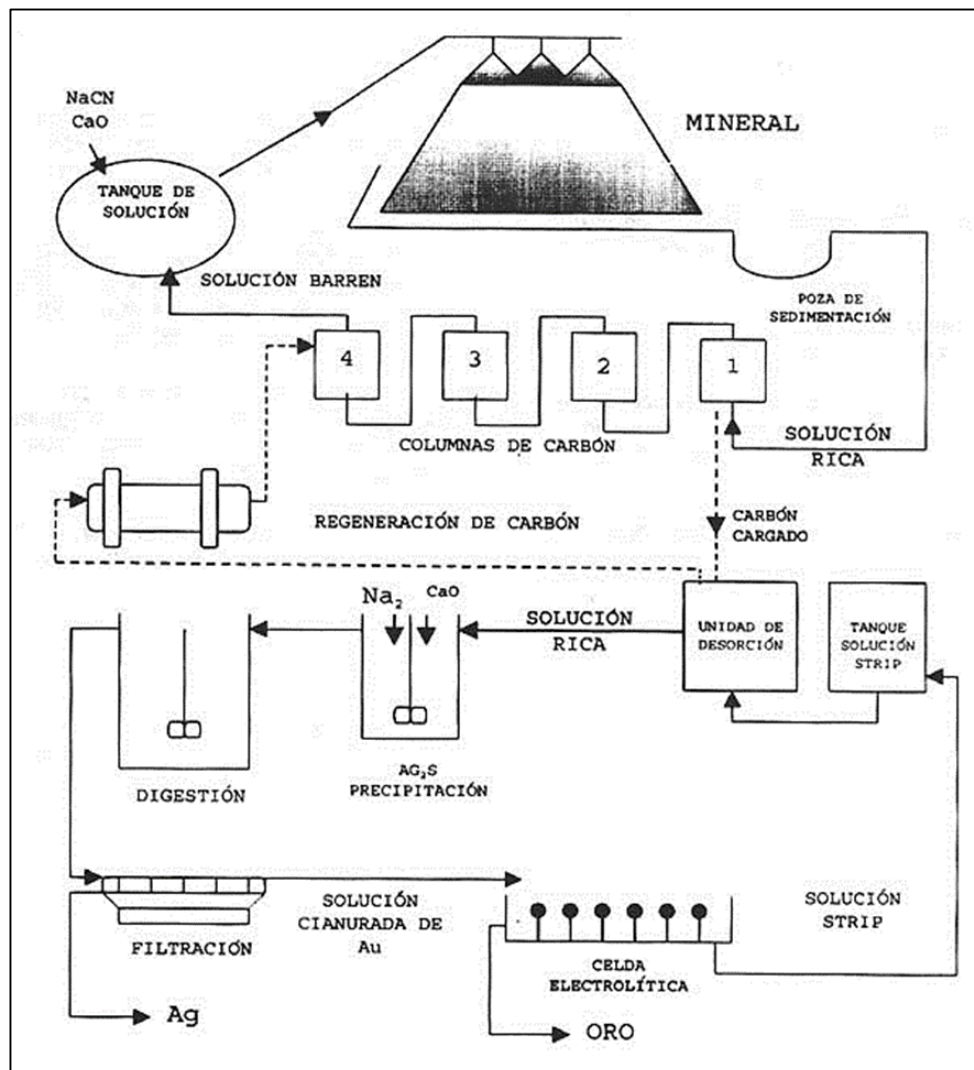
Figura 9

Diagrama de flujo del Dump Leaching



Método de Cianuración: "HEAP LEACHING"

Dicho método es parecido al modelo Dump Leaching, que consiste en el apilamiento o formación de pilas de mineral para posteriormente ser rociadas con soluciones de cianuro con sistema de goteo, tipo ducha o aspersión; se caracteriza porque el volumen de material es inferior que el modelo DUMP, sin embargo, las cantidades de oro son superiores a 1 gr. por cada tonelada, permitiendo en la mayoría de las operaciones de Heap una proceso de chancado con tamaño de $\frac{1}{4}$ de pulgada en 100%, en diversas partes del mundo se sigue utilizando el Heap Leach para el chancado de mineral, debido a su alta porosidad en los mismos (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

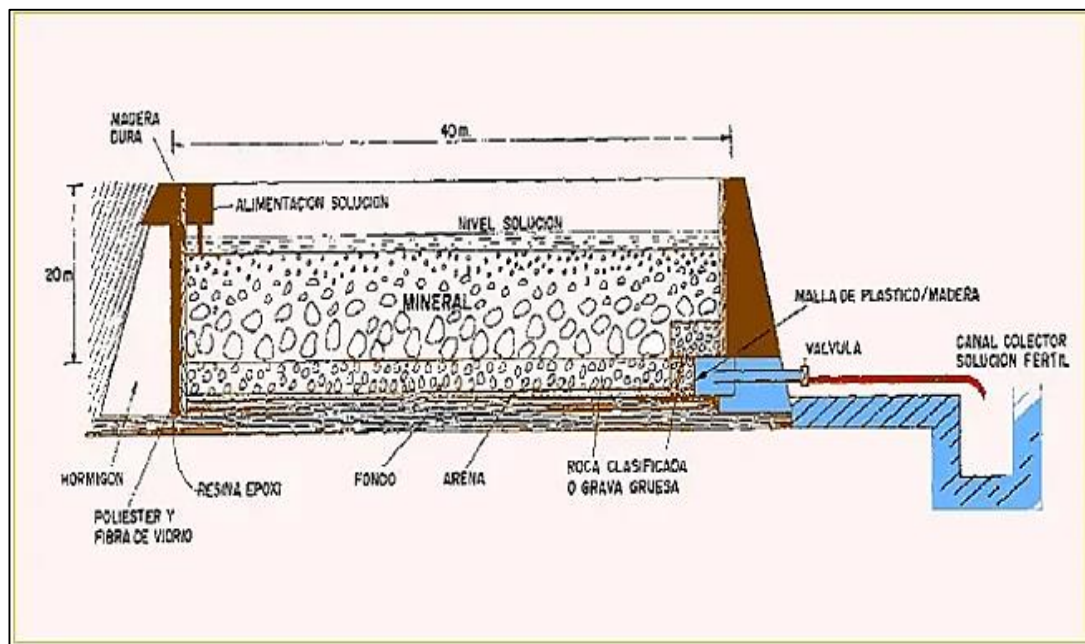
Figura 10*Diagrama de flujo de Heap Leaching***Método de Cianuración: "VAT LEACHING"**

Se le denomina así debido a que el mineral es procesado en un recipiente con forma de batea. El método consiste en acumular el mineral en una batea o envase parecido tales como mantas transportables o pozas de concreto, en donde se agrega soluciones de cianuro con técnica de INUNDACIÓN. Los procesos operativos pueden realizarse en diversos tamaños, las leyes en oro justifican la molienda, anticipadamente al riego con solución cianurada, por lo que se realiza la aglomeración en material molido (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004). Dicho método es utilizado con mayor frecuencia en relaves de amalgamación en zona, gracias a su bajo costo y método casi artesanal en el caso de las mantas transportables;

en el caso de minerales frescos, se ha de evaluar el costo-beneficio en base a operación continua de agitación con carbón en pulpa (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Figura 11

Diagrama de flujo del Heap Leaching



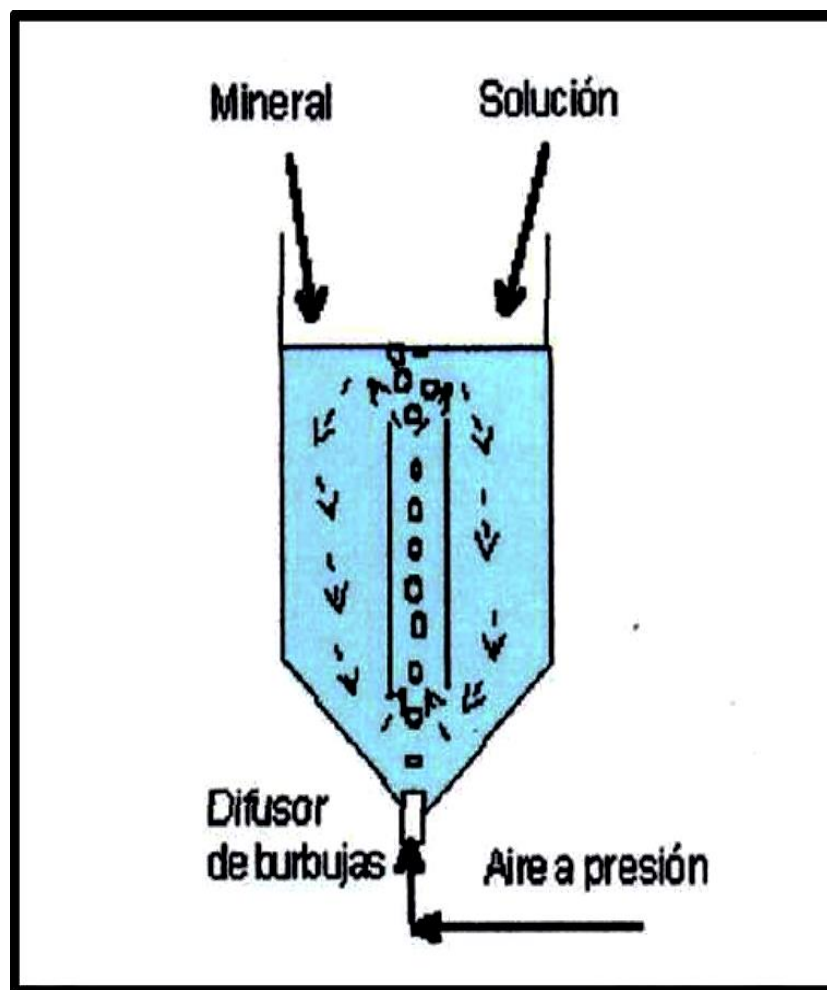
Método: Cianuración por agitación

Método que consiste en la liberación máxima de mineral, con el objetivo de obtener óptimas recuperaciones en oro, de tal manera que, si el oro es expuesto con más frecuencia a soluciones cianuradas, su disolución será mayor; su recuperación con soluciones ricas en cianuro se ejecuta de 2 formas: Mediante carbón activado (CI) o con técnica de precipitación con polvos de zinc (Método Merrill Crowe) (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Finalmente, para obtener un oro altamente puro, se deben emplear técnicas precisas tales como electrodeposición del oro, la desorción del carbón activado y también la Fundición/Refinación del oro.

Figura 12

Cianuración: Agitación Neumática.



1.2.10. Determinación de concentración de cianuro

Se lleva a cabo experimentalmente empleando ciertas normas internacionales; siendo los métodos más usados los que a continuación se resumen:

➤ **Destilación con NaOH:**

Consiste en volatilizar cualquier forma de cianuro para posteriormente ser condensada en NaOH.

➤ **Método Espectrofotométrico:**

En este método se identifica la concentración de cianuro inorgánico contenido en naturales, residuales o potables. Permite detectar los cianuros en forma de radicales complejos o sales simples solubles.

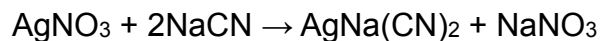
➤ **Método Potenciométrico:**

Consiste en el análisis del destilado alcalino obtenido del tratamiento preliminar, utilizando un electrodo específico de ion para cianuros, combinándolo con otro electrodo de referencia y la utilización de un potenciómetro que posea una amplia escala en milivoltios o empleando un medidor preciso de iones.

➤ **Método Volumétrico:**

Consiste en valorar el CN^- hallado en la muestra, utilizando nitrato de plata (AgNO_3), con presencia de yoduro de potasio (KI) como un indicador, formando el complejo: cianuro soluble ($\text{Ag}(\text{CN})_2^-$)

Luego de ser acomplejado todo el CN^- y se evidencie un pequeño exceso de plata (Ag^+) añadido, dicho exceso es identificado por este indicador (yoduro de potasio: KI), tiende a ser sensible a la plata, ocasionando un viraje en la solución.

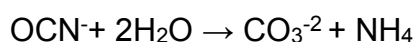
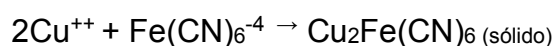
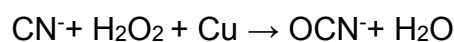


1.2.11. Técnicas para eliminar el cianuro de efluentes mineros.

Técnicamente hablando hoy en día existen diversos métodos para eliminar el cianuro de los efluentes de lixiviación de minerales auríferos, entre ellos podemos citar: el proceso de oxidación empleando peróxido de hidrogeno y como catalizador el sulfato de cobre y el proceso de cloración alcalina, este último con cierta similitud al que proponemos en el presente proyecto. Ambos métodos pasamos a describirlos, en resumen, a continuación (Mudder, 2017):

Proceso de oxidación con peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre como catalizador

Este proceso químicamente puede expresarse mediante las siguientes reacciones:



La explicación a cada una de las reacciones químicas arriba expresadas, es la siguiente:

Cuando el peróxido de hidrógeno en presencia de metales de cobre, se oxida el cianuro libre en cianato, tal como se aprecia en la primera ecuación. Si el cianuro es combinado con cobre, cinc, cadmio o níquel (cianuros metálicos de naturaleza compleja disociables en ácido débil), también se obtiene una oxidación de cianato durante dicho proceso; los metales que han quedado libres durante el proceso de oxidación, son precipitados en forma de hidróxidos, hasta finalmente lograr una concentración que es dependiente del pH empleado en el proceso (según la segunda ecuación); los elementos de cianuro ferroso son combinados con cobre libre en un proceso de disolución, formando un complejo insoluble, tal como se aprecia en la ecuación tercera (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

El pH ideal para eliminar metales luego de destruir el cianuro es de 9.0 a 9.5, si bien es cierto que dicho proceso trabaja en un intervalo amplio de valores de pH, un parámetro inferior a 9.0 es ideal para precipitar cianuros de hierro, sin embargo, considerando que la eliminación de metales cobra gran importancia que el eliminar cianuro de hierro, es ideal emplear un pH más alto en el proceso (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014). Comúnmente no es necesario un ajuste de pH como es de ocurrir en diversos procesos de tratamiento químico; el resultado en concentraciones de cobre residual dependerá de la concentración inicial de cianuro disgregado en ácido débil, como se puntualizó en forma anterior el peróxido de hidrógeno realiza la oxidación al cianuro disociable en ácido débil (CNW) como en cianuro libre (CN-) por medio de la reacción siguiente (Smith & Mulder, 2016):



La termodinámica en la reacción cianuro cianato muestra que, en condiciones naturales, el cianato es el compuesto predominante; a pesar de ello, se ha evidenciado que es difícil llevar a cabo la oxidación del cianuro a cianato en condiciones ambientales normales;

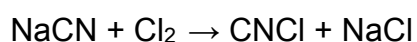
por lo que se necesita emplear un oxidante fuerte, tal como el ozono, cloro o peróxido de hidrógeno, el cual pueda desencadenar dicha reacción (Mudder, 2017). De igual forma, se ha evidenciado que el proceso que destruye el cianuro mediante peróxido de hidrógeno es regido por reacciones químicas que se originan en solución (llamadas reacciones homogéneas de estado acuoso: con 6.5 a 28 Kcal/mol). Dicho de otro modo, para acelerar la oxidación, es fundamental aplicar enzimas bacterianas, superficies catalíticas con bióxido de titanio, iones de cobre, carbón o sulfuro de cinc (Hiskey & Atlury, 1988).

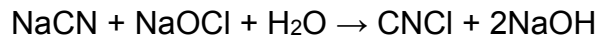
Proceso de cloración alcalina.

Constituye un proceso químico empleado para oxidar y destruir diversas formas de cianuro disociable y libre en ácido débil con medio alcalino (pH entre 10.5 y 11.5); el cloro es suministrado en solución (forma líquida) (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

El proceso de cloración alcalina consiste en la destrucción de cianuro antiguo y conocido, basándose en experiencia operacional y en pericia tecnológica; las aplicaciones iniciales en la industria utilizadas para el proceso de cloración alcalina se llevaron a cabo para tratar aguas residuales de acabado de metales y galvanostegia, los cuales contenían metales y cianuros; el empleo de cloración alcalina en depuración de agua residual de minas, se realizó por la semejanza química evidenciada en aguas residuales de mina y de galvanostegia (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

Aún hoy en día se pueden hallar, en minería, varias aplicaciones, si bien la preferencia preponderante en procesos de purificar aguas residuales provenientes de embalses de estériles y de labores metalúrgicas es derivarlos hacia algún otro proceso oxidativo. El primer procedimiento para destruir el cianuro empleando cloro en estado gaseoso, consiste en oxidar cianuro para obtener un cloruro de cianógeno de tipo intermedio con modificación de una de las siguientes reacciones (Mudder, 2017):

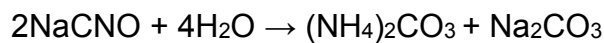




Debido al alto pH en la oxidación, el cloruro de cianógeno intermedio se hidrolizará de manera rápida a cianato, mostrado en la siguiente reacción (Mudder, 2017).



Para llegar a la oxidación completa la primera etapa se lleva a cabo en 15 minutos, con 10,5 de pH. En la posterior etapa se realiza la hidrólisis del cianato hacia carbonato y amoníaco con presencia de cloro, de acuerdo a la Rx:

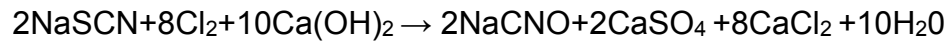


Para el caso de la hidrólisis se requiere aproximadamente de un tiempo de 1 a 1.5 horas, no obstante, en la práctica acostumbra usar tiempos de Rx de muchas horas. Si se añade cloro de forma excesiva, el amoníaco sufrirá una reacción posterior gracias al proceso de cloración, llegando al punto de incrementar rápidamente el cloro residual, generando nitrógeno gaseoso tal como se evidencia en la ecuación siguiente (Gómez Leiva, 2012).



La reacción, usualmente, no se realiza hasta llegar al periodo o fase de punto de inflexión, que es a causa del incremento de la demanda de cloro y al demasiado tiempo de reacción que es necesario para el alto pH requerido en el proceso. La demanda de cloro para que se lleve a cabo la oxidación del cianuro a cianato es de 2,75 de Cl_2 por cada parte de cianuro, aunque, como ya se mencionó, en realidad el consumo de cloro es mucho más. Un compuesto que ayuda a incrementar la demanda global de cloro es: tiocianato (SCN^-), encontrado en variables cantidades en gran parte de las aguas residuales de las minas; el tiocianato es oxidado preferentemente a cianuro, necesitando en teoría 4.9 proporciones de cloro por cada proporción de tiocianato, con modificación en la reacción siguiente:

(Gómez Leiva, 2012)

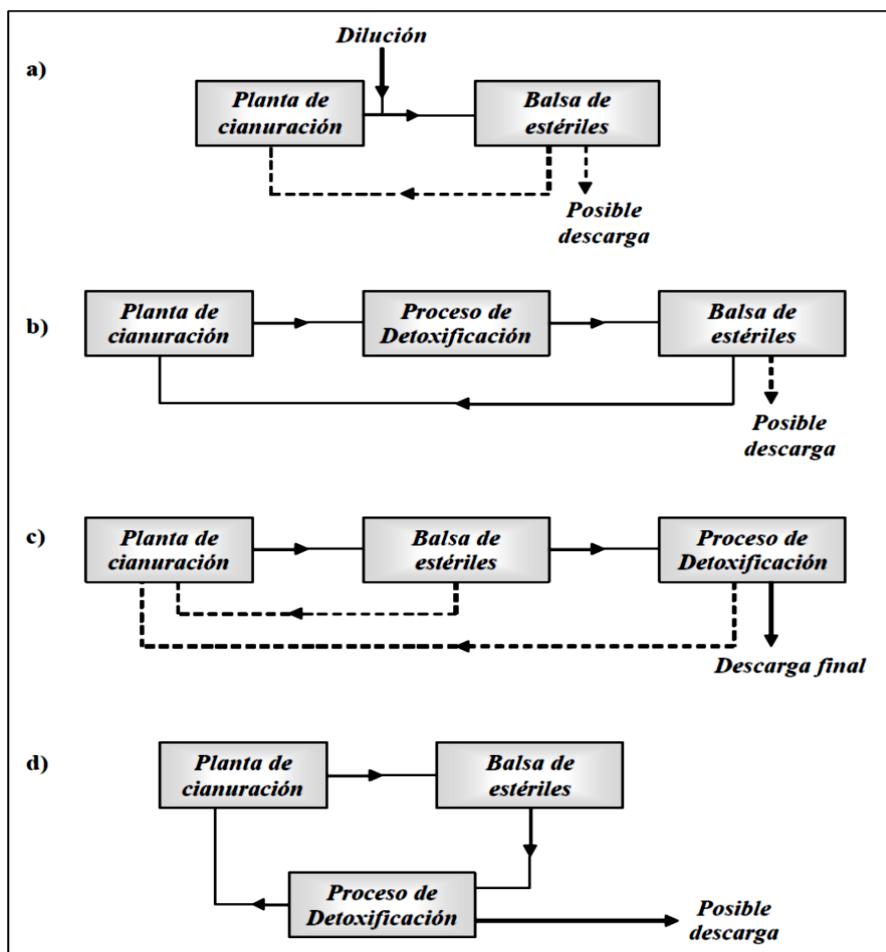


El cianuro se encuentra presente en aguas residuales de minas y de embalses estériles, de diversas formas, tal es el ejemplo del cianuro libre (HCN/CN-) y en complejos cianurados en diversos metales; dichos complejos cianurados se encuentran presentes mediante 2 formas: cianuros complejos de cobalto y hierro totalmente estables, y complejos metálicos de cobre, cadmio, cinc y níquel, disociable en ácido débil (Gómez Leiva, 2012). La cloración alcalina suprime todas las formas de cianuro, a condiciones normales de temperatura y presión, con excepción de los que son sumamente estables como son los complejos de cobalto y hierro.

La concentración de cianuros complejos de hierro puede disminuirse mediante cloración alcalina con empleo de altas temperaturas o aplicando luz ultravioleta, procesos que son poco prácticos, e incrementan de forma apreciable los costos del procedimiento; por ello, las aplicación de cloración alcalina son limitadas para aguas residuales que poseen bajas proporciones de cianuros complejos de hierro; como dicho proceso se realiza con altos valores de pH, se obtiene también precipitación de metales en forma de hidróxidos (Gómez Leiva, 2012).

Figura 13

Principales tratamientos de efluentes cianurados.



1.2.12. Lejía.

Denominado químicamente hipoclorito de sodio, compuesto químico con gran poder oxidante, siendo su fórmula NaClO , posee cloro en forma de oxidación +1, es un oxidante económico y fuerte; debido a esta cualidad se emplea como desinfectante, también es destructor de diversos colorantes, utilizándose como blanqueador (Cotton & Wilkinson, 2015).

Su estabilidad en disolución acuosa sólo se consigue en pH básico, acidulando en conjunto con el cloruro libera cloro elemental, que en características normales se combina para dar lugar al gas dicloro tóxico; por ello su almacenamiento debe estar alejado de cualquier tipo de ácido, de igual forma no debe ser mezclado con amoníaco, ya

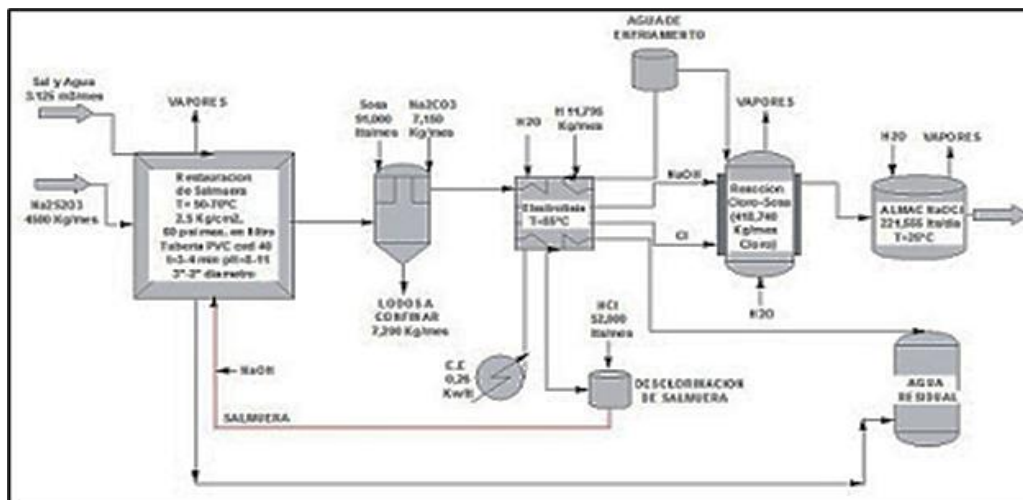
que puede originar cloramina (gas altamente tóxico); su empleo industrial es principalmente como blanqueador (Cotton & Wilkinson, 2015).

Según (Chang, 2010), la utilización de cloro para blanqueamiento fue primeramente realizado por Claude Berthollet en el año 1785, en donde el agua de Javel se conseguía pasando cloro a través de potasa, aunque el físico Carl Scheele (descubridor del cloro) ya había descrito estas propiedades químicas; en años posteriores el físico Charles Tennant en el año 1799 emplearía el cloro, el cual se obtenía como un subproducto en la elaboración de sosa; el resultado fue hipoclorito de calcio en forma de polvo (Chang, 2010).

De igual forma en finales del siglo XVIII, se fueron hallando diversos usos del hipoclorito como un desinfectante; sus personajes pioneros fueron el médico de Francia Pierre Francois (1793) con lo que pudo lograr reducir la mortalidad en 50%, y Antonine Labarraque (farmacéutico, 1825) responsable de la sustitución de potasio por sodio. El hipoclorito de sodio se encuentra sólido como sal pentahidratada $\text{NaClO} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, en 2,5 moléculas de agua con hidratación por molécula: $\text{NaClO} \cdot 2,5 \text{H}_2\text{O}$; siendo la primera forma la más conocida; y en 0°C se diluye 29,3 g de sal en 100 g de agua, y con 23°C son 94,2 g/100 (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014).

Figura 14

Principales tratamientos de efluentes cianurados.



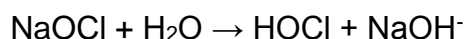
Reacciones

La lejía reacciona a elevadas temperaturas para producir cloruro y clorato.



Dicha reacción es varias veces aprovechada para llevar a cabo la síntesis del clorato, ya que con aminas se forman cloraminas. Los compuestos resultantes son explosivos y tóxicos; no son inflamables, sin embargo, reaccionan a la presencia de fuego.

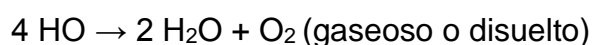
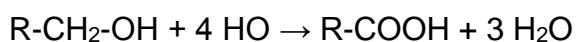
Considerando que el hipoclorito de sodio, al reaccionar con agua resulta ácido hipocloroso, a su vez es desintegrado en ácido clorhídrico y oxígeno, tal como se observa en la siguiente fórmula:



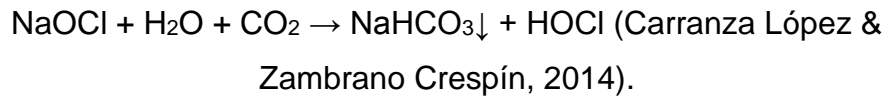
Cuando es disuelto en agua su descomposición es lenta, dando lugar al sodio, cloruros y radicales hidroxilos, observándose:



Estos radicales hidroxilos son capaces de oxidar compuestos orgánicos o sufrir reacción para la formación de agua y oxígeno (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014)



Pasando a través de solución acuosa y fría de hipoclorito de sodio y dióxido de carbono, se obtiene solución de ácido hipocloroso:



Usos

La lejía o hipoclorito de sodio (comúnmente identificado como agua lavandina, cloro, agua Jane, etc) es una disolución acuosa, utilizado con gran frecuencia en viviendas, y como oxidante en procesos de potabilización de agua, en dosis parcialmente altas al punto crítico (en el cual aparece cloro residual libre) (Smith & Mulder, 2016).

En lo que respecta al tratamiento de agua, la preocupación en manipulación, transporte y seguridad en todo el proceso tienen impacto directo al utilizar hipoclorito de sodio en vez de gas cloro, representando un mercado de primordial expansión con gran potencial; el hipoclorito de sodio también es empleado en la desinfección de piscinas, aplicándolo directamente como líquido (125 mL por día en cada 10 m³ de agua), mediante polvo o pastillas concentradas, o por medio aparato de electrólisis salina en el cual circula agua de la piscina (Smith & Mulder, 2016). Para que el proceso de electrólisis sea efectivo, se ha de salar parcialmente la piscina (necesariamente con 4 g de sal por cada litro de agua), por medio de descargas eléctricas, el aparato de electrólisis convierte la sal (NaCl) en hipoclorito de sodio, logrando la desinfección del agua; es utilizado también en procesos de identificación de especies animales de distintos filos que poseen escleritos o espículas como equinodermos (holoturoideos) o poríferos (Sienko & Plane, 1970). El hipoclorito de sodio degrada la materia orgánica, poniendo al descubierto sus estructuras (únicas en las especies), los cuales son: dióxido de silicio (silíceas) o carbonato de calcio (calcáreas), por ello, no se disuelven; este agente químico también se emplea como un blanqueador en fibras textiles, y para la desinfección de lavabos, caracterizado por su gran poder bactericida y fungicida (Smith & Mulder, 2016).

1.3. Marco Conceptual

Cianuro: Conceptualizado técnicamente como un anión que posee carga singular, caracterizado por un átomo de carbono y de nitrógeno, los cuales están unidos por un enlace triple (CN). Su término es utilizado en todo el código para la identificación genérica del ion de cianuro, cianuro de hidrógeno, sales y compuestos de cianuro, con grupo de metales en soluciones y en forma sólida (Mudder, 2017).

Cianuro libre: Se dice del ion cianuro no complejo CN^- y también por extensión al también se le llama al cianuro de hidrógeno en forma de solución, gas o acuoso.

Cianuro total:

Es la medida de concentración de cianuro, incluyendo a todo el cianuro libre, complejos de cianuro WAD y cianuros metálicos fuertes, tales como segmentos de hexaciano-cobaltato $\text{Co}(\text{CN})_6^{3-}$, ferrocianuro $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$, ferricianuro $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$, y los de oro y platino. Sólo los compuestos relacionados o derivados cianato (CNO^-) y tiocianato (SCN^-) se excluyen de la conceptualización de cianuro total (Hiskey & Atlury, 1988).

Contaminación:

Es la liberación de sustancias tóxicas, que, en forma indirecta o directa, causan daños o efectos negativos a seres vivos y medio ambiente; constituye la existencia de agentes tóxicos, infecciosos o contaminantes químicos en el ambiente, que perjudican el bienestar humano (vida y salud), y daña la flora, fauna, calidad del ambiente, equilibrio económico, y bienes públicos y particulares (Hakamura, 2017)

Contaminante:

Es un elemento que forma parte de un residuo o un material que se sospecha o se sabe que es un potencial agente de riesgo.

Efluente: Constituye un desecho obtenido en proceso gaseoso, sólido o líquido, el cual es descargado al medio ambiente con o sin tratamiento; es cualquier gas, sólido, semisólido o líquido que entra en contacto con el ambiente, siendo un subproducto de diversas actividades industriales o humanas (SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica, 2004).

Emisión: Descarga o transferencia de compuestos químicos contaminantes del aire, desde una fuente específica hacia la atmósfera libre; es la superficie o punto donde se realiza la descarga (fuente). Término empleado para caracterizar a la descarga y caudal que emite la sustancia contaminante al ambiente (Habashi, 1997).

Impacto ambiental: Es el cambio negativo, positivo o neto provocado al medio ambiente, producto de acciones antrópicas indirectas, susceptibles de originar alteraciones que afecten a la salud, recursos naturales y procesos ecológicos vitales (Habashi, 1997).

Impacto ecológico: Perturbación o efecto producto de un cambio de origen antropogénico o natural en el ecosistema de un área específica (Habashi, 1997).

Hipoclorito de sodio: Denominado comúnmente lejía, lavandina o cloro (solución en agua), compuesto químico con gran oxidación, siendo su fórmula NaClO ; contiene cloro en estado oxidativo +1, fuerte oxidante y económico; empleado principalmente como desinfectante; con poder de destrucción de diversos colorantes, siendo su mayor utilidad como blanqueador (Carranza López & Zambrano Crespín, 2014). Es estable con pH básico en disolución acuosa; al acidular con presencia de cloruro tiende a liberar cloro elemental, que en normales condiciones se mezcla para formar gas cloro molecular, el cual es tóxico (Habashi, 1997).

Lixiviación: Operación que consiste en pasar un solvente por medio de una capa de material pulverizado, con la finalidad de extraer uno o diversos constituyentes solubles. Es sinónimo de percolación.

Relaves: Material mineralizado, siendo un residuo en diversos procesos anteriores, denominado también “colas”.

CAPÍTULO II

EL PROBLEMA, LOS OBJETIVOS Y LA HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

2.1. Situación Problemática

El cianuro y los compuestos cianurados residuales resultantes del proceso de cianuración del mineral de oro, son subproductos que tienen la capacidad de impactar negativamente en suelos y aguas subterráneas o superficiales, así como también en seres vivos, debido a su potente inhibición del metabolismo. Dichas sustancias son conocidas como: compuestos simples de cianuro (cianuro débilmente complejo, WAD), cianuro libre, y compuestos complejos de cianuro (cianuro fuertemente complejo, SAD). En conjunto estos tres compuestos de cianuro, se les denomina “cianuro total”.

Las normas ambientales dadas por los organismos nacionales e internacionales que reglamentan las concentraciones de cianuros en los vertimientos mineros son cada vez más estrictas, exigiendo el cumplimiento de acuerdo con los valores máximos permisibles y para verificar esto se hacen constantes monitoreos que implican el análisis de los desechos sólidos, del agua y del aire de las áreas comprendidas con el uso directo del cianuro en la planta; esto es, el relave, el área de cianuración y el agua de recuperación.

Esto quiere decir que es muy importante aplicar el concepto de producción más limpia que orienten los procesos tecnológicos hacia la recirculación y reuso de aguas residuales de dichos procesos. A la par de que se desarrollen nuevos métodos para eliminar el cianuro de los vertidos de la cianuración, porque los métodos conocidos como son: oxidación química, biodegradación, precipitación y degradación natural, no son totalmente efectivos ya que presentan distintos niveles de efectividad, aunque ninguno de ellos, por sí solo, permite alcanzar el 100 % de eliminación. Debido a esto se ha desarrollado este trabajo en el que se investigó la aplicación del hipoclorito de sodio, para la remoción de los distintos compuestos cianurados presentes en los

efluentes residuales de una planta hidrometalúrgica, dedicada a la cianuración de minerales de oro.

2.2. Formulación del Problema

2.2.1. Problema general.

¿Se pueden determinar los parámetros óptimos para el uso de lejía en la eliminación del cianuro de efluentes de lixiviación en minerales de oro?

2.2.2. Problemas específicos:

- a. ¿Qué nivel de contaminación con cianuro tienen los efluentes de lixiviación de minerales auríferos?
- b. ¿Mediante que mecanismo la lejía puede eliminar el cianuro de los efluentes de la lixiviación de minerales de oro?

2.3. Objetivos de la Investigación.

2.3.1. Objetivo General.

Determinar los parámetros óptimos para el empleo de la lejía en la eliminación de cianuro de los efluentes de lixiviación de minerales de oro.

2.3.2. Objetivos específicos

- a. Establecer el nivel de contaminación con cianuro que tienen los efluentes de la lixiviación de minerales auríferos.
- b. Determinar mediante qué mecanismo la lejía puede eliminar el cianuro de los efluentes de la lixiviación de minerales de oro.

2.4. Hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Experimentalmente se pueden determinar los parámetros óptimos para el empleo de lejía en la eliminación de cianuro de efluentes de lixiviación de minerales de oro.

2.4.2. Hipótesis específicas

- a. El nivel de contaminación con cianuro que tienen los efluentes de lixiviación de minerales auríferos son altos.
- b. Mediante mecanismos químicos la lejía puede eliminar el cianuro de efluentes de lixiviación de minerales de oro.

2.5. Variables e Indicadores

2.5.1. Variables

Variable independiente (X)

Determinación de los parámetros óptimos para el uso de lejía

Variable dependiente (Y)

Eliminación del cianuro de efluentes de lixiviación de minerales de oro.

2.5.2. Indicadores

Variable independiente (X):

Contenido promedio de cianuro en relave (ppm)

Concentración de la lejía (%)

Concentración de cianuro inicial.

Velocidad del flujo de la solución de lejía.

Variable dependiente (Y)

Contenido promedio de cianuro en efluente líquido (ppm)

pH de solución resultante

Concentración de cianuro final.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y Nivel de Investigación.

La presente investigación por su tipo es aplicada y por su nivel explicativa.

3.2 Población y Muestra

La población en la investigación fue conformada por los efluentes sólidos y líquidos de la lixiviación de minerales auríferos en la provincia de Nasca.

Se tomará como muestra los efluentes de la planta de cianuración Victoria II de Nasca, se recolecto en dicha planta un total de 20 Kg de relave húmedo, los cuales se depositaron en dos baldes plásticos con tapa hermética de 10 Kg cada uno y 4 litros de agua residual que fue muestreada en la relavera y que constituye el agua separándose del relave de cianuración para posteriormente ser bombeada a la poza de agua de recuperación para su posterior reutilización en el proceso.

3.3 Diseño del Método de Investigación

El tipo de diseño que se aplicó en la investigación es el Diseño Experimental.

Previamente al análisis de los relaves se procede a pesar un kilogramo de relave, el cual se vierte en un vaso de dos litros y se agrega agua destilada y se somete a agitación y posterior decantación para finalmente filtrar y llevar a análisis una alícuota de este filtrado.

El tratamiento con el hipoclorito de sodio se lleva a cabo con diferentes concentraciones de esta sustancia, desde 7% hasta 14%, las primeras concentraciones hasta el 9% previamente a agregar el hipoclorito se agrega una solución de hidróxido de calcio para llevar el relave a un pH alcalino y evitar el desprendimiento de HCN.

Ensayos sin agregar el hidróxido de calcio se realiza en la campana extractora.

La muestra de un kilogramo se coloca en un filtro especialmente diseñado, en el cual se agrega progresivamente la solución de hipoclorito a la concentración elegida y se deja filtra hasta agotamiento del líquido y luego se analiza el filtrado y haciendo un lavado del relave se determina el cianuro residual que ha quedado, después de realizar el tratamiento.

3.4 Técnicas e Instrumentos de Recojo de Información

3.4.1. Técnica de recolección de datos

Las técnicas empleadas en la recolección de datos fueron los procedimientos analíticos para la cuantificación del cianuro y otros componentes del efluente.

3.4.2. Instrumentos de recolección de datos

Los instrumentos empleados fueron los ensayos experimentales que permiten obtener los datos sobre la concentración de cianuro en el efluente antes y después del tratamiento con hipoclorito de sodio.

3.5 Técnicas de Análisis de Resultados

Las muestras fueron analizadas para determinar su composición química mediante pruebas experimentales volumétricas para determinar cianuro. Los datos obtenidos fueron seleccionados, tabulados, interpretados y discutidos de acuerdo con los objetivos de la tesis.

CAPÍTULO IV

MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1 Materiales, Instrumentación y Equipos

Se emplearon los materiales más usuales de laboratorio como son los vasos de precipitación, probetas, tubos de ensayo, buretas, pipetas, fioles, Erlenmeyer, pinzas, vidrios de reloj, mufla, estufa de secado y campana extractora.

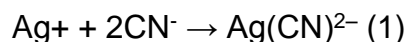
4.2 Métodos y Procedimientos

Las técnicas analíticas empleadas para determinar la cantidad de cianuro presente en el relave y en el líquido antes y después del tratamiento con hipoclorito de sodio, fueron los siguientes:

4.2.1. Cianuro libre mediante volumetría

Según Standard Methods N° 4500-CN-D; y ASTM D-2036-91 (con referencia: "4500-CN- CYANIDE", en *Standard Methods For Examination of Water and Wastewater. Identificado en DOI: 10.2105/SMWW.2882.077*)

Se empleó dicho método para tratar concentraciones de cianuro superiores de 5 mg/L (ppm) y en aquellas soluciones claras; dicho método tiene gran facilidad y rapidez en su aplicación. Su técnica consiste en hacer reaccionar el nitrato de plata conjuntamente con ion cianuro en solución alcalina, formando de esta manera el complejo soluble $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ según reacción siguiente:



Al no quedar más cianuro en la solución, el exceso o sobrante de plata se precipita en AgCN, reaccionando con el indicador (comúnmente KI) formándose AgI. En dichos casos, el punto final en titulación es proporcionada con la aparición de turbidez constante o permanente, amarilla opalescente o blanca. Si existe ausencia de un indicador, y evidenciando metales en solución, dicho método realizará la cuantificación de cianuros de zinc, cianuros libres y cierta parte (10%)

de cianuros de cobre. Para impedir una sobreestimación de cianuro libre en soluciones de cianuración de cobre, es fundamental la adición como indicador de 1 mL de KI al 5%. De igual forma, mediante el uso de un distinto indicador (rodadina) permite detectar el punto final de titulación a través de un electroneo específica en $Ag^+/S=$, el cual identificará con el empleo de un potenciómetro, la lectura precisa en mV de solución. Cuando el cianuro libre se acaba, aparece un cambio repentino en pendiente de curva mV contra tiempo, indicando el punto final de titulación. En cualquier técnica de volumetría, se aconseja realizar titulación con frecuencia de 3 veces, obteniendo un resultado promedio. En titulación de soluciones, sobre todo en las de plata y oro, existe gran diversidad de iones, por lo que es recomendable usar el indicador yoduro de potasio.

4.2.2. Cianuro libre con electrodo específico de cianuro

Según Standard Methods N° 4500-CN-F; y ASTM D-2036-91 (con referencia: "4500-CN- CYANIDE", en *Standard Methods For Examination of Water and Wastewater. Identificado en DOI: 10.2105/SMWW.2882.077*)

Método empleado en reducidas concentraciones de cianuro.

Dicha técnica permite la medición precisa de mínimas cantidades de cianuro (con rango de trabajo entre 0.05 y 10 mg/L) en soluciones claras y con color. El electrodo empleado para la medición de cianuro posee una membrana de yoduro de plata y sulfuro de plata, reaccionando con cianuro de solución, y liberando una proporción o cantidad de ion yoduro, tal como lo manifiesta la reacción siguiente:



De esta manera, el yoduro liberado es identificado por el electrodo. Es fundamental ejecutar una curva de calibración y concentración de solución estándar contra voltaje en potenciómetro al que está unido dicho electrodo específico, y según interpolación, se hallará concentración relacionada a la medida de voltaje, evidenciando una determinada muestra problema. Por tanto, el electrodo detecta acertadamente todo el cianuro libre y en aquellos complejos de

cianuro que contienen constante estabilidad inferior al del cianuro de plata (cianuro de cadmio y zinc). En algunos iones metálicos que integran complejos de cianuro, también formarán hidróxidos en solución. Tal es el caso en una solución de 0.1 M de hidróxido, que predispone a la formación de hidróxidos de cadmio y zinc antes que se formen los cianuros de estos metales. En cuanto a la dureza del agua, éste no afecta el resultado analizado, ya que el magnesio e iones de calcio no forman complejos con el cianuro.

Los nitratos, fosfatos, cloruros, potasio, fosfatos, amoníaco, sodio y carbonatos, en niveles que comúnmente se hallan en aguas residuales, no alteran la cuantificación de cianuro con electrodo específico. Sin embargo, el electrodo no detecta complejos de hierro, pero esto se puede conseguir si es sometido a destilación ácida. El níquel y cobre tienden a formar complejos de cianuro incluso en soluciones muy simples, logrando disminuir la cantidad de cianuro identificado por el electrodo. Dichas soluciones deben ser pretratadas con EDTA en un pH = 4, con temperatura en 50°C por 5 minutos, con la finalidad de liberar el cianuro. Posteriormente, es fundamental añadir nuevamente una base para la conservación del cianuro en forma iónica. El método presenta el inconveniente de que el resultado esté afectado por la presencia de ciertos iones (tales como el F⁻, S²⁻, Br⁻, Cl⁻ y Hg⁺). En presencia de oxidantes no altera su funcionamiento. Es vital mantener el mismo valor de pH en soluciones estándar usadas para la construcción de curva de calibración, y en soluciones que se desean identificar. También es fundamental que la temperatura sea igual en todo el proceso, tanto en estándares como en muestras problemas (menor de 80°C). En esta forma de análisis, la preparación de soluciones estándar con agua destilada, pueden alterar el resultado si la muestra problema seleccionada posea una matriz muy distinta al del agua destilada. En lo posible, es conveniente reproducir los estándares de matriz de la solución. Sin embargo, en diversos casos, el electrodo podrá contaminarse debido a recubrimientos formados en la membrana, por ello se aconseja verificar

constantemente la superficie del electrodo, y realizar su limpieza oportuna cuando sea necesario.

4.2.3. Cianuro total por destilación

Según Standard Methods N° 4500-CN-C; y ASTM D-2036-91 (con referencia: "4500-CN- CYANIDE", en *Standard Methods For Examination of Water and Wastewater. Identificado en DOI: 10.2105/SMWW.2882.077*)

Dicho método permite la cuantificación de cianuro libre, cianuros simples y complejos metálicos de cianuro en su mayoría (a excepción del platino, oro, cobalto). Existen diversas versiones de esta técnica, ya que se utilizan diversos reactivos según aquellos complejos de cianuro que se requieren disociar. La variante más empleada en el método para analizar el cianuro total, consiste en una destilación ácido de reflujo, utilizando a su vez cloruro de magnesio ($MgCl_2$), el cual es un catalizador a fin de descomponer complejos metálicos; no obstante, algunos complejos con gran estabilidad tales como el platino, cobalto y oro, no podrán ser disociados en su totalidad. La destilación ácida producirá ácido cianhídrico, el cual es absorbido y arrastrado en solución alcalina, donde se cuantifica el cianuro libre según método escogido (por electrodo específico o volumetría). Su detección tiene un límite de 0.005 mg/L. El principal inconveniente que presenta este método es: interferencia de algunos elementos en solución (específicamente las especies de azufre, agentes oxidantes, tiocianato y nitritos). Se ha comprobado en diversas investigaciones, que el método de cianuro total con destilación de sulfúrico, realiza una cuantificación de cianuro más de lo confiado ante la presencia de tiocianato en muestra. Sin embargo, su magnitud de error se incrementa frente a concentración de tiocianato. Por ello se aconseja emplear ácido fosfórico en vez de ácido sulfúrico para reducir el error. Ingersoll propuso un método de destilación que evita la interferencia de tiocianato con el empleo de agentes secuestrantes. El método radica en realizar una destilación de reflujo por un periodo de 30

minutos con pH de 4.5, con presencia de ácido 4.5 hidroxibenzenedisulfónico (o con tetraetilenpentaamina) y con presencia de iones de plomo (II), quienes neutralizan la interferencia originada por presencia de sulfuros. En estudios ejecutados en laboratorio empleando soluciones de cianuro de 10 mg/L CN y en ausencia de metales, se obtuvo una recuperación de 98% con método de destilación. Si la solución – concentración de cianuro es de 1 mg/L de plata y 2 mg/L de cobre, el cianuro total que fue detectado, se reduce en un 70% si se realiza destilación con ácido sulfúrico, y en 70% si se emplea además ácido EDTA y ácido sulfámico, y en un 75% si se realiza destilación con EDTA y ácido acético. Si en la misma solución (2 mg/L de cobre, 10 mg/L de cianuro, y 1 mg/L de plata) se adiciona tiocianato (2 mg/L), el porcentaje de recuperación se incrementa en 88% a 90% destilado con ácido sulfúrico, ya que una parte del tiocianato es descompuesto a cianuro. Al probar la destilación con ácido fosfórico en vez de sulfúrico para impedir la descomposición de tiocianato, se obtuvo una recuperación de hasta 79% de cianuro. es fundamental la relación entre la concentración de cianuro con concentración de metales. Poniendo un ejemplo, que, si en la solución existe una concentración inicial de cianuro, aumenta de 10 a 25 mg/l, permaneciendo los metales constantes (2 mg/l de cobre y 1 mg/l de plata), se recupera el cianuro por destilación con ácido sulfúrico en 99%.

CAPÍTULO V

RESULTADOS, ANÁLISIS, DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

5.1 Resultados

Tabla 1

Contenido promedio de cianuro en las muestras según los métodos de ensayo

(Muestra: Relave)

Nº DE ENSAYOS REALIZADOS	RESULTADOS Ppm	MÉTODO EMPLEADO
05	145	CIANURO LIBRE POR ELECTRODO ESPECÍFICO DE CIANURO Según Standard Methods 4500-CN-F; ASTM D-2036-91.
05	193	CIANURO TOTAL POR DESTILACIÓN Según Standard Methods 4500-CN-C; ASTM D 2036-91.
05	148	CIANURO LIBRE POR VOLUMETRÍA Según Standard Methods 4500-CN-D; ASTM D-2036-91.

Fuente: Datos experimentales.

Para estos ensayos se tomaron cinco muestras de un kilogramo de peso, que se depositaron en vasos de precipitados de 2 litros de capacidad, a los que se agregó dos litros de agua destilada y se sometieron a agitación mecánica por una hora a 400 rpm, con el fin de captar los compuestos solubles de cianuro presentes en el relave, después de lo cual se realizó el análisis empleando cada método, hallando resultados promedio consignados en la Tabla 1, como se puede observar los métodos volumétricos ofrecen mejores resultados analíticos, siendo 148 ppm para el cianuro libre y 193 ppm para el cianuro total.

Tabla 2

Contenido promedio de cianuro en las muestras según los métodos de ensayo

(Muestra: Efluente líquido)

Nº ENSAYOS REALIZADOS	RESULTADOS, Ppm	MÉTODO EMPLEADO
05	158	CIANURO LIBRE POR ELECTRODO ESPECÍFICO DE CIANURO Según Standard Methods 4500-CN-F; ASTM D-2036-91.
05	241	CIANURO TOTAL POR DESTILACIÓN Según Standard Methods 4500-CN-C; ASTM D 2036-91.
05	165	CIANURO LIBRE POR VOLUMETRÍA Según Standard Methods 4500-CN-D; ASTM D-2036-91.

Fuente: Datos experimentales.

Siguiendo el mismo procedimiento experimental aplicado al relave, se procedió a analizar el agua que se separa del relave en las relaveras, cuando el material sólido se compacta, dejándola libre. Para cada método de ensayo se hicieron cinco análisis, obteniéndose los resultados que se reportan en la Tabla 2, donde vemos que, para este caso, también resultan más idóneos los métodos volumétricos, los cuales indican 165 ppm para el cianuro libre y 241 para el cianuro total.

Tabla 3

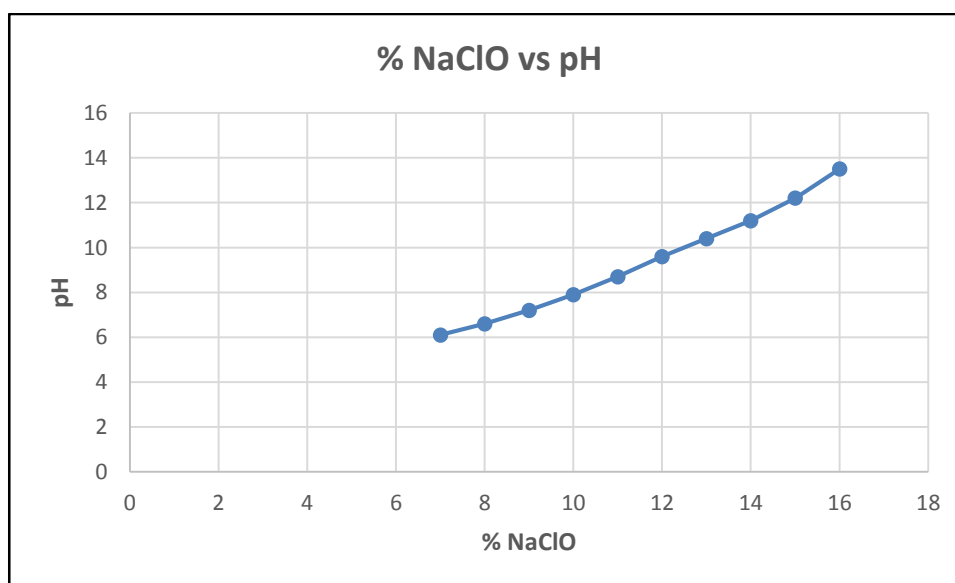
Porcentaje de NaClO y pH de la solución resultante

% de NaClO	pH
7	6,1
8	6,6
9	7,2
10	7,9
11	8,7
12	9,6
13	10,4
14	11,2
15	12,2
16	13,5

Fuente: Datos experimentales.

Gráfico 1

Relación entre la Concentración de lejía y el pH



Las pruebas experimentales se han llevado a cabo con soluciones de hipoclorito a partir de un pH 6,1, que equivale a una concentración del 7%. Las pruebas se ejecutaron con la finalidad de establecer la relación entre la concentración del hipoclorito de sodio y pH de la solución, teniendo en cuenta que las concentraciones bajas de este compuesto dan soluciones ácidas con el agua lo que generaría el desprendimiento de HCN de las muestras tratadas lo que es peligroso para los investigadores y operarios, como se observa en la Tabla 3 las soluciones a partir del 10% son alcalinas y se pueden emplear sin riesgos en los ensayos planteados en la tesis. Con las soluciones desde el 7% al 9% por seguridad se debe trabajar bajo la campana de extracción.

Tabla 4

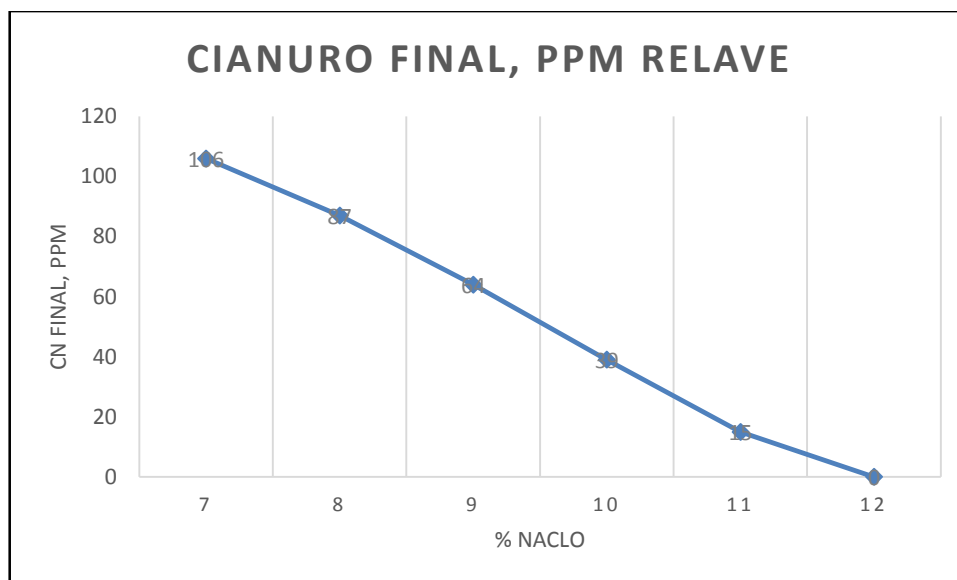
Resultados del tratamiento del relave con NaClO a diversas concentraciones

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	193	106
8	193	87
9	193	64
10	193	39
11	193	15
12	193	00

Fuente: Datos experimentales.

Gráfico 2

Tratamiento de relave empleando NaClO en diversas concentraciones



En la Tabla 4 se observa los hallazgos en pruebas realizadas con el relave, el cual fue colocado en cinco filtros lentos especialmente acondicionados con un kg de muestra, en el cual caían gotas de solución de hipoclorito de sodio que fluía a una velocidad de 25 mL por minuto, después de lo cual se hicieron los análisis respectivos, verificándose que una solución del 12% permite eliminar en su totalidad el cianuro presente en el relave.

Tabla 5

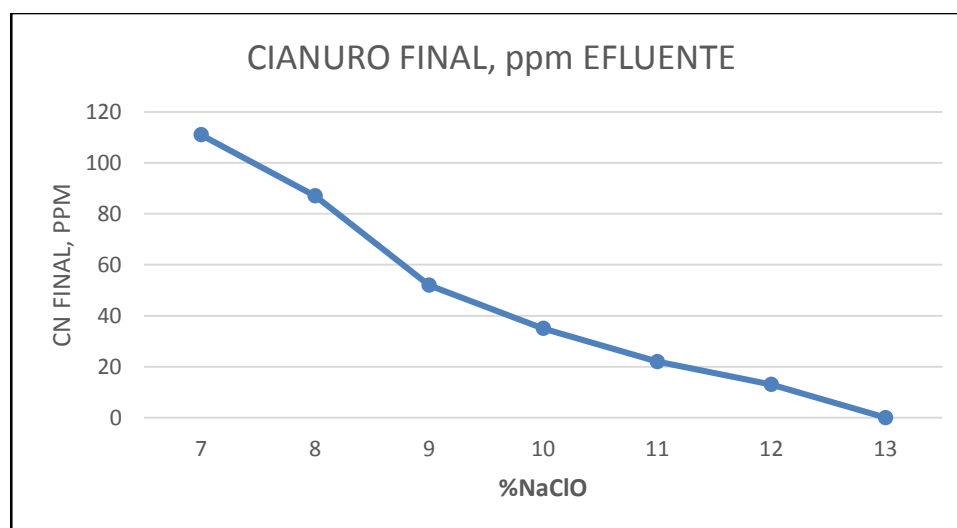
Resultados del tratamiento del efluente líquido con NaClO a diversas concentraciones

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	241	111
8	241	87
9	241	52
10	241	35
11	241	22
12	241	13
13	241	00

Fuente: Datos experimentales

Gráfico 3

Tratamiento del efluente con NaClO a diversas concentraciones



En la Tabla 5 se muestran los resultados de las pruebas realizadas con el efluente líquido, del cual se tomaron 16 muestras de 100 mL colocados en vasos de precipitados de 200 mL en los cuales se agregó 100 mL de solución de hipoclorito de sodio de concentraciones entre 7% y 13%, se sometieron a agitación mecánica por 1 hora, después de lo cual se hicieron los análisis respectivos, verificándose

que una solución al 13% permite eliminar en su totalidad el cianuro presente en el efluente líquido.

Tabla 6

Resultados del tratamiento del relave húmedo con NaClO a diversas concentraciones

(Velocidad del flujo de NaClO: 400 mL/h)

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	434	234
8	434	218
9	434	196
10	434	167
11	434	141
12	434	115
13	434	101
14	434	83
15	434	67
16	434	45

Fuente: Datos experimentales.

Tabla 7

Resultados del tratamiento del relave húmedo con NaClO a diversas concentraciones

(Velocidad del flujo de NaClO: 300 mL/h)

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	434	233
8	434	215
9	434	187
10	434	161
11	434	132
12	434	110
13	434	89
14	434	74
15	434	51
16	434	33

Fuente: Datos experimentales.

Tabla 8

Resultados del tratamiento del relave húmedo con NaClO a diversas concentraciones

(Velocidad del flujo de NaClO: 200 mL/h)

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	434	217
8	434	193
9	434	164
10	434	147
11	434	122
12	434	102
13	434	73
14	434	61
15	434	38
16	434	19

Fuente: Datos experimentales.

Tabla 9

Resultados del tratamiento del relave húmedo con NaClO a diversas concentraciones

(Velocidad del flujo de NaClO: 100 mL/h)

% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, Ppm
7	434	192
8	434	171
9	434	160
10	434	139
11	434	118
12	434	89
13	434	63
14	434	31
15	434	05
16	434	00

Fuente: Datos experimentales.

En las Tablas 6, 7, 8 y 9 se muestra los resultados del tratamiento del relave húmedo (el relave tal como sale del área de proceso, con un 68% de humedad) que tiene una concentración de cianuro de 434 ppm; al mismo que se le ha sometido a ensayos con diferentes concentraciones de NaClO, desde un 7% a un 16%, y a diferentes velocidades de flujo desde 400 mL/h hasta 100 mL/h, determinándose que a una menor velocidad de flujo (100 mL/h) con una concentración de hipoclorito de sodio de 16%, se elimina totalmente el cianuro contenido en efluentes del proceso de cianuración.

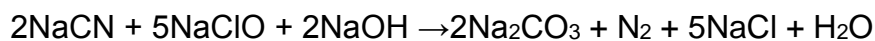
5.2 Análisis, Discusión de Resultados

La parte experimental de esta tesis se realizó en laboratorios de la Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional "San Luís Gonzaga", empleando como muestra para los estudios experimentales, efluentes sólidos y líquidos que son bombeados desde el área de producción a las relaveras de la planta, como relave. Las muestras se tomaron en dos puntos: a la salida del área de producción y en las relaveras, en estas últimas se tomó por separado muestras de relave y muestra del agua que se separa de este cuando el sólido se compacta. Los resultados de los análisis de ambas muestras coinciden; siendo el contenido de cianuro en la muestra tomada en planta de 434 ppm y los resultados del relave húmedo 193 ppm y del líquido resultante de la separación 241 ppm. Esto quiere decir que cuando el relave se separa del agua, esta última arrastra una mayor cantidad de cianuro, lo que ambientalmente la convierte en un potencial peligro para las fuentes de agua superficiales y subterránea, por lo que es imprescindible el tratamiento de estos efluentes.

Para el tratamiento con el hipoclorito de sodio, compuesto químico conocido comercialmente como lejía, se ha empleado este reactivo en estado sólido que luego ha sido disuelto en agua destilada en los porcentajes planteados en la tesis. En la selección de los porcentajes a emplear en el tratamiento del cianuro se ha tomado en cuenta las propiedades fisicoquímicas del hipoclorito, el mismo que a bajas concentraciones forma soluciones de carácter ácido, lo cual perjudicaría los ensayos, debido a que el cianuro de sodio en este tipo de soluciones genera desprendimiento de HCN gaseoso que es altamente tóxico. Debido a ello se han preparado, para los ensayos, soluciones desde 7% hasta 16% y para los ensayos con concentración entre 7 y 9% se tuvo el cuidado de realizarlos en la campana extractora, ya que existe la posibilidad de generación de HCN; pero esas pruebas nos han permitido verificar que en condiciones de pH ácido el hipoclorito no tiene poder neutralizante

frente a los compuestos de cianuro y al contrario, actúa como catalizador de reacciones que generan productos altamente contaminantes, tóxicos y con una movilidad elevada en los suelos, aunque como se puede observar en los reportes, las soluciones al 7,8,9 %, permiten la reducción de compuestos de cianuro, pero a la par se van formando compuestos peligrosos para la salud.

El empleo de soluciones de hipoclorito de sodio de concentración elevada, asegura su basicidad y por lo tanto la formación de compuestos menos tóxicos como los tiocianatos y los cianatos, los mismos que se ven favorecidos si en el relave hay presencia de compuestos de hierro como los sulfatos, formándose los ferrocianuros que tienen una toxicidad baja. Como el hipoclorito de sodio es un oxidante fuerte en este caso, los cianatos se oxidan para dar gas nitrógeno y carbonatos, esto se ve favorecido por la presencia de un álcali como el hidróxido de calcio o el hidróxido de sodio empleado para alcalinizar la solución antes de agregar el cianuro de sodio cuando se inicia el proceso de lixiviación. La reacción se puede expresar así:



El objetivo de la tesis es determinar los parámetros óptimos para eliminar el cianuro presente en los relaves de la lixiviación del oro, por lo que en los ensayos se ha contemplado la determinación de un flujo adecuado que permita la neutralización de dicho compuesto.

Para ello se trabajó a nivel laboratorio con un filtro lento en el cual como medio filtrante trabajó el mismo relave y a través de él se hizo fluir la solución de hipoclorito, con una concentración del 16% que permitió darle mayor seguridad a la neutralización total. Los ensayos realizados se hicieron con flujos que van desde los 400 mL/h hasta los 100 mL/h, notándose que conforme el flujo se reducía, la concentración de cianuro bajaba, lo que aseguró la eliminación total; demostrándose de esta manera nuestra hipótesis planteada.

5.3 Contrastación de la Hipótesis

La comprobación de una hipótesis, es un procedimiento estadístico que consiste en que el investigador realice una suposición sujeta a prueba en relación a un parámetro en la población. La metodología utilizada por el investigador depende de las características de los datos empleados y el motivo por el cual se realiza el análisis. Esta prueba se ejecuta para la evaluación de plausibilidad de una determinada hipótesis empleando datos específicos de la muestra. Estos datos provienen de una población más extensa o mediante un proceso de generación de datos. El término “población” se empleará para dichos casos en las descripciones siguientes.

Toda hipótesis se sujeta a comprobación siguiendo un proceso de 4 pasos:

1. El primer paso es que el analista enuncie las dos hipótesis de modo que una de ellas será la correcta o verdadera.
2. El paso siguiente es precisar un plan de análisis, en el cual se describa como se realizará la evaluación de datos.
3. El tercer paso es ejecutar el plan, describiendo y analizando los datos encontrados en la muestra.
4. El último y cuarto paso es interpretar los hallazgos y rechazar la hipótesis que no es verdadera, en el cual la hipótesis nula puede ser rechazada o ser plausible, según los datos.

H_0 = Hipótesis Nula = A menor flujo con mayor concentración de lejía disminuye la concentración de cianuro.

H_1 = Hipótesis Alternativa = A menor flujo con mayor concentración de lejía **NO** disminuye la concentración de cianuro.

Para aceptar o rechazar la hipótesis nula se realizaron varias pruebas de laboratorio cuyo resumen es el siguiente:

RELAVE		
% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, ppm
7	193	106
8	193	87
9	193	64
10	193	39
11	193	15
12	193	0

En este tratamiento para el relave se demuestra que, al aumentar el porcentaje de lejía, la concentración de cianuro disminuye hasta quedar totalmente eliminado a la concentración de 12% de lejía.

EFLUENTE		
% de NaClO	CIANURO INICIAL, ppm	CIANURO FINAL, ppm
7	241	111
8	241	87
9	241	52
10	241	35
11	241	22
12	241	13
13	241	0

En este tratamiento para el efluente se demuestra que, al aumentar el porcentaje de lejía, la concentración de cianuro disminuye hasta quedar totalmente eliminado a la concentración de 13% de lejía.

Realizando la observación de las pruebas realizadas con el relave con un contenido promedio de 434 ppm inicial para un tratamiento con lejía al 16%.

Se hizo el tratamiento reduciendo el flujo volumétrico de lejía que arrojó los siguientes resultados:

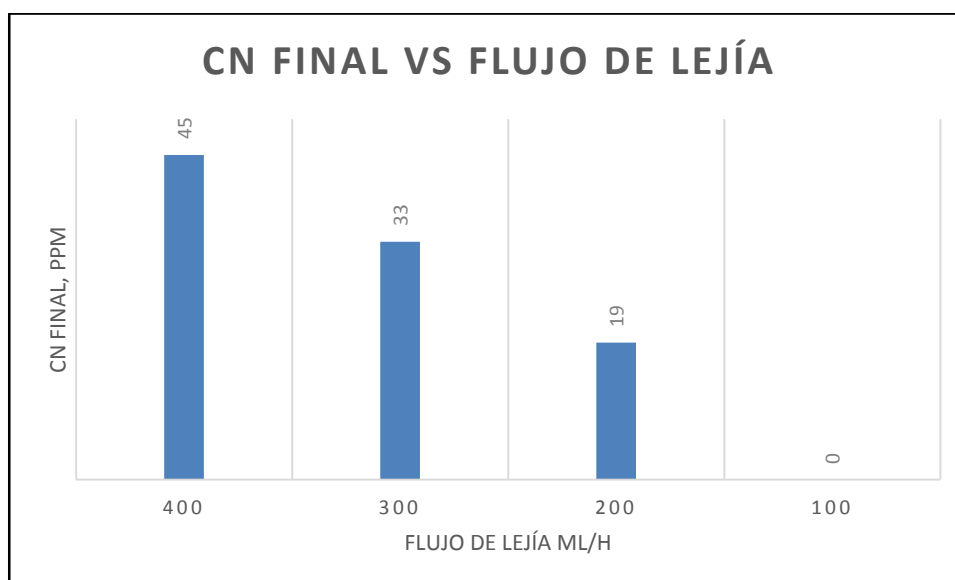
Tabla 10

Tratamiento del Relave a diferentes flujos de NaClO al 16%
(Resumen)

FLUJO ml/h	% LEJÍA	CN INICIAL ppm	CN FINAL ppm
400	16	434	45
300	16	434	33
200	16	434	19
100	16	434	0

Gráfico 4

Tratamiento del Relave a diferentes flujos de NaClO al 16%



De lo que se deduce que la hipótesis nula H_0 se acepta y se rechaza la hipótesis alternativa H_1 .

CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se han determinado los parámetros óptimos para el empleo de la lejía (hipoclorito de sodio) en la eliminación de cianuro de efluentes de lixiviación de minerales de oro, siendo estos los siguientes: Concentración de la lejía: 16%, velocidad de flujo: 100 mL/h, tratamiento filtración lenta.
2. El efluente de la lixiviación de minerales auríferos, tratado experimentalmente en la presente tesis tiene una elevada concentración de cianuro que alcanza los 434 ppm (434 mg/L)
3. La lejía debe de tener una alta concentración mayor a 10%, para que su pH sea alcalino y pueda oxidar el cianuro a tiocianatos y cianatos y en presencia de sulfato de hierro pueda generar ferrocianuros, todas ellas sustancias poco tóxicas y de degradación rápida.
4. El nivel de contaminación por cianuro se concluyó mediante las pruebas son los siguientes:
 - CN en el relave: 193 ppm
 - CN en el efluente: 241 ppm
 - CN total: 434 ppm

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda emplear guantes, anteojos y máscara anti gas para la preparación de las soluciones ya que el Hipoclorito de sodio sólido y en soluciones concentradas es muy cáustico y corrosivo.
2. El tratamiento del relave con cianuro con soluciones ácidas (menores de 10%) de lejía debe de hacerse en campana extractora.
3. Se recomienda llevar a cabo pruebas con mayores cantidades de relave, bajo las mismas condiciones desarrolladas en la presente tesis para comprobar los resultados y estudiar la factibilidad de su aplicación en planta.

REFERENCIAS

- Álvarez García, R. (2005). *Aplicación de sistemas pasivos para tratamiento de soluciones residuales de procesos cianuración de minería de oro (Tesis Doctoral)*. Universidad Oviedo, Oviedo, España.
- Carranza López, J., & Zambrano Crespín, F. (2014). *Influencia de dosificación de cloro y peróxido de cloro sobre contenido final de cianuro total en tratamiento de aguas de Minera Yanacocha S. R. L. (Tesis de pregrado)*. Universidad Nac. Trujillo, Trujillo, Perú.
- Cotton, A., & Wilkinson, G. (2015). *Química Inorgánica Avanzada*. México: Limusa-Wiley S. A.
- Chang, R. (2010). *Química*. México: McGraw-Hill.
- Díaz, D., & Condori, I. (2015). *Proceso detoxificación de soluciones cianuradas usando método INCO de efluentes mineros (Tesis de pregrado)*. Universidad Nac. Ingeniería, Lima, Perú.
- Gaviria, A., & Meza, L. (2015). *Análisis de alternativas para degradación de cianuro en efluentes líquidos y sólidos de municipio Segovia, Antioquia y planta de beneficio de empresa mineros nacionales, municipio Marmato, Caldas (Tesis de pregrado)*. Universidad Nac. Colombia, Medellín.
- Gómez Leiva, P. (2012). *Degradación de Cianuros mediante Oxidación Química en Efluentes Industriales (Tesis Máster)*. Universidad Oviedo, Oviedo, España.
- Habashi, F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy (Vol. III)*. Weinheim, Germany: Wiley-VCH.
- Hakamura, K. (2017). *Estudio de investigación experimental para destrucción de cianuro en humedales con sustrato orgánico para mitigar contaminación ambiental (Tesis pregrado)*. Universidad Nac. I San Luis Gonzaga, Ica.
- Hiskey, J., & Atlury, V. (1988). Dissolution Chemistry of Gold and Silver in Different Lixivants. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 95 – 134.
- Mudder, T. (2017). *Estudio de alternativas para degradación de cianuro en plantas hidrometalúrgicas*. México: CECSA.
- Nebergal, W., & Schmidt, F. (2015). *Química General, Análisis Químico Cualitativo*. Lima: San Marcos.
- Portal Minero S. A. (2003). *Manual General de Minería y Metalurgia*. 2006: Portal Minero Ediciones.
- SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica. (2004). *Módulos de capacitación Técnico Ambiental*. Lima: SACC Ingenieros SRL. Mollehuaca, Ica.
- Sienko, M., & Plane, R. (1970). *Química Física Inorgánica*. Barcelona: Reverté.
- Smith, A., & Mulder, T. (2016). *Tratamiento de residuos de cianuración*. México: Mining Journal Books Ltda.

Vogel, A. (1960). *Química Analítica Cuantitativa*. Buenos Aires: Editorial Kapelusz.

Wills, B., & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology*. Miami: Elsevier Science & Technology Books.