



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

RELACIÓN CIANURO DE SODIO: CIANICIDAS EN SOLUCIONES SINTÉTICAS,
PARA LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL AURÍFERO

Tesis que para obtener el Grado de
Maestra en Metalurgia y Ciencias de los Materiales presenta:

ING. ESMERALDA YAIREY GARCÍA ALCÁZAR

Director de Tesis

DR. RAMIRO ESCUDERO GARCÍA

Codirectora de tesis

DRA. MONSERRAT SOFIA LÓPEZ CORNEJO

RELACIÓN CIANURO DE SODIO: CIANICIDAS EN SOLUCIONES SINTÉTICAS,
PARA LA LIXIVIACIÓN DE UN MINERAL AURÍFERO



Morelia Mich., 19 de noviembre de 2025

ING. ESMERALDA YAIREY GARCÍA ALCÁZAR

Presente

Por medio de la presente, esta dirección del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tiene a bien informarle que para presentar su examen de grado de Maestro en Metalurgia y Ciencias de los Materiales con la tesis titulada *"Relación cianuro de sodio: cianicidas en soluciones sintéticas, para la lixiviación de un mineral aurífero."*, le ha sido asignada la siguiente mesa sinodal:

99002370	Dr. Ramiro Escudero García	Director de tesis
CONV1306	Dra. Montserrat Sofía López Cornejo	Co-Directora
15010073	Dra. Noemí Ortiz Lara	Vocal
04003187	Dr. Ricardo Morales Estrella	Vocal
02001616	Dr. Carlos Alberto León Patiño	Vocal
01001531	Dr. José Lemus Ruiz	Suplente

Agradeciendo de antemano las atenciones que se sirva prestar a la presente, aprovecho para enviarle un cordial saludo.

UMSNH



Dr. Arzosto Medina Flores
Director

Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Agradecimientos

A **Dios**, por todas las bendiciones recibidas y por permitirme culminar un proyecto más en el camino hacia el cumplimiento de mis metas y sueños.

A mis amados padres, **Fidelina y Manuel**, por los valores que me inculcaron, por brindarme la oportunidad de recibir una excelente educación, por su amor incondicional, su confianza y por estar siempre a mi lado.

A mis queridos hermanos: **Fernando, José Manuel, Alexander, Marlen Cristey y Tania Lizbeth**, por su ejemplo, su amor y su constante apoyo.

A mi asesor, **Dr. Ramiro Escudero García**, por su invaluable orientación, por compartir sus conocimientos y por la confianza que depositó en mí durante la realización de este proyecto. Agradezco profundamente su paciencia, comprensión y apoyo incondicional, sin los cuales este logro no habría sido posible, así como su amistad, la cual valoro y aprecio sinceramente.

A mi coasesora, **Dra. Monserrat Sofía López Cornejo**; a mis sinodales, **Dr. Carlos Alberto León Patiño, Dr. Ricardo Morales Estrella y Dra. Noemí Ortíz Lara**; y a mi suplente, **Dr. José Lemus Ruiz**, por su guía académica, sus valiosas observaciones y su contribución al desarrollo de este proyecto.

A mis compañeros y amigos de equipo de trabajo, **M.C. Hugo Jhonathan Marín García y M.C. José Guadalupe**, por compartir sus conocimientos, sus consejos, su tiempo y su constante apoyo.

A los **técnicos del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales**, por su ayuda rápida y oportuna, gracias a la cual fue posible realizar gran parte de mi trabajo experimental.

Al **Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**, por la oportunidad de desarrollar este proyecto en sus instalaciones.

A la **beca CONAHCYT**, por el apoyo económico brindado, el cual fue fundamental para la realización de mis estudios de posgrado.



ÍNDICE GENERAL

Índice general.....	iv
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vii
Tabla de simbología.....	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Justificación	2
1.2 Hipótesis	3
1.3 Objetivos:	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos.	4
1.4 Metas científicas y tecnológicas.	4
Capítulo II. Revisión bibliográfica.....	5
2.1 Caracterización física y química del mineral.....	5
2.2 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80}	5
2.3 Densidad.	6
2.4 Caracterización cualitativa y cuantitativa del mineral.	6
2.5 Proceso general para la extracción de oro.....	7
2.6 Lixiviación de oro.	8
2.6.1 Agentes lixiviantes del oro.....	8
2.6.2 Técnicas de cuantificación de cianuro.	10
2.6.3 Recuperación del oro solido a partir de la solución preñada.....	12
2.7 Reacciones que ocurren durante la lixiviación por cianuración.	15



2.8 Parámetros críticos que se deben controlar en el proceso de cianuración.	17
2.8.1 Efecto del pH en el proceso de cianuración.	17
2.8.2 Efecto del oxígeno disuelto en el proceso de cianuración.	19
2.8.3 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de cianuración.	21
2.8.4 Efecto de la concentración de cianuro en el proceso de cianuración.	22
Capítulo III. Desarrollo experimental	23
3.1 Caracterización física del mineral.....	24
3.1.1 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80} del mineral de cabeza.	24
3.1.2 Molienda del mineral de cabeza.....	25
3.1.3 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80} de arena molida.....	25
3.1.4 Densidad.....	26
3.2 Caracterización cualitativa y cuantitativa del mineral.	27
3.2.1 Florescencia de rayos X (FRX).....	27
3.2.2 Difracción de rayos X (DRX)	27
3.2.3 Espectrometría de absorción atómica (EAA).....	27
3.3 Cuantificación de cianuro libre por volumetría en soluciones sintéticas.....	27
3.3.1 Determinación de cianuro libre en soluciones sintéticas.	31
3.3.2 Espectrometría de UV-Vis.	33
3.4 Prueba exploratoria de lixiviación del mineral.	34
3.4.1 Determinación de cianuro libre en solución preñada.	34
Capítulo IV. Resultados y discusión	35
4.1 Caracterización física del mineral.....	35
4.1.1 Distribución de tamaño de partícula y D_{80} del mineral de cabeza.....	35
4.1.2 Distribución de tamaño de partícula y D_{80} de arena molida.	36



4.1.3 Densidad.....	38
4.2 Caracterización instrumental.	39
4.2.1 Florescencia de rayos X.	39
4.2.2 Difracción de rayos X.	40
4.2.3 Cuantificación de Au por espectrometría de absorción atómica.....	41
4.3 Análisis termodinámico de las reacciones de cianuración.....	42
4.4 Cuantificación de cianuro libre en soluciones sintéticas por vía húmeda.	42
4.4.1 Dominio de la técnica para determinar el cianuro libre (CN ⁻) en soluciones.	42
4.4.2 Orden de cianicidas en el mineral.	43
4.4.3 Soluciones unitarias.....	43
4.4.4 Soluciones binarias.....	47
4.4.5 Identificación de los complejos CN-metal por la técnica de UV-Vis.	50
4.4.6 Solución con todos los elementos.	53
4.5 Prueba exploratoria de lixiviación del mineral.	53
4.5.1 Lixiviación de Au.....	54
4.5.2 Lixiviación de Fe.....	55
4.5.3 Lixiviación de Mg.	56
4.5.4 Lixiviación de Ca.	58
4.5.5 Lixiviación de Cu.	60
Capitulo V. Conclusiones.....	63
Referencias.....	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Resina de intercambio iónico [16].	14
Figura 2.2. Formación de HCN en función del pH [4].	18
Figura 2.3. Curva de disolución de oro con y sin preoxidación de ozono [22].	19
Figura 2.4. Representación esquemática de la corrosión local de la superficie de una celda de Au en contacto con una solución que contiene O ₂ y CN [23].	21
Figura 2.5. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata [4].	22
Figura 3.1. Diagrama representativo del procedimiento experimental de las etapas: a) 1, b) 2 y c) 3.	24
Figura 3.2. a) Picnómetro de agua, b) Equipo utilizado de picnómetro de helio.	26
Figura 3.3. Equipos utilizados en la caracterización fisicoquímica. a) Fluorescencia de rayos X, b) Difracción de rayos X y c) Espectroscopía de absorción atómica de flama.	27
Figura 3.4. Esquema del proceso de volumetría para cuantificación de cianuro libre.	31
Figura 3.5. Representación de la solución sintética unitaria que contiene un porcentaje de cianuro y 50 ppm de un elemento cianicida (Au, Fe, Cu, Ca y Mg).	32
Figura 3.6. Representación de la solución sintética binaria que contiene: 50 ppm de Au, un elemento cianicida en cantidad proporcional a su concentración en el mineral y porcentaje de cianuro calculado de soluciones unitarias para cada elemento.	33
Figura 3.7. Equipo de UV-Vis utilizado para identificar los complejos metálicos formados de las reacciones metal-cianuro en las soluciones unitarias.	34
Figura 4.1 Distribución de tamaño de partícula del mineral de cabeza (MC). Diámetros obtenidos por la técnica de tamizado.	35
Figura 4.2. Gráfica para determinar el D ₈₀ por técnica de tamizado de mineral de cabeza (MC).	36
Figura 4.3. Distribución de tamaño de partícula de arena molida (AM). Diámetros obtenidos por la técnica de tamizado.	37
Figura 4.4. Gráfica para determinar el D ₈₀ por técnica de tamizado de arena molida (AM).	37
Figura 4.5. Determinación gráfica del D ₈₀ final por método láser. Mineral pulverizado.	38

Figura 4.6. Difractograma del mineral de cabeza-MC. Simbología: A-ortoclasa; C-cuarzo; F-óxido de hierro; O-óxido de aluminio magnesio.	41
Figura 4.7. Curvas de calibración para la cuantificación volumétrica de cianuro libre; a) Sin aplicar factor de dilución, b) Con factor de dilución 1:10.....	43
Figura 4.8. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Au}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Au}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$	44
Figura 4.9. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Cu}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Cu}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$	44
Figura 4.10. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Fe}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Fe}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$	45
Figura 4.11. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Mg}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Mg}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$	46
Figura 4.12. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Ca}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Ca}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$	46
Figura 4.13. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN^-) en la solución binaria Au-Cu, con diferentes relaciones Cu-Au/ $\text{CN}_{\text{adicionado}}$. $[\text{Au}] = 50 \text{ ppm}$; $[\text{Cu}] = 200 \text{ ppm}$	48
Figura 4.14. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN^-) en la solución binaria Au-Fe, con diferentes relaciones Fe-Au/ $\text{CN}_{\text{adicionado}}$. $[\text{Au}] = 50 \text{ ppm}$; $[\text{Fe}] = 300 \text{ ppm}$	48
Figura 4.15. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN^-) en la solución binaria Au-Mg, con diferentes relaciones Mg-Au/ $\text{CN}_{\text{adicionado}}$. $[\text{Au}] = 50 \text{ ppm}$; $[\text{Mg}] = 200 \text{ ppm}$	49
Figura 4.16. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN^-) en la solución binaria Au-Ca, con diferentes relaciones Ca/ $\text{CN}_{\text{adicionado}}$. $[\text{Au}] = 50 \text{ ppm}$; $[\text{Ca}] = 250 \text{ ppm}$	49
Figura 4.17. Resultados de cuantificación de CN^- libre para todas las relaciones $\text{Me}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ en soluciones unitarias y binarias.	50
Figura 4.18. Espectros de UV-VIS de las especies a) Mg-CN, b) Fe-CN, c) Cu-CN, d) Ca-CN y e) Au-CN.	52
Figura 4.19. Concentración de Au en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.	55
Figura 4.20. Concentración de Fe en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.	56



Figura 4.21. Concentración de Mg en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.	57
Figura 4.22. Diagrama de Pourbaix del Mg en H ₂ O pura [33].	57
Figura 4.23. Concentración de Ca en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.	59
Figura 4.24. Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema calcio-agua, a 25°C [33].	59
Figura 4.25. Concentración de Cu en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.	61



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Análisis elemental de AM por FRX.	40
Tabla 4.2. Análisis de absorción atómica para la cuantificación de oro de AM.	41
Tabla 4.3. Relación Metal/ $CN_{adicionado}$ y las energías libres de las reacciones (2) a (6) de los metales cianicidas.	47
Tabla 4.4. CN total adicionado calculado y CN^- determinado por volumetría.....	53
Tabla 4.5. Porcentaje de CN adicionado para la lixiviación, CN^- resultante.	54
Tabla 4.6. Concentración de Au en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).	55
Tabla 4.7. Concentración de Fe en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).56	
Tabla 4.8. Concentración de Mg en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).	58
Tabla 4.9. Concentración de Ca en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).	60
Tabla 4.10. Concentración de Cu en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).	61

Tabla de simbología

Símbolo / abreviatura	Descripción	Símbolo / abreviatura	Descripción
Ca	Calcio	pH	Potencial de hidrogeno
mg	Magnesio	FRX	Fluorescencia de rayos X
fe	Hierro	EAA	Espectroscopia de absorción atómica
cu	Cobre	DRX	Difracción de rayos X
au	Oro	UV-Vis	Espectroscopía de luz visible
o ₂	Dioxígeno	D ₈₀	Diámetro equivalente 80
e ⁻	Electrón	MC	Mineral de cabeza
h ₂ O	Agua	AM	Arena molida
Ca(OH) ₂	Hidróxido de calcio	Wmuestra	Peso muestra mineral
CN _{adicionado}	Cianuro adicionado	Wpa	Peso picnómetro más agua
CN	Cianuro	Wpam	Peso picnómetro más agua más mineral
NaCN	Cianuro de sodio	ρ _r	Densidad relativa
HCN	Acido cianhídrico	PM	Peso molecular
(Au(CN) ₂) ⁻	Cianato de oro	V AgNO ₃ adicionado	Volumen de solución de nitrato de plata consumido
Ca(CN) ₂ ⁻	Cianato de calcio	V inicial	Volumen inicial total
Cu(CN) ₂ ⁻	Cianato de cobre	V de alícuota	Volumen al que se prepara la alícuota
Mg(CN) ₂ ⁻	Cianato de magnesio	F.D.	Factor de dilución
Fe(CN) ₆ ⁻	Cianato de hierro	% W/W	Porcentaje en peso
SiO ₂	Cuarzo	R ²	Coefficiente de correlación
KAlSi ₃ O ₈	Ortoclase	Me	Metal
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro. Hematita	g/ton	Gramos por tonelada
Al ₂ MgO ₄	óxido de aluminio-magnesio	kJ/mol	Kilojulios por mil
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnesio	g/cm ³	Gramos por centímetro cubico
CaCO ₃	Carbonato de calcio	g/l	Gramos por litro
AgNO ₃	Nitrato de plata	ppm	Parte por millón
NaOH	Hidróxido de sodio	nm	Nanómetros
KI	Yoduro de potasio	μm	Micrómetros
NaOH	Hidróxido de sodio	CN _{adicionado}	Cianuro adicionado

RESUMEN

La cianuración es un método de lixiviación ampliamente empleado para la disolución de oro contenido en minerales auríferos, formando complejos solubles de cianuro de oro. Esta técnica es preferida por su alta eficiencia en la recuperación de oro que se encuentra en el mineral en tamaños menores a 75 μm ; sin embargo, las especies cianicidas diferentes al oro consumen cianuro y reducen su disponibilidad para la lixiviación del oro, disminuyendo la recuperación del mismo. Se ha observado que la sobresaturación de cianuro en la solución lixivante ocasiona bajos niveles de disolución de oro, posiblemente por la falta de oxígeno en el sistema y por el fenómeno de pasivación del cianuro.

En este trabajo de investigación se establece la relación $[\text{Me}]/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ que asegura la máxima disolución de las especies cianicidas contenidas en soluciones sintéticas y cuyas concentraciones se basan en el análisis químico de un mineral aurífero proveniente de la región de Nocupétaro, Michoacán. Se establece la importancia del dominio de la técnica de cuantificación del CN libre en solución para determinar correctamente la relación $[\text{Me}]/\text{CN}_{\text{adicionado}}$.

Del análisis termodinámico del sistema el orden de cianuración de los componentes minerales es $\text{Ca} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Au}$. De los resultados experimentales la tendencia cianicida cambió a $\text{Cu} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Mg}$; este cambio se atribuye a la formación de ciertos complejos como carbonatos o hidróxidos, que tienen diferente afinidad por el cianuro.

Del análisis estadístico de los resultados experimentales se propuso una ecuación de correlación que calcula la cantidad necesaria de cianuro que se debe adicionar para asegurar la cianuración de al menos el 70 % del oro contenido en el sistema de reacción, conociendo las concentraciones de los elementos cianicidas.

Finalmente se propone un procedimiento apropiado de lixiviación con cianuro para un mineral aurífero, viable para su aplicación a nivel planta.

Palabras clave: Lixiviación, Cianuración, Cianicidas, Cianuro libre, mineral aurífero.

ABSTRACT

Cyanidation is a leaching method widely used to dissolve gold contained in gold-bearing ores, forming soluble gold cyanide complexes. This technique is preferred for its high efficiency in recovering gold found in the ore in sizes smaller than 75 μm ; however, cyanicidal species other than gold consume cyanide and reduce its availability for gold leaching, decreasing gold recovery. On the other hand, it has been observed that cyanide oversaturation in the leaching solution causes low levels of gold dissolution, possibly due to the lack of oxygen in the system and the phenomenon of cyanide passivation.

This research work establishes the $[\text{Me}]/\text{CN}_{\text{added}}$ ratio that ensures maximum dissolution of the cyanicidal species contained in synthetic solutions and whose concentrations are based on the chemical analysis of a gold-bearing mineral from the Nocupétaro region in Michoacán, México. The importance of mastering the technique of quantifying free CN in solution is established to correctly determine the $[\text{Me}]/\text{added CN}$ ratio.

From the thermodynamic analysis of the system, the cyanidation order of the mineral components is $\text{Ca} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Au}$. From the experimental results, the cyanuric tendency changed to $\text{Cu} \rightarrow \text{Au} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Ca} \rightarrow \text{Mg}$; this change is attributed to the formation of certain complexes such as carbonates or hydroxides, which observe different affinities for cyanide.

From the statistical analysis of the experimental results, a correlation equation is proposed that calculates the necessary amount of cyanide that must be added to ensure the cyanidation of at least 70 % of the gold contained in the reaction system, knowing the concentrations of the cyanicidal elements.

Finally, a suitable cyanide leaching procedure for a gold-bearing mineral is proposed, suitable for plant-based application.

Keywords: Leaching, Cyanidation, Cyanicides, Free cyanide, Gold ore.



CAPÍTULO I.

INTRODUCCIÓN

La minería, a lo largo de la historia en México, ha sido un motor fundamental para el desarrollo de diversas industrias, generando beneficios sociales como infraestructura, tecnología, electrificación y empleo; sin embargo, esta actividad también conlleva retos ambientales significativos, con áreas mineras abandonadas que requieren atención. La colaboración actual entre el sector minero y diversas entidades gubernamentales busca optimizar el uso de recursos naturales y energéticos, mitigando el impacto ambiental de las operaciones mineras [1]. En la búsqueda constante de métodos eficientes para la recuperación de metales preciosos a partir de minerales, la lixiviación con cianuro ha desempeñado un papel fundamental en la industria minera. Su amplia aplicación se debe a su bajo costo y alto rendimiento en la extracción de estos metales valiosos, aunque por otra parte esta metodología no está exenta de controversia debido a los riesgos medioambientales que implica. La generación de compuestos de cianuro durante el proceso de lixiviación plantea desafíos significativos en términos de toxicidad para la flora, fauna y la contaminación del suelo. En particular, la obtención de oro a partir de minerales o concentrados minerales depende de diversos factores, como la concentración de oro en la mena, el tamaño de las partículas de oro y la presencia de cianicidas en el mineral. Este último aspecto es especialmente crucial cuando se aplica el proceso de cianuración ya que la cantidad necesaria de cianuro varía en función del número de cianicidas presentes en el mineral. De acuerdo a la literatura, cuando la cantidad de cianuro adicionado es menor a la requerida para la disolución de las especies auríferas contenidas en el mineral, no se lixiviará el total de oro; en el caso de la saturación con cianuro en la solución lixivante, el cianuro se pasivará químicamente y tampoco disolverá las especies auríferas; lo anterior, afecta en gran medida la recuperación posterior del oro [2, 3]. En cuanto al efecto del oxígeno en el proceso de lixiviación, éste favorece la reacción al permitir la formación de complejos de cianuro de metal, facilitando la disolución del oro [4].

Este trabajo de investigación, se enfoca en la optimización de la etapa de lixiviación por cianuración de un mineral de la región de Nocupétaro, Michoacán, al establecer la concentración adecuada de cianuro en la solución lixivante, que asegure la disolución al

menos del 70 % del oro contenido en el mineral, considerando también la importancia de otras variables del sistema como el tamaño de partícula y pH; de lo anterior, el objetivo principal de este proyecto radica en proponer un procedimiento que establezca la relación entre la cantidad adecuada de cianuro que se deberá adicionar para la lixiviación de las especies de oro y de los cianicidas, contenidas en un sistema de reacción, partiendo de soluciones sintéticas, para después aplicarla en cualquier mineral aurífero.

Se entiende que, al utilizar solamente la concentración adecuada de cianuro, se disuelve el máximo de oro, y se reduce al mínimo la contaminación de suelos y mantos freáticos; este hecho, es otra aportación del proyecto.

Para alcanzar el objetivo general se emplearon técnicas analíticas avanzadas, como la espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer el contenido de los elementos cianicidas en el mineral, la espectroscopía de absorción atómica (EAA) para cuantificar el contenido de oro en las soluciones preñadas y residuales, la espectroscopía de luz visible (UV-Vis) para identificar los complejos formados en soluciones sintéticas, así como la aplicación y dominio de la técnica de volumetría para cuantificar el cianuro libre tanto en soluciones sintéticas como en las en las soluciones preñadas. A través de este enfoque integral de investigación, se espera contribuir al avance en la tecnología de extracción de oro y, al mismo tiempo, abordar las preocupaciones medioambientales asociadas con la cianuración en la industria minera.

1.1 JUSTIFICACIÓN

El municipio de Nocupétaro, Michoacán, clasificado como de alta vulnerabilidad social en 2020, se convierte en un escenario clave para la implementación de proyectos mineros que promuevan el desarrollo sustentable. La minería reconoce que este enfoque es esencial para conciliar el crecimiento económico con el bienestar de las comunidades locales, ofreciendo empleo, vivienda, educación, salud y servicios para mejorar la calidad de vida.

Por otra parte, la recuperación eficiente del oro a través de la vía de lixiviación no ha sido suficientemente explorada durante la etapa de disolución de minerales auríferos mediante el uso de cianuro. Esto se traduce en procesos de lixiviación deficientes para las especies

auríferas que reportan leyes elevadas de oro en las colas o jales. Este inconveniente surge principalmente debido a la elevada concentración de cianuro presente en la solución lixiviante, lo que conduce a la pasivación del cianuro, impidiendo la lixiviación completa de todas las especies auríferas.

En este contexto, el presente proyecto se centró específicamente en la disolución de al menos el 70 % de las especies auríferas contenidas en el mineral proveniente de un yacimiento de la región mencionada, por medio del control de la adición de cianuro conforme a su contenido de cianicidas para de esta manera evitar prácticas ineficientes y riesgos ambientales considerables. Los resultados obtenidos no solo contribuyen a optimizar el proceso de recuperación, sino que también servirán como base para futuras investigaciones y aplicaciones a mayor escala por parte de empresas, generando un impacto económico positivo en la región a mediano plazo.

Este proyecto no solo busca maximizar la eficiencia en la recuperación de oro, sino que también está alineado con los principios de desarrollo sustentable, garantizando que las actividades mineras beneficien a la comunidad local y minimicen su impacto ambiental. La implementación exitosa de este proyecto podría servir como un modelo para iniciativas similares en otras zonas con características socioeconómicas y ambientales comparables.

1.2 HIPÓTESIS

La eficiencia de la disolución del oro en minerales en lixiviación por cianuración, está influenciada por la concentración de cianuro, así como la presencia de especies cianicidas, el pH y tamaño de partícula. Estos elementos pueden reducir la recuperación del metal al generar condiciones que dificultan la lixiviación, dejando oro sin disolver.

Estos desafíos se superan al controlar la concentración de cianuro en la solución lixiviante, considerando la presencia de cianicidas en el mineral. Este control evita la pasivación del cianuro y garantiza la presencia adecuada de reactivo lixiviante para disolver las especies cianicidas, incluido el oro.

1.3 OBJETIVOS:

1.3.1 Objetivo general.

Garantizar la lixiviación de especies auríferas de un mineral, al establecer la relación adecuada entre las concentraciones de cianuro y las especies cianicidas en una solución sintética.

El objetivo general se alcanzará al cumplir con los siguientes:

1.3.2 Objetivos específicos.

- Caracterizar química y físicamente el mineral del yacimiento.
- Dominio y aplicación de la técnica de volumetría para cuantificación de cianuro residual o libre.
- Establecer la relación entre concentraciones de reactivo de cianuro y cianicidas en soluciones sintéticas.
- Aplicar el procedimiento de cianuración de oro a un mineral mediante una prueba exploratoria con él % de cianuro calculado de las soluciones sintéticas.

1.4 Metas Científicas y Tecnológicas.

- Lixiviar al menos el 70 % del oro contenido en un mineral.
- Proponer un procedimiento de lixiviación para un mineral aurífero, que sea factible de aplicarse en planta.
- Disminuir la contaminación del suelo y de los mantos freáticos por el consumo excesivo de cianuro durante la lixiviación.

CAPITULO II

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterización física y química del mineral.

A continuación, se describen cada una de las etapas que son requeridas para la caracterización tanto física como química del mineral.

2.2 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80} .

El procesamiento de minerales inicia con la caracterización química y física de las rocas extraídas del yacimiento, dichas rocas están compuestas por distintas especies minerales por lo que es necesario realizar la liberación (tamaño de partícula en el cual las especies de valor están libres físicamente) a través de la molienda, como etapa necesaria antes de la operación de recuperación. La liberación incide directamente en la eficiencia del proceso, debido a que las especies minerales deben estar completamente expuestas o libres para facilitar su posterior separación [5].

La molienda en general consiste en una variedad de etapas consecutivas que a continuación se describen:

- Primaria: trituración con trituradoras de quijada.
- Secundaria: molienda con molinos de bolas, barras o martillos.
- Terciaria: pulverización con molinos de discos o de bolas.

Después del proceso de molienda se realiza un monitoreo para determinar la distribución de tamaño de partícula, con el cual se controla el proceso y se determina el D_{80} , el cual representa el 80 % de las partículas del mineral, menor a un diámetro determinado (80 % de partículas que pasan a través de determinada malla). La elección del D_{80} se sustenta en la garantía de que, con este diámetro y porcentaje, las partículas están liberadas y será más factible recuperar al menos el 70 % de los elementos deseados, un requisito habitual en los procesos de recuperación aplicados en la industria.

2.3 Densidad.

La densidad es una propiedad intensiva que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia, es decir, la cantidad de masa por unidad de volumen, generalmente expresada en g/cm^3 . En el caso de los minerales, este parámetro permite identificar cualitativamente la presencia de metales pesados. Por ejemplo, el oro posee una densidad de 19.3 g/cm^3 , mientras que el mineral mayoritario (arcillas) en los yacimientos auríferos suele presentar una densidad alrededor de 2.33 g/cm^3 . En consecuencia, si el material mineral estudiado exhibe una densidad superior a la de las arcillas, puede inferirse la presencia de fases minerales o metales de mayor densidad [6].

2.4 Caracterización cualitativa y cuantitativa del mineral.

De la distribución acumulada de tamaño de partícula se obtiene la información que indica el diámetro equivalente de partícula que en determinado porcentaje (por ejemplo, D_{80}), es menor a cierto tamaño; por ejemplo, si el D_{80} es de 100 micrómetros, significa que el 80% de las partículas procesadas son menores a ese diámetro equivalente.

Los minerales se analizan cualitativa y cuantitativamente para tener certeza de las especies presentes en el mineral, así como su composición química elemental, las técnicas utilizadas son:

- a) Fluorescencia de Rayos X (FRX): determina semi-cuantitativamente la composición química de la muestra mineral. La información que reporta es en forma de óxidos, sulfuros o elemental.
- b) Difracción de Rayos X (DRX): permite la identificación de especies minerales de acuerdo a la indexación de los difractogramas resultados del análisis.

Una vez identificados los elementos en el mineral se procede a la digestión de la muestra y se cuantifican los elementos de interés presentes en baja concentración (en partes por millón) por medio de la técnica de:

- c) Espectrometría de Absorción Atómica (EAA): permite obtener datos cuantitativos de analitos que se encuentran en mg/l [ppm], además es una técnica muy versátil por la cantidad de elementos que permite detectar.
- d) Espectrometría por UV-Vis: mediante esta técnica se procesan muestras líquidas para determinar la concentración o presencia de analitos. En este trabajo se analizaron las soluciones residuales de la lixiviación para identificar los compuestos iónicos formados durante la cianuración.

2.5 Proceso general para la extracción de oro.

La recuperación de oro generalmente se lleva a cabo en seis pasos, que inician con la etapa de exploración del yacimiento mineral [7]:

1. Exploración: identificación de zonas económicamente viables para la explotación de minerales mediante satélites y análisis geológicos.
2. Minado: extracción del material que contenga oro. Incluye perforación, colocación de explosivos, voladura y fragmentación de la roca.
3. Acarreo: transporte del material fragmentado desde el tajo hasta la pila de lixiviación mediante maquinaria.
4. Lixiviación por cianuración: disolución selectiva de especies auríferas, mediante soluciones cianuradas. El producto es la solución “preñada”.
5. Recuperación de oro: la solución rica pasa por un proceso, generalmente Merrill-Crowe, donde se precipita el oro al adicionar polvo de zinc. El oro sólido se separa de la solución residual mediante filtros prensa.
6. Refinación: el oro obtenido en el proceso Merrill-Crowe se seca y funde, produciendo el producto final, las barras de Doré.

Este proyecto de investigación incluye solo la etapa 4, donde se realizan los cálculos pertinentes para relacionar la eficiencia en la disolución de oro y el consumo de cianuro, dependiendo de la cantidad de cianicidas contenidos en el mineral.

2.6 Lixiviación de oro.

La lixiviación de oro es un proceso metalúrgico en el cual se disuelve el oro contenido en minerales auríferos mediante el uso de sustancias químicas, como el cianuro de sodio. La solución resultante, rica en oro, se separa luego para recuperar el metal precioso [8]. Este proceso constituye uno de los métodos más ampliamente utilizados en la industria para la recuperación de oro, diferenciándose principalmente por el tipo de agente complejante empleado. En el apartado siguiente se describen los reactivos más utilizados en los procesos de extracción de oro.

2.6.1 Agentes lixiviantes del oro.

Además del agente lixiviante de cianuro, existen otros complejantes que a continuación se describen:

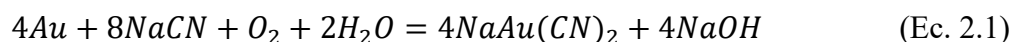
- **Cianuro.** El cianuro de sodio ha sido el reactivo de lixiviación preponderante para el oro, debido a su excelente extracción de una gran variedad de menas y su bajo costo. Si bien el cianuro es un lixiviante poderoso para oro y plata, no es selectivo y forma compuestos complejos con una variedad de iones metálicos y minerales [9].

La lixiviación por cianuro dicho de otra manera “cianuración”, es un proceso crucial en la extracción de oro, que requiere condiciones específicas y concentraciones adecuadas de cianuro libre en la solución. Para optimizar este proceso, es esencial mantener un pH dentro de un rango específico, utilizar oxígeno (el cual se encuentra en el aire) como oxidante y controlar la concentración de cianuro en la solución.

En términos de pH, valores por debajo de 10 pueden ser problemáticos, ya que el cianuro se hidroliza, aumentando el consumo y generando gases altamente tóxicos, como el HCN. Por otro lado, en valores de pH superiores a 12, la velocidad de cianuración se inhibe. Por lo tanto, se recomienda un rango de pH entre 10.5 y 11.5 para mantener condiciones óptimas.

En cuanto a la concentración de cianuro libre, se sugiere que los valores ideales oscilen entre 0.05% y 0.1% en peso. Concentraciones muy bajas, como 0.001% o menos, resultan ineficaces en la disolución del oro. Por otro lado, concentraciones elevadas, superiores al 0.25%, pueden llevar a la pasivación del oro debido a

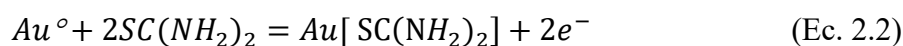
reacciones colaterales con otros elementos, lo que resulta en la formación de películas sobre las partículas de metal [8]. La ecuación fundamental de la cianuración es:



- **Tiourea.** La lixiviación con tiourea en minerales de oro fue inicialmente propuesta como una alternativa a la cianuración. Este método implica la formación de complejos catiónicos estables en la solución, ofreciendo una vía diferente para disolver el oro contenido en minerales.

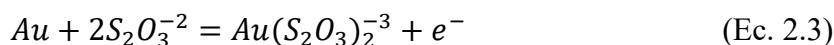
Aunque la reacción de lixiviación con tiourea es rápida y puede lograr extracciones de oro de hasta el 99%, este enfoque también presenta desventajas significativas. La principal desventaja radica en los costos elevados de los reactivos, que se deben al alto consumo tanto de tiourea como de ácido. Estos costos pueden hacer que la lixiviación con tiourea sea menos económicamente viable en comparación con la cianuración.

A pesar de las desventajas económicas, la lixiviación con tiourea ha sido objeto de investigación continua, ya que ofrece una alternativa menos tóxica al uso de cianuro y puede ser especialmente relevante en situaciones donde la toxicidad del cianuro es una preocupación ambiental. Sin embargo, la búsqueda de formas más rentables de utilizar la tiourea y optimizar el proceso sigue siendo un área activa de investigación en la industria de la extracción de oro [7]. La reacción general para este proceso es la siguiente:



- **Tiosulfato.** La limitación principal del tiosulfato radica en su aplicabilidad, ya que la mayoría de las pruebas se han realizado en minerales tipo carbonáceos. Al igual que la tiourea, la reacción de lixiviación con tiosulfato es altamente sensible al potencial de pH y Redox. El tiosulfato es metaestable y se descompone fácilmente a sulfato por especies de oxígeno-azufre, lo que hace que su reutilización sea poco probable. Aunque la oxidación a sulfato es posible, resulta costosa debido a la alta demanda química de oxígeno. El tiosulfato se utiliza como alternativa en regiones con

regulaciones ambientales restrictivas sobre el uso de cianuro o cuando los minerales consumen grandes cantidades de cianuro. El rango de pH de operación varía entre 8 y 11 [8]. La reacción general se expresa de la siguiente forma:



- **Tiocianato.** Durante mucho tiempo, se ha reconocido que el tiocianato actúa como un lixivante del oro en soluciones ácidas. En estas soluciones, el oro disuelto forma complejos Au^{1+} y Au^{3+} , dependiendo del potencial de la solución. La reacción implica la oxidación del tiocianato por el ion Fe^{3+} , que actúa como el oxidante más adecuado para la cinética de disolución del oro. La presencia de Fe^{3+} aumenta la estabilidad del ion tiocianato, formando compuestos como $Fe(SCN)_n(3-n)$, donde n varía de 1 a 5. Aunque la solución ácida de tiocianato muestra promesas como un lixivante alternativo para el oro, se necesita más investigación para optimizar las condiciones. Esto incluye la minimización del consumo de tiocianato y el desarrollo de un método efectivo para la recuperación de las aguas resultantes de la lixiviación del oro. Estos aspectos son esenciales para hacer que el proceso sea más eficiente y económicamente viable como método de extracción de oro [8]. A continuación, se muestra la reacción del compuesto de tiocianato de oro:



2.6.2 Técnicas de cuantificación de cianuro.

En el presente trabajo de investigación se empleará el reactivo cianuro, por lo que es importante conocer las técnicas más utilizadas para la cuantificación del cianuro libre. Existen diversos métodos analíticos para determinar la concentración de cianuro libre en solución; la selección de la técnica adecuada depende, en general, de factores como la claridad de la muestra, la precisión requerida, la presencia de especies que puedan interferir en la medición y el tipo de cianuro presente. Entre las técnicas más utilizadas empleadas destacan la titulación volumétrica y el uso de electrodos selectivos para cianuro libre, así

como la destilación en el caso de la determinación de cianuro total, las cuales se describen a continuación. Existen distintas técnicas para cuantificar el cianuro libre presente en una solución, la técnica que se elija generalmente depende de la claridad de la solución, la precisión necesaria, la presencia de sustancias que puedan interferir la concentración y el tipo de cianuro. Destacando las técnicas más comunes son la titulación (volumetría) y el electrodo específico para cianuro libre, así como la destilación para cianuro total, las cuales se expresan a continuación:

- **Cianuro libre por volumetría.**

Es un método para la determinación de cianuro libre en soluciones con concentraciones mayores a 5 mg/L. El método se basa en la reacción del nitrato de plata con el ión cianuro en una solución alcalina, formando un complejo soluble ($\text{Ag}(\text{CN})_2^-$). Cuando todo el cianuro se ha consumido, el exceso de plata precipita como AgCN o reacciona con un indicador (generalmente KI) para formar AgI . El punto final de la titulación se determina por la aparición de una turbidez permanente, ya sea blanca o amarillo opalescente. Como en todas las técnicas de volumetría, se recomienda realizar la titulación tres veces y sacar un promedio del resultado [10].

- **Cianuro libre por electrodo específico de cianuro.**

El método descrito en Standard Methods 4500-CN-F [11] y ASTM D-2036-91 [12], se utiliza para analizar concentraciones bajas de cianuro (en un rango de 0,05 a 10 mg/l). Emplea un electrodo con membrana de sulfuro de plata y yoduro de plata que reacciona con el cianuro, liberando yoduro detectado por el electrodo. Se requiere una curva de calibración para relacionar concentración y voltaje del potenciómetro. El electrodo detecta todo el cianuro libre y complejos con menor estabilidad que el cianuro de plata, excluyendo ciertos metales. Factores como dureza del agua, iones comunes, y temperatura son controlados. Sin embargo, la presencia de ciertos iones puede afectar los resultados, y se recomienda mantener el mismo pH y temperatura en estándares y muestras. La matriz de la solución también puede influir, y se aconseja limpiar el electrodo para evitar contaminación [10].

- **Cianuro total por destilación.**

El método descrito en Standard Methods 4500-CN-C [11] y ASTM D 2036-91 [12], se utiliza para cuantificar el cianuro libre, cianuros simples y la mayoría de los complejos metálicos de cianuro, excluyendo oro, platino y cobalto. Utiliza destilación ácida a reflujo con cloruro de magnesio como catalizador para descomponer los complejos metálicos. La destilación ácida genera ácido cianhídrico, que se cuantifica en una solución alcalina. El límite de detección es de 0,005 mg/l. Sin embargo, el método puede ser afectado por interferencias de elementos en la solución, especialmente tiocianato, especies de azufre, agentes oxidantes y nitritos. Se ha observado que la presencia de tiocianato en la muestra puede causar errores en la cuantificación, y se sugiere el uso de ácido fosfórico en lugar de sulfúrico para reducir este error. La relación entre la concentración de cianuro y la de metales en la solución es crucial, y se muestra que la recuperación de cianuro por destilación se mantiene alta incluso al aumentar la concentración de cianuro, manteniendo constantes los niveles de metales [10].

2.6.3 Recuperación del oro sólido a partir de la solución preñada.

El presente proyecto no contempla, hasta esta etapa, los procesos de recuperación de oro; Sin embargo, resulta pertinente mencionarlos, ya que constituyen los métodos empleados de manera posterior al proceso de lixiviación por cianuración del oro.

- **Carbón activado:**

Correcta Aplicación de Carbón Activado en la Recuperación de Oro en la Minería:

La eliminación efectiva del cianuro de la solución es esencial, y una herramienta comúnmente utilizada para este propósito es el carbón activado (CA). El CA puede adoptar la forma de gránulos o pellets, adaptándose a las dimensiones de la operación minera y a los parámetros medioambientales específicos. En la industria minera, el carbón activado se emplea con frecuencia para la recuperación del oro presente en soluciones de lixiviación con cianuro, tanto en forma de gránulos como en otras aplicaciones, como la recuperación de oro refractario. El carbón activado, por su naturaleza porosa, tiene la capacidad de adsorber iones metálicos y ácidos. Cuando se expone a contaminantes, actúa como un imán, atrayendo y concentrando los contaminantes dentro de sus poros, eliminándolos eficazmente de la solución

mediante el proceso de "adsorción". En el proceso, la solución que contiene oro fluye a través de columnas llenas de partículas de carbón activado, donde los gránulos adsorben el oro. Posteriormente, el carbón activado puede regenerarse mediante calentamiento en un horno y la exposición a aire fresco, liberando los metales adsorbidos y haciéndolos disponibles para su uso futuro. Tras la carga y adsorción, el carbón cargado se retira y se lava, permitiendo que el oro se eluya en una solución de agua. Este proceso de regeneración y elución del oro demuestra la eficacia del carbón activado en la recuperación del oro en la minería [13].

- **Resinas de intercambio iónico:**

El proceso de recuperación de oro a través de intercambio iónico desde soluciones cianuradas implica una serie de pasos especializados que aprovechan las propiedades de los iones presentes en la solución. Aquí se explica el proceso de manera general:

La solución cianurada se pone en contacto con resinas de intercambio iónico específicas diseñadas para adsorber metales preciosos, como el oro. Estas resinas contienen grupos funcionales que tienen afinidad por los iones de oro presentes en la solución. Durante el contacto con las resinas, los iones de oro en la solución cianurada son atrapados por las resinas de intercambio iónico. Este proceso se conoce como adsorción, donde los iones de oro se adhieren a los sitios activos en la superficie de las resinas [14]. Una vez que las resinas han adsorbido una cantidad significativa de oro, se procede a la elución. Este paso implica pasar una solución eluyente a través de las resinas cargadas de oro. La solución eluyente tiene propiedades que liberan o desprenden los iones de oro de las resinas, creando así una solución rica en oro. Después de la elución, las resinas cargadas se regeneran para su reutilización en el proceso. Este paso generalmente involucra la limpieza de las resinas y la restauración de sus propiedades de intercambio iónico para futuros ciclos de adsorción [15].

El uso de resinas de intercambio iónico en la recuperación de oro ofrece una alternativa eficiente y selectiva para separar el oro de las soluciones cianuradas, minimizando la contaminación cruzada con otros metales y optimizando la eficiencia del proceso de recuperación. Este método es parte de las tecnologías avanzadas utilizadas en la metalurgia extractiva y la minería moderna [16].



Figura 2.1. Resina de intercambio iónico [16].

- **Cementación:**

La cementación es un método utilizado para la recuperación de oro desde soluciones cianuradas, donde el oro disuelto en la solución se convierte en metal sólido mediante la reacción con un metal más reductor. A continuación, se proporciona una explicación detallada del proceso:

Se selecciona un metal más reductor que el oro para iniciar la reacción de cementación pudiendo ser: Mg, Al, Zn, Cu, Au, Ag, Hg, Pb, Fe, Pt, cualquier metal de esta secuencia tenderá a disolverse en solución de cianuro más rápido que el metal de su derecha, desplazándolos a esos metales y precipitándolos. Por ejemplo, el cobre precipitará al Au, Ag, Hg, etc.

El magnesio o el aluminio precipitarán al oro y a la plata más rápido que el zinc, sin embargo, el zinc es el que presenta mayores ventajas económicas y técnicas, constituyéndose de esta manera el método más ampliamente utilizado (reacción de Merrill-Crowe) [17]. El metal precipitante (por ejemplo, zinc en polvo) se agrega a la solución cianurada, y el oro se reduce de forma electroquímica, depositándose en forma sólida sobre el metal. El oro cementado se separa de la solución mediante filtración u otros métodos de separación sólido-líquido. El oro recuperado se lava para eliminar impurezas residuales y se somete a procesos adicionales para obtener un

producto final de alta pureza [15]. El metal precipitante (zinc) puede ser regenerado y reciclado para su uso continuo en el proceso [14].

Este método es parte integral de la tecnología de recuperación de oro y ha sido ampliamente aplicado en diversas operaciones mineras.

- **Electrodeposición:**

La electrodeposición es un procedimiento electroquímico mediante el cual se logra cubrir una pieza con una fina capa de determinado metal. Para lograrlo se sumerge la pieza a cubrir en una solución electrolítica que contiene los iones del metal que formará la capa. La pieza se pondrá en contacto con una fuente de corriente continua y con un electrodo que cumplirá la función de ánodo, cediendo electrones para que los iones metálicos en solución se reduzcan y se depositen sobre la pieza, que cumple la función de cátodo. De esta manera se obtiene el recubrimiento metálico en la pieza. La electrodeposición es uno de los procesos electroquímicos aplicado a nivel industrial, que tiene mayor importancia en cuanto a volumen de producción, y es también uno de los que causan mayor impacto económico, ya que se logra que piezas constituidas por material barato, tengan excelentes características de resistencia a la corrosión, gracias a la capa metálica electrodepositada.

En el método de electro-obtención, el oro disuelto se deposita en el cátodo reduciéndose a oro metálico junto a una evolución de hidrógeno por descomposición del agua, mientras que, en el ánodo, el ion hidroxilo se oxida a agua con evolución de oxígeno [18].

2.7 Reacciones que ocurren durante la lixiviación por cianuración.

En el proceso de cianuración, empleado principalmente para la extracción de oro a partir de sus menas, las reacciones químicas fundamentales involucran al cianuro de sodio en solución acuosa, el cual interactúa tanto con los metales preciosos como con las especies cianicidas presentes en la muestra mineral [4, 19]. A continuación, se presenta una descripción general de las reacciones clave:

- **Reacción general de lixiviación del oro:** el oro presente en el mineral se disuelve en una solución de cianuro de sodio (NaCN) mediante la siguiente reacción [4]:



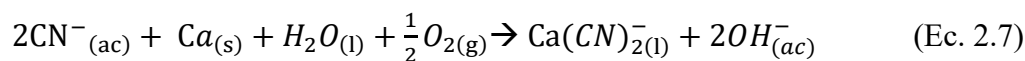
El oro disuelto forma complejos con el cianuro en la solución, principalmente el ion cianuro de oro ($\text{Au}(\text{CN})_2^-$).

- **Consumo de Cianuro:** en presencia de cianicidas, ocurre la reacción general de consumo de cianuro:



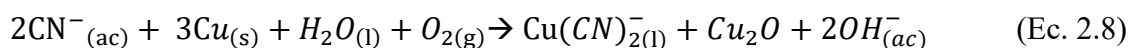
En el caso específico de las reacciones termodinámicas que implican las especies cianicida presentes en el mineral, así como el cianuro de sodio, agua y oxígeno. Las reacciones involucradas son las siguientes:

- **Calcio:**



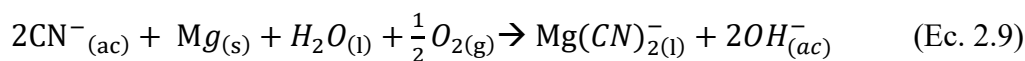
$$\Delta G = -154.81 \text{ kcal/mol}$$

- **Cobre:**



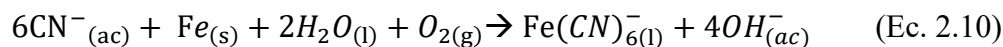
$$\Delta G = -82.19 \text{ kcal/mol}$$

- **Magnesio:**



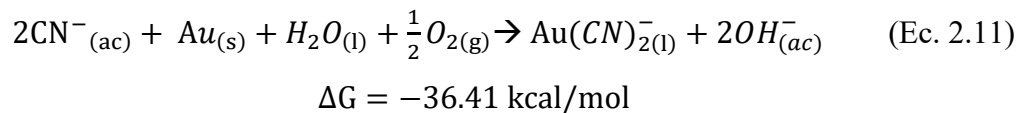
$$\Delta G = -129.9 \text{ kcal/mol}$$

- **Hierro:**

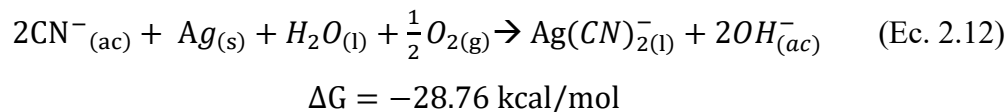


$$\Delta G = -113.52 \text{ kcal/mol}$$

- **Oro:**



- **Plata:**



El cálculo de la energía libre de Gibbs para cada una de estas reacciones es fundamental para determinar el grado de espontaneidad o factibilidad de cada reacción.

2.8 Parámetros Críticos que se deben controlar en el proceso de cianuración.

Para lograr la disolución óptima en el proceso de lixiviación del mineral aurífero mediante cianuración, es esencial tener en cuenta diversas variables. A continuación, se detallan los efectos clave a considerar:

2.8.1 Efecto del pH en el proceso de cianuración.

De acuerdo con el análisis presentado por Marsden y House [4], a valores de pH menores a 9, el cianuro se descompone, liberando gas cianhídrico (HCN), el cual es altamente tóxico. Este comportamiento se muestra a través de la Figura 2.2 y queda representado en la siguiente reacción:



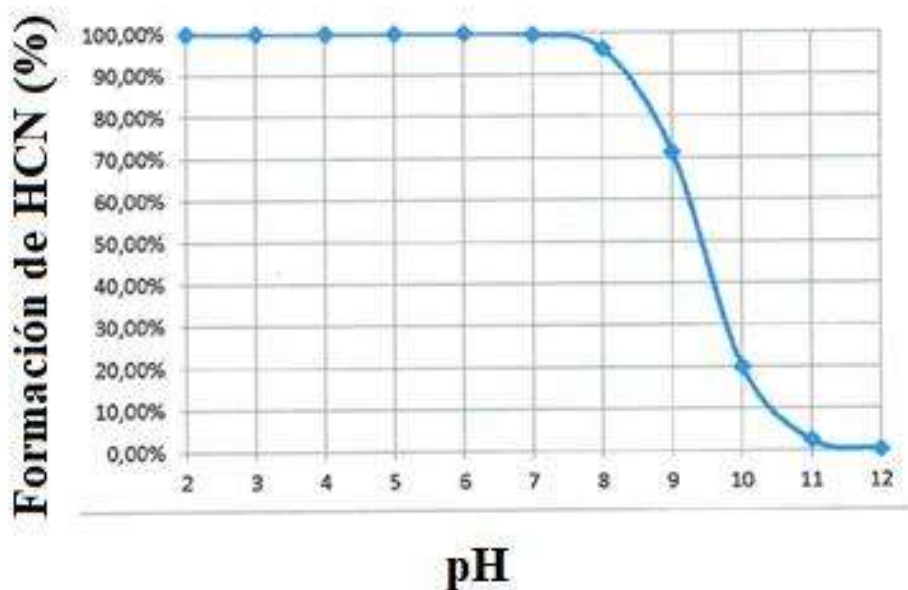
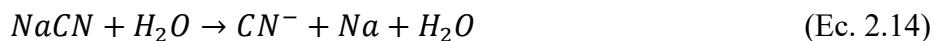


Figura 2.2. Formación de HCN en función del pH [4].

A valores básicos de pH mayores a 10,5, el cianuro de sodio puede descomponerse, liberándose el CN^- , responsable de formar los compuestos de metal de interés como se muestra en la reacción:



Generalmente los tipos de reguladores de pH utilizados son:

- Cal (hidróxido de calcio): La cal se utiliza para elevar el pH en procesos de lixiviación. Agregar cal al sistema ayuda a neutralizar la acidez y mantener un pH alcalino que favorezca la disolución del metal valioso.
 - ✓ Cal viva (óxido de calcio): También conocida como cal rápida, se obtiene al calcinar la piedra caliza a altas temperaturas. La cal viva reacciona rápidamente con el agua para formar hidróxido de calcio. Este tipo de cal puede ser más reactivo, pero su manejo requiere precauciones debido a su naturaleza cáustica [20].

- ✓ Cal apagada (hidróxido de calcio): Es el producto resultante de la reacción de la cal viva con agua. La cal apagada es menos reactiva que la cal viva y suele ser más segura de manejar. Se presenta en forma de polvo o pasta [4].
- Sosa cáustica (hidróxido de sodio): La sosa cáustica puede emplearse para elevar el pH en procesos de lixiviación. Al igual que la cal, actúa como un agente alcalinizante que permite controlar y mantener el pH dentro del rango deseado [21].

2.8.2 Efecto del oxígeno disuelto en el proceso de cianuración.

La reacción de cianuración se ve favorecida en un entorno oxidante, y el oxígeno juega un papel importante en proporcionar esa condición. En la presencia de cianuro, el oxígeno permite la formación de complejos de cianuro de metal, facilitando así la disolución de los metales preciosos como se muestra en la Figura 2.3 [4].

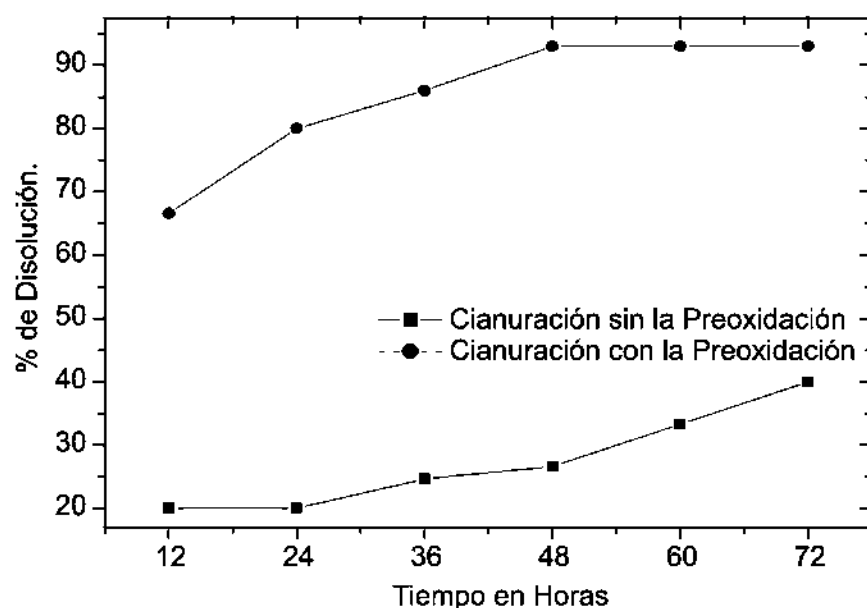


Figura 2.3. Curva de disolución de oro con y sin preoxidación de ozono [22].

En base al análisis realizado por Eleazar-Salinas y col. [22], a medida que se incrementa la concentración de oxígeno, la velocidad de reacción experimenta un aumento, pero este incremento tiene un límite observable en niveles elevados de concentración de oxígeno y agitación. En este punto, el oro puede llegar a pasivarse, resultando en una disminución de su velocidad a un nivel más bajo y constante. Además, la velocidad de transferencia de masa

del oxígeno disminuye a medida que aumenta la densidad de pulpa y disminuye el tamaño 14 de las partículas. El uso de oxígeno o de un agente oxidante se vuelve esencial para la disolución eficiente del oro en condiciones normales de cianuración. Sin embargo, se presenta un desafío al intentar controlar la concentración de oxígeno debido a la baja solubilidad de este gas en el agua en condiciones atmosféricas normales [2].

Por lo anterior, la disolución del metal es un fenómeno corrosivo donde el oxígeno capta electrones en una región de la superficie metálica, conocida como la zona catódica, mientras que el metal libera electrones en otra región, la zona anódica, como se ilustra en la Figura 2.4. Este proceso implica simultáneamente dos reacciones: la reacción de oxidación, que implica la formación de complejos de oro o agentes de cianuro, como se expone en la reacción mostrada [23]:



Y la reacción de reducción de oxígeno en la superficie metálica como indica la reacción:



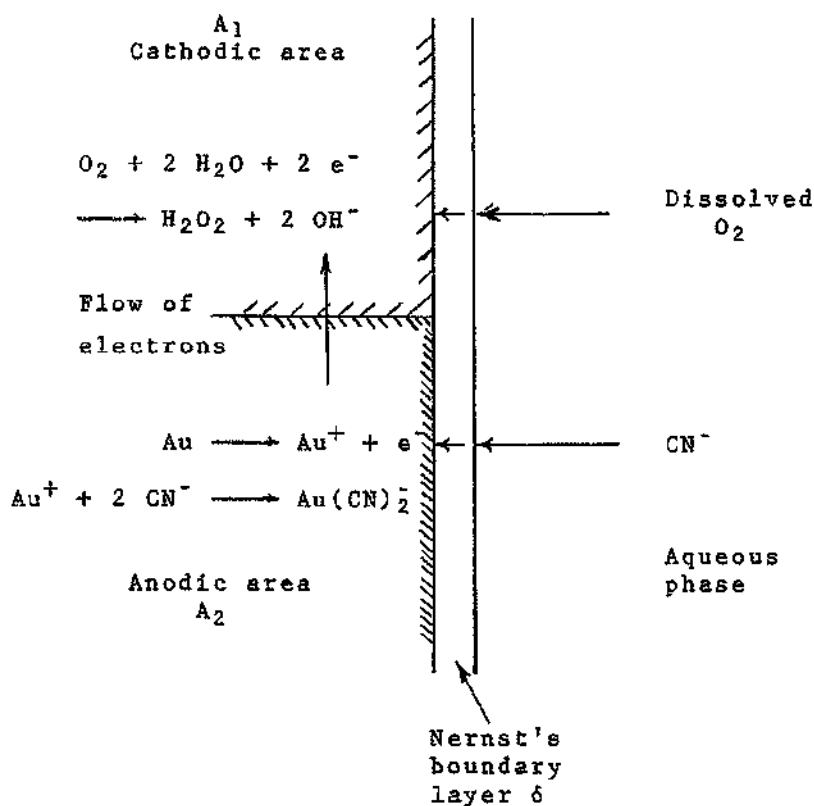


Figura 2.4. Representación esquemática de la corrosión local de la superficie de una celda de Au en contacto con una solución que contiene O₂ y CN [23].

En la parte anódica se lleva a cabo la cianuración y en la parte catódica se forma el peróxido de hidrogeno.

2.8.3 Efecto del tamaño de partícula en el proceso de cianuración.

El tamaño de partícula en el proceso de cianuración tiene un impacto significativo en la eficiencia y la velocidad de disolución del oro ya que a medida que el tamaño de partícula disminuye, se incrementa la superficie específica de las partículas de mineral. Esto proporciona una mayor área de reactividad para que el cianuro y el oxígeno puedan interactuar con las partículas de oro, lo que conduce a una mayor recuperación ya que más partículas de oro están expuestas y disponibles para la disolución; generalmente, este tamaño de partícula es menor a 75 μm . [2].

2.8.4 Efecto de la concentración de cianuro en el proceso de cianuración.

El aumento en la concentración de cianuro generalmente conlleva a un incremento en la velocidad de reacción del oro, facilitando la formación de complejos solubles con el cianuro. En contraste, en concentraciones bajas, la velocidad de reacción del oro puede depender más de factores como la agitación y el oxígeno que de la concentración de cianuro. No obstante, la gestión de altas concentraciones de cianuro puede generar mayores costos operativos y requisitos de tratamiento de efluentes, destacando la importancia de un manejo seguro para minimizar impactos ambientales y costos adicionales. Además, concentraciones extremadamente altas de cianuro pueden llevar a la pasivación del oro, disminuyendo su velocidad de disolución y afectando la eficiencia del proceso, esto en base a el análisis descrito por Garcia-Rosales y Lovera [2, 3]. Cuando la concentración de cianuro es muy alta, se favorecen las reacciones que generan productos menos solubles o que forman complejos más estables en la superficie del metal. Estos productos pueden ser óxidos metálicos o complejos metálicos de cianuro que recubren la superficie del oro, formando una capa pasivante que obstaculizan la entrada del cianuro hacia dentro del mineral. Este fenómeno provoca que, aunque se incrementen las concentraciones de CN, ya no se observe un aumento en la disolución del oro. Este comportamiento se puede apreciar en la Figura 2.5.

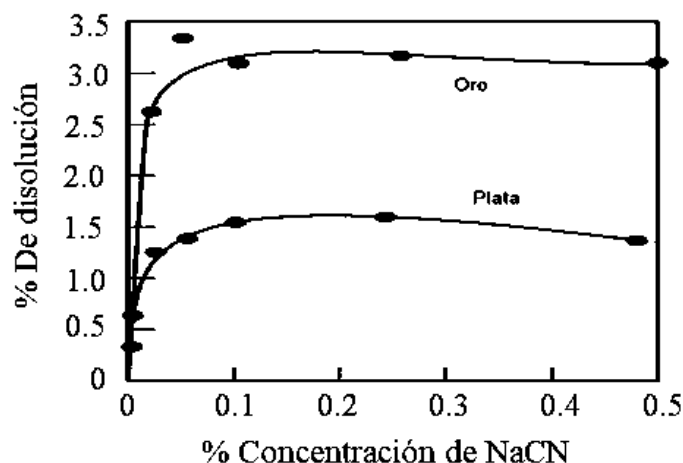
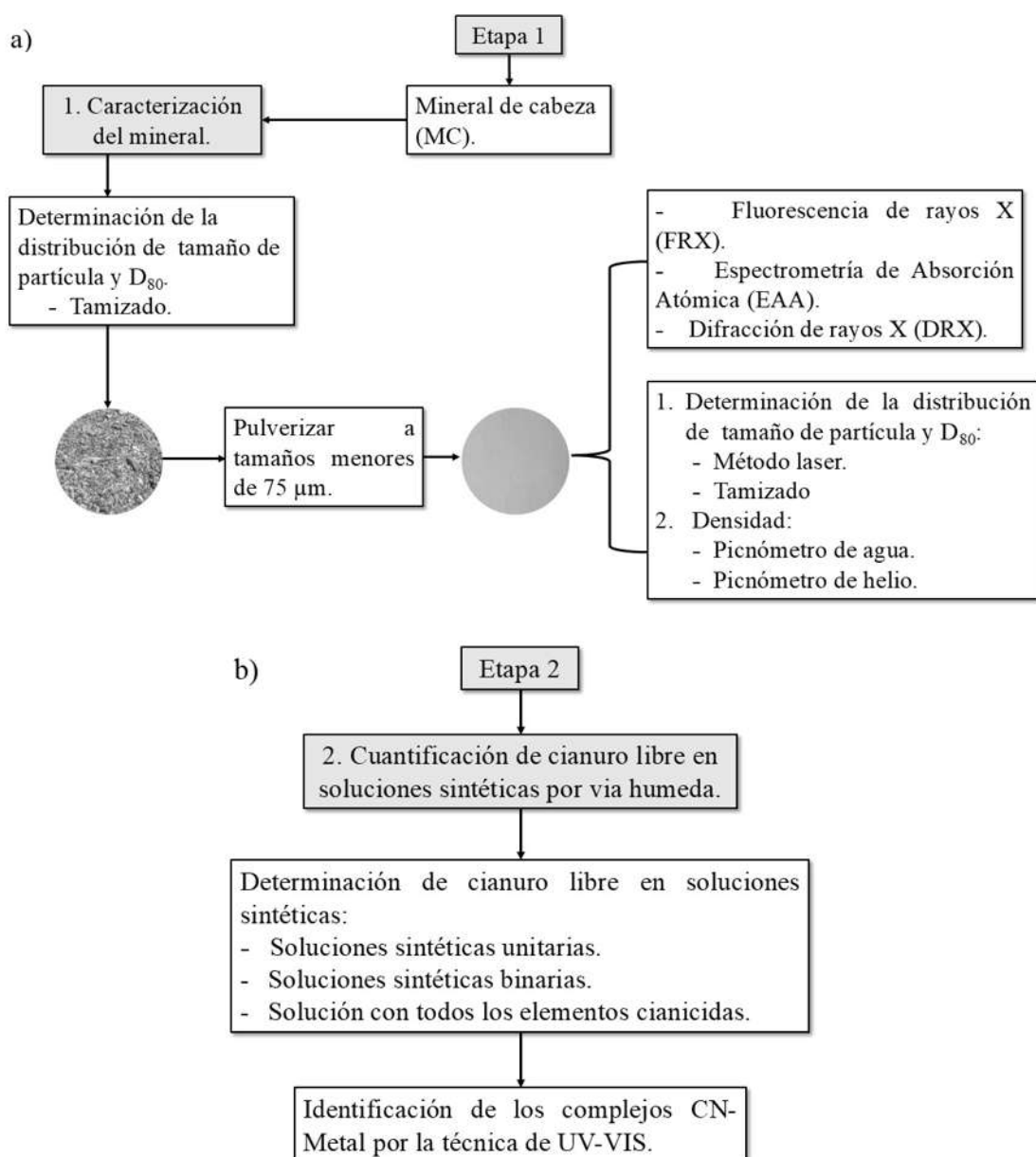


Figura 2.5. Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de recuperación de oro y plata [4].

CAPITULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Este capítulo describe el procedimiento experimental utilizado para la caracterización física y química del mineral, así como la técnica de volumetría empleada para la cuantificación del cianuro libre en soluciones sintéticas. Asimismo, se detalla el desarrollo experimental para promover la asociación entre el cianuro y los elementos cianicidas en una prueba exploratoria de lixiviación del mineral. En la Figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques que ilustra las etapas seguidas durante la investigación.



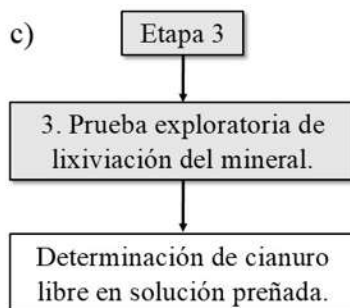


Figura 3.1. Diagrama representativo del procedimiento experimental de las etapas: a) 1, b) 2 y c) 3.

3.1 Caracterización física del mineral.

La caracterización de un mineral aurífero tiene como finalidad generar información que, en la etapa final de este proyecto de investigación, permita aplicar los resultados obtenidos en soluciones sintéticas al proceso de cianuración del mineral, constituyendo así un acercamiento a su posible aplicación a nivel industrial.

La muestra mineral se obtuvo de dos puntos de un yacimiento de casi 2 hectáreas, ubicado en el municipio de Nocupétaro, Michoacán de Ocampo; esta muestra pesó aproximadamente 40 kilos y se mezcló homogéneamente, posteriormente se realizó el cuarteo para separar 5 kilos como muestra testigo y dejar el restante como muestra de trabajo, la cual se denominó Mineral de Cabeza (MC). Por otro lado, este yacimiento ya ha sido analizado por el Departamento de Metalurgia Extractiva de este Instituto, determinando que las partículas de oro quedan liberadas con tamaños menores a $75\ \mu\text{m}$ [24], por lo que el MC debe contar con este diámetro D_{80} .

3.1.1 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80} del mineral de cabeza.

Para determinar la distribución de tamaño de partícula y D_{80} , se aplicó únicamente la siguiente técnica:

- **Tamizado.**

Los 35 kg del MC fueron sometidos al proceso de separación en húmedo, en el cual se añadió agua al material con el fin de evitar la pérdida de partículas finas. Para ello, se empleó la serie de tamices Tyler con diferentes aberturas: $\frac{1}{2}$ (12.5 mm), $\frac{1}{4}$ (6.7 mm), 8 (2.36 mm), 10 (1.0 mm), 20 (0.5 mm), 40 (0.3 mm), 60 (0.21 mm), 80 (0.18 mm), 100 (90 μ m) y 200 (75 μ m), una vez realizada la separación, el material se dejó secar y posteriormente se registró el peso retenido en cada tamiz, así como el correspondiente a la fracción pasante de la malla -200. Con estos valores se calculó el porcentaje de peso retenido y el acumulado para determinar la distribución de tamaño de partícula y el D_{80} gráficamente. Finalmente, las muestras con los diferentes tamaños de partícula fueron resguardados para aplicarlos en los análisis correspondientes.

3.1.2 Molienda del mineral de cabeza.

Del proceso de tamizado descrito previamente, el material retenido en cada tamiz se sometió de manera individual a una molienda terciaria, hasta lograr que la mayor parte de cada fracción pasara por la malla 200, correspondiente a un tamaño de partícula de 75 μ m.

3.1.3 Determinación de la distribución de tamaño de partícula y D_{80} de arena molida.

Una vez concluida la molienda terciaria del mineral de cabeza (MC), la muestra se homogeneizó y se denominó arena molida (AM). Posteriormente, se realizó el cuarteo con el fin de obtener una muestra representativa para determinar la distribución del tamaño de partícula. Este análisis se llevó a cabo mediante la técnica que se describe a continuación:

- **Tamizado.**

Al igual que en el caso del mineral de cabeza (MC), se pesó 1 kg de AM (arena molida) para su separación en una serie de tamices Tyler: 40, 60, 80, 100 y 200. Finalmente, el material retenido en cada tamiz se pesa individualmente. Con estos valores se calculó el porcentaje de peso retenido y acumulado, con el fin de determinar gráficamente la distribución de tamaño de partícula y D_{80} . Se determinó nuevamente el valor de D_{80} con el propósito de compararlo con el obtenido a través de la técnica de tamizado. Para ello, se empleó el método que se describe a continuación:

- **Método láser.**

Se determino el tamaño de partícula con el equipo COULTER® LS100Q, el cual utiliza el método de dispersión de luz láser en un rango de detección entre 0.4 a 900 μm ; con el grafico obtenido se determinó D_{80} de AM al interpolar.

3.1.4 Densidad.

Se determinó la densidad relativa y absoluta de la muestra AM, utilizando las técnicas:

- Picnómetro de helio: Se analizó la muestra AM con el equipo Micrometrics® AccuPyc 1330, entregándose 100 g al Técnico del equipo para su análisis.
- Picnómetro de agua: Para determinar la densidad de las muestras minerales mediante esta técnica se tomaron en cuenta los estándares técnicos tales como la ASTM D854 presenta [25], en primer lugar, se registraron los pesos de AM, además del peso del picnómetro vacío, picnómetro lleno de agua y del picnómetro con el mineral y agua (lleno, razado por el tapón del picnómetro). Se utilizó agua destilada. La prueba se realizó por triplicado. Se debe cuidar que la superficie del picnómetro no tenga humedad. Con los datos del pesado se aplica la siguiente ecuación para calcular la densidad relativa (ρ_r) de los sólidos minerales:

$$\rho_r = \frac{W_{\text{muestra}}}{(W_{\text{muestra}} + W_{\text{pa}} - W_{\text{pam}})} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde, **Wmuestra** es el peso de la muestra mineral, **Wpa** es el peso de picnómetro más agua y **Wpam** es el peso del picnómetro más la muestra mineral y agua.

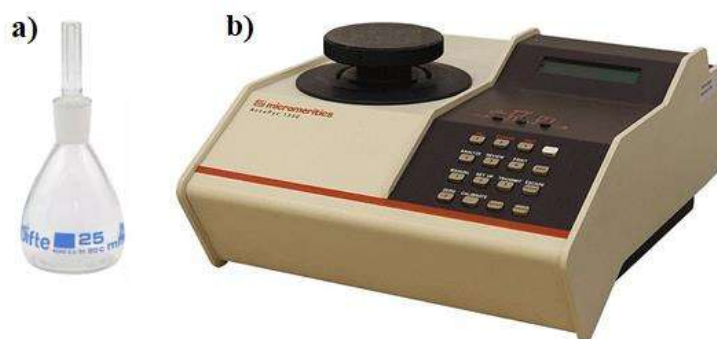


Figura 3.2. a) Picnómetro de agua, b) Equipo utilizado de picnómetro de helio.

3.2 Caracterización cualitativa y cuantitativa del mineral.

A la arena molida (AM) con tamaños iguales o inferiores a $75\ \mu\text{m}$ se le aplican técnicas de análisis químico instrumental, tal como se describe a continuación. Los equipos utilizados se presentan en la Figura 3.3.

3.2.1 Florescencia de rayos X (FRX): equipo S8 Tiger BRUKER®, se empleó el modo de análisis elemental.

3.2.2 Difracción de rayos X (DRX): equipo D8 ADVANCE BRUKER®, las condiciones de corrida fueron: 5 a 70° , tiempo de paso 0.6 s e integración 0.02° .

3.2.3 Espectrometría de Absorción Atómica (EAA): equipo PinAAcle 900H, Perkin Elmer®, antes de usar este equipo, las muestras se sometieron a una digestión química cerrada por microondas para favorecer la disolución en agua regia + HF. Posteriormente, se procedió a realizar la lectura.

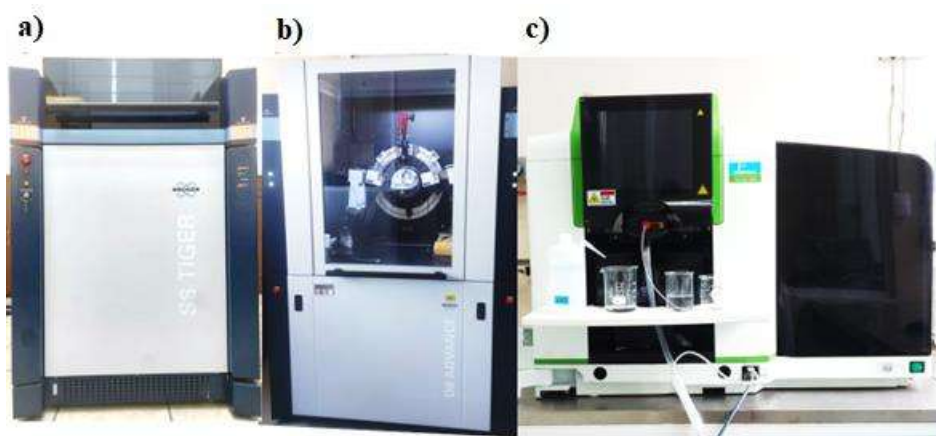


Figura 3.3. Equipos utilizados en la caracterización fisicoquímica. a) Florescencia de rayos X, b) Difracción de rayos X y c) Espectroscopía de absorción atómica de flama.

3.3 Cuantificación de cianuro libre por volumetría en soluciones sintéticas.

A continuación, se muestra la práctica general para la cuantificación de cianuro libre por volumetría [26, 25], el cual se muestra de forma esquematizada en la Figura 3.4:

Instrumental utilizado:

- 1 Bureta de 25 ml: para la dispensación precisa de la solución titulante.
- 3 Matraces Erlenmeyer: utilizados para contener la muestra que contiene el CN^- .
- 1 Soporte Universal: para sostener la pinza para bureta y la bureta.
- 1 Pinza para Bureta: para sostener la bureta durante la titulación.
- 1 Matraz Volumétrico de 500 ml: Para la preparación de la solución titulante.
- 1 Matraz Volumétrico de 50 ml: para la preparación de la solución que contiene el cianuro (Este tamaño cambiara conforme la cantidad de solución que sea preparada).
- 1 Matraz Volumétrico de 100 ml: para realizar una dilución de la solución de cianuro.
- 1 Vaso de precipitados de 100 ml: para recoger los residuos al aforar la bureta.
- Cucharas o espátulas: para la manipulación de los reactivos.
- Platos o recipientes ligeros: para pesar el NaCN.

Reactivos:

- AgNO_3 , NaCN, NaOH, Agua destilada, KI

Procedimiento:

1. Preparación de la solución con cianuro:

La solución de cianuro se preparó en un matraz volumétrico de 50 ml, al cual se agregaron inicialmente 25 ml de agua destilada. Posteriormente, el pH de la solución se ajustó en un intervalo de 10.0 a 11.5 mediante la adición controlada de hidróxido de sodio (NaOH), con el fin de evitar la volatilización del cianuro de hidrógeno (HCN).

Una vez ajustado el pH, se añadió la cantidad requerida de cianuro de sodio (NaCN) para alcanzar la concentración deseada de ion cianuro (CN^-). La masa de NaCN necesaria se calcula previamente a partir de la relación estequiométrica entre el NaCN y el ion CN^- , considerando sus pesos moleculares:

- **PM de NaCN** = 49 g/mol
- **PM de CN** = 26.017 g/mol

Para determinar el porcentaje de CN por cada gramo de NaCN:

$$\frac{(26.017 \text{ g/mol})(100\%)}{(49 \text{ g/mol})} = 53.09\% \text{ Ó } 0.5309 \text{ g de CN por cada g de NaCN} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Como ejemplo de cálculo, para la preparación de una solución con una concentración de 0.3 % de CN⁻, se demostró que 50 ml de solución corresponden aproximadamente a 50 g de agua. La masa de CN⁻ requerida se procesa mediante:

$$\frac{(50 \text{ g H}_2\text{O})(0.3 \% \text{ CN})}{(100\% \text{ H}_2\text{O})} = 0.15 \text{ g de CN} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

A partir de esta cantidad, la masa de NaCN necesaria se calculó como:

$$\frac{(1 \text{ g de NaCN})(0.15 \text{ g CN})}{(0.5309 \text{ g CN})} = 0.283 \text{ g de NaCN} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Por lo tanto, para la preparación de una solución con una concentración de 0.3 % de CN⁻ fue necesario agregar 0.283 g de NaCN.

Nota: Es importante resaltar que tanto la cantidad de solución como la concentración cambiaran según lo que se desee.

2. Dilución de la solución de cianuro:

Para evitar un exceso de consumo del reactivo titulante, AgNO₃ se realiza una dilución de la solución de cianuro con agua destilada en un matraz volumétrico de 100 ml en una proporción de 9:1, es decir, por cada 100 ml de solución 10 ml serán de la solución que contiene el CN⁻ y 90 ml serán de agua destilada ajustada a un pH de entre 11-11.5 con NaOH.

3. Preparación de replicas:

Tomar tres réplicas de 10 ml de la solución diluida en matraces Erlenmeyer de 250 ml y añadir tres gotas de indicador KI a cada alícuota.

4. Preparación del reactivo titulante (AgNO₃) a 0.1 normal:

- Pesar 1 g de AgNO₃ y desecarlo en una mufla a 150°C durante 2 horas para eliminar la humedad.
- Pasar al desecador para atemperar durante 30 min.

- Después de la desecación, pesar de 0.85 a 0.9 g de AgNO_3 y disolverlo en un matraz volumétrico de 500 ml, aforando con agua destilada.
- Reservar la solución en una botella ámbar.

5. Titulación:

- Llenar la bureta con la solución titulante de nitrato de plata (AgNO_3) y aforarla.
- Añadir la solución titulante gota a gota a cada alícuota mientras se agita en los matraces Erlenmeyer.
- Continuar la adición de solución titulante hasta que se observe un cambio de color transparente a amarillo lechoso, indicando el final de la reacción entre el CN^- y el AgNO_3 .

6. Registro y cálculo:

- Registrar el volumen de solución titulante utilizado en la bureta.
- Utilizar este volumen para calcular la concentración de cianuro en la muestra líquida utilizando la fórmula:

$$\text{CN}^- = \frac{(0.0005308)(V \text{ AgNO}_3 \text{ adicionado})(V \text{ inicial})}{(V \text{ de la alícuota})(F.D.)} \quad (\text{Ec. 3.5})$$

Donde **V AgNO_3 adicionado** es el volumen de la solución de nitrato de plata consumido, **V inicial** corresponde al volumen total de la solución de la cual se toman las alícuotas, **V de alícuota** representa el volumen al que se prepara la alícuota, y **F.D.** es el factor de dilución.

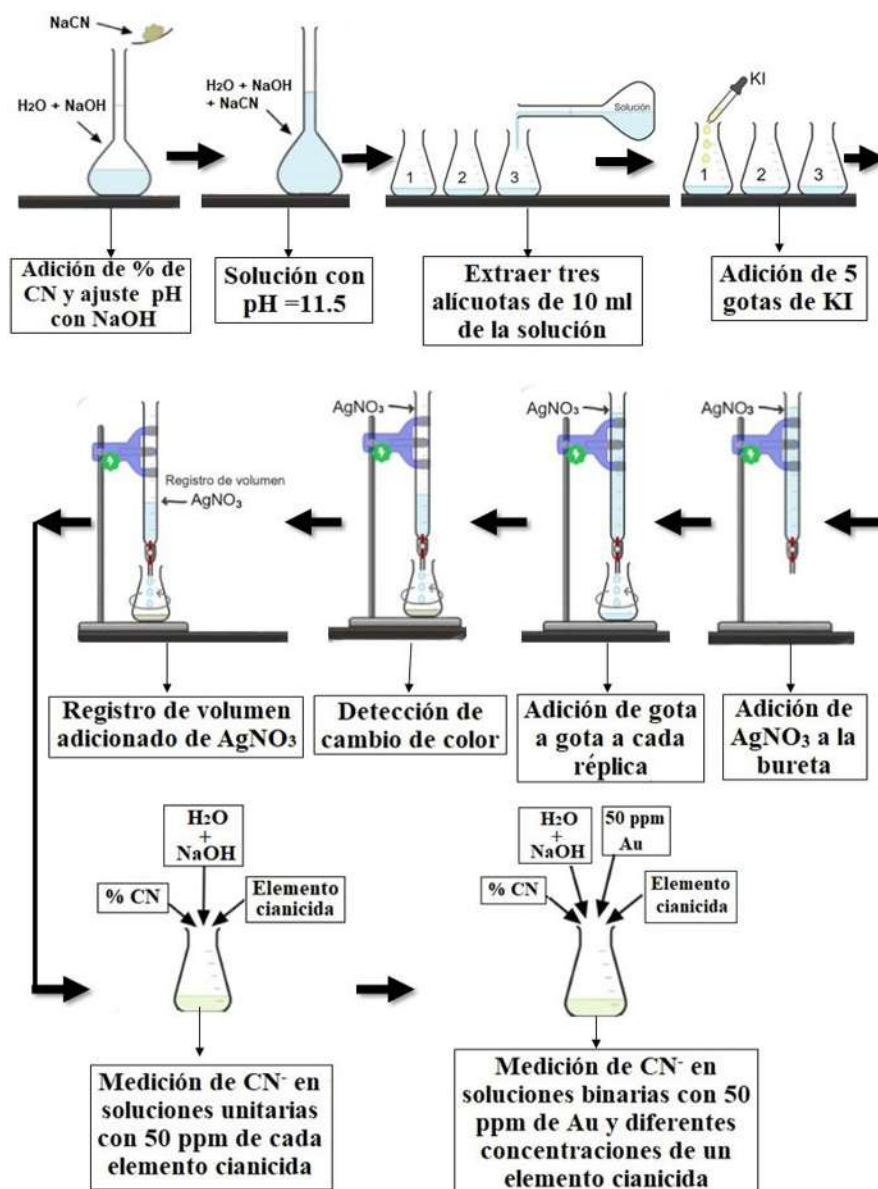


Figura 3.4. Esquema del proceso de volumetría para cuantificación de cianuro libre.

Con la información obtenida del diagrama anterior se calcula el cianuro libre en solución, de acuerdo a la Ec. 3.5.

3.3.1 Determinación de cianuro libre en soluciones sintéticas.

Este análisis se realizó mediante la técnica de volumetría descrita en la sección anterior, con el objetivo de determinar la cantidad de CN^- necesaria para reaccionar completamente con cada elemento cianídico, asegurando que no quede en exceso en la solución. Una vez obtenida esta cantidad, se verificó mediante soluciones binarias, es decir, mezclando dos

elementos junto con la cantidad de CN previamente establecida para cada uno. Esto se llevó a cabo con la finalidad de confirmar que la concentración adicionada era la adecuada y no quedara presencia de CN^- en solución. A continuación, se detalla la metodología empleada:

- **Soluciones sintéticas unitarias.**

Una vez dominada la técnica mediante la cuantificación de distintos porcentajes de CN^- en solución, se procedió a determinar el cianuro libre en soluciones sintéticas unitarias compuestas por cianuro y un elemento cianicida (CN-Au , CN-Fe , CN-Cu , CN-Ca y CN-Mg). Los elementos cianicidas son en base a los resultados del análisis químico del mineral por la técnica de FRX. Las concentraciones se prepararon de acuerdo con la estequiometría de las reacciones generales descritas en el apartado 2.7, “Reacciones que ocurren durante la lixiviación por cianuración” (págs. 15–16). Para todos los elementos cianicidas se fijó una concentración de 50 ppm, variando únicamente la concentración de CN añadido, con el fin de determinar la cantidad necesaria para alcanzar un valor de cianuro libre $\leq 0.0001\%$.

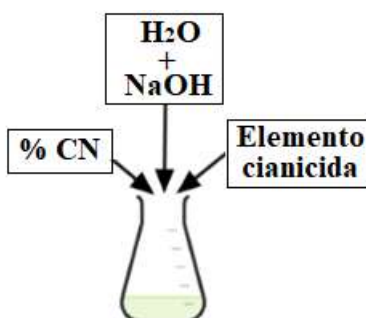


Figura 3.5. Representación de la solución sintética unitaria que contiene un porcentaje de cianuro y 50 ppm de un elemento cianicida (Au, Fe, Cu, Ca y Mg).

- **Soluciones sintéticas binarias.**

A continuación, se describe el procedimiento utilizado para la preparación de soluciones binarias, con el propósito de verificar que la concentración de CN^- calculada a partir de las soluciones unitarias sea $\leq 0.0001\%$.

Una vez que se obtuvo la concentración necesaria de CN para alcanzar una condición $\leq 0.0001\%$ de CN^- en solución, considerando una concentración fija de 50 ppm para cada elemento cianicida (Ca, Cu, Mg y Fe), se prepararon soluciones sintéticas binarias compuestas por la combinación de:

- $\text{Au} + \text{CN}^- + \text{Ca}$
- $\text{Au} + \text{CN}^- + \text{Cu}$
- $\text{Au} + \text{CN}^- + \text{Mg}$
- $\text{Au} + \text{CN}^- + \text{Fe}$

Para cada sistema binario, se añadió la cantidad de CN correspondiente a 50 ppm de Au y la concentración de los elementos cianicidas (Fe, Ca, Mg y Cu) se ajustó de manera proporcional a su contenido real en el mineral, con el propósito de reproducir condiciones representativas del sistema natural.

Finalmente, se realizó la cuantificación de cianuro libre en cada sistema binario, verificando que los valores obtenidos correspondieran a la condición establecida ($\text{CN}^- \leq 0.0001 \%$).

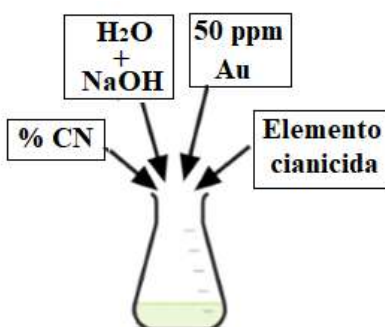


Figura 3.6. Representación de la solución sintética binaria que contiene: 50 ppm de Au, un elemento cianicida en cantidad proporcional a su concentración en el mineral y porcentaje de cianuro calculado de soluciones unitarias para cada elemento.

- **Solución sintética con todos los elementos cianicidas.**

Como último experimento con las soluciones sintéticas, se cuantificó el cianuro libre en una solución con 50 ppm de cada uno de los cinco elementos cianicidas (Au, Ca, Cu, Mg y Fe). Además, se añadieron diferentes cantidades de CN, calculada a partir de las soluciones unitarias, para garantizar la ausencia de cianuro residual en la solución.

3.3.2 Espectrometría de UV-Vis.

Las soluciones sintéticas unitarias fueron analizadas mediante esta técnica a una longitud de onda de 570 nm, utilizando un espectrofotómetro UV-Vis PerkinElmer®, modelo Lambda 25.



Figura 3.7. Equipo de UV-Vis utilizado para identificar los complejos metálicos formados de las reacciones metal-cianuro en las soluciones unitarias.

3.4 Prueba exploratoria de lixiviación del mineral.

3.4.1 Determinación de cianuro libre en solución preñada.

De los experimentos anteriores donde se adicionaron diferentes concentraciones de CN para concentraciones conocidas del elemento cianicida, se obtuvieron ecuaciones de correlación entre $[\text{CN}^-]$ libre y $[\text{Me}]$, que indican el cianuro que debe adicionarse, de acuerdo a la concentración del metal cianicida, para asegurar que prácticamente no exista CN^- o residual en la solución ($\leq 0.0001 \%$).

Con la información anterior, finalmente se llevó a cabo la prueba exploratoria de lixiviación del mineral (AM). Para ello, se prepararon tres soluciones de 400 ml, compuestas por agua y regulador de pH ajustado a 11.5, a las que se agregaron 200 g de mineral. La diferencia entre las tres soluciones radicó en la cantidad de cianuro agregado a cada solución: a la primera solución se le añadió la concentración calculada que garantiza que el porcentaje de CN^- sea menor o igual a 0.0001 %; a la segunda se le incorporó una cantidad diluida respecto a dicha concentración, y a la tercera se le agregó una cantidad de CN^- suficiente para saturar la solución lixivante. El mineral se lixivió durante una semana. Al cabo de los 7 días, se cuantificó el cianuro libre presente en la solución preñada por volumetría. Posteriormente, mediante espectrometría de absorción atómica, se analizaron la solución preñada y arena molía (AM) para determinar la concentración de Au y de los elementos cianicidas presentes tanto en el mineral como en la solución preñada.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización física del mineral.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización física del mineral.

4.1.1 Distribución de tamaño de partícula y D_{80} del mineral de cabeza.

En la Figura 4.1, se muestra la distribución de tamaño de partícula del mineral de cabeza (MC). Se observa que la mayor parte del mineral no atravesó la malla 200 (equivalente a 75 μm), siendo únicamente el 28.4 % del total el que es menor a ese tamaño.

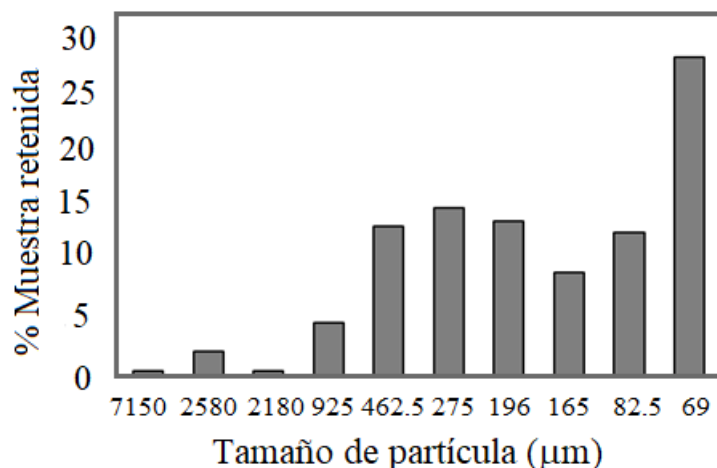


Figura 4.1. Distribución de tamaño de partícula del mineral de cabeza (MC). Diámetros obtenidos por la técnica de tamizado.

Por su parte la Figura 4.2 presenta el D_{80} para esta misma MC, el cual resultó ser de 275 μm , lo que indica que el 80 % del mineral tiene un tamaño de partícula menor a este valor. Con base en esta distribución, se concluye que el grado de liberación de la especie de oro no es suficiente para exponerlo completamente, ya que generalmente el oro se libera a tamaños relativamente finos menores o iguales a 75 μm [1].

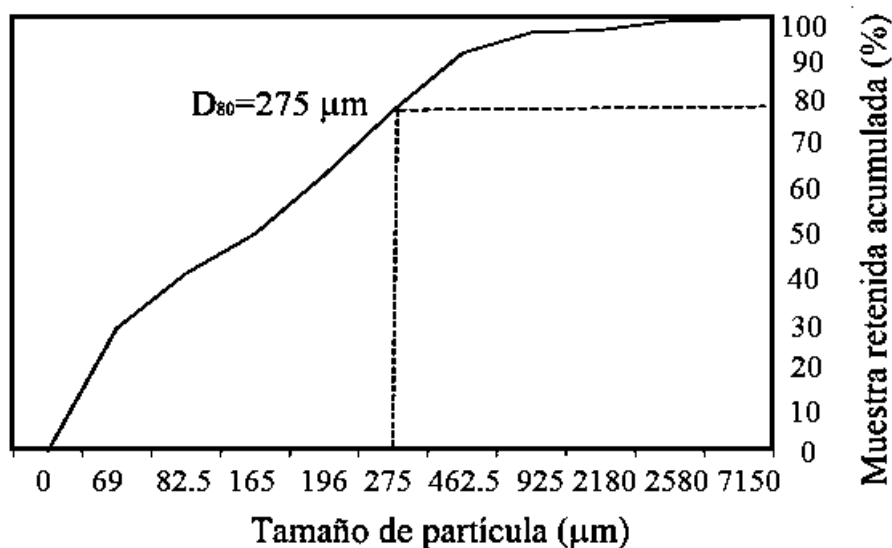


Figura 4.2. Gráfica para determinar el D_{80} por técnica de tamizado de mineral de cabeza (MC).

De la figura anterior fue necesario reducir el tamaño de partícula del mineral recibido, ya que el tamaño no era el adecuado para el proceso de cianuración al no garantizarse la liberación de las especies de oro, en concordancia con lo señalado por Guerra García [8] y por la experiencia en el grupo de trabajo.

4.1.2 Distribución de tamaño de partícula y D_{80} de arena molida.

Con base en el apartado anterior, se realizó una molienda en un molino de discos con el propósito de reducir el tamaño de partícula y liberar las especies auríferas. Esto permite que el reactivo de cianuro tenga un mayor contacto con el oro durante el proceso de lixiviación por cianuración. De la muestra obtenida anteriormente la distribución de tamaño de partícula y el D_{80} se determinó a partir de las siguientes maneras:

- Tamizado:

La gráfica de distribución de tamaño de partícula (ver Figura 4.3) obtenida por la técnica de tamizado de arena molida muestra que la mayor proporción de material se encuentra en 69 μm, lo que indica que, tras la etapa de molienda, este rango concentra la fracción predominante de partículas.

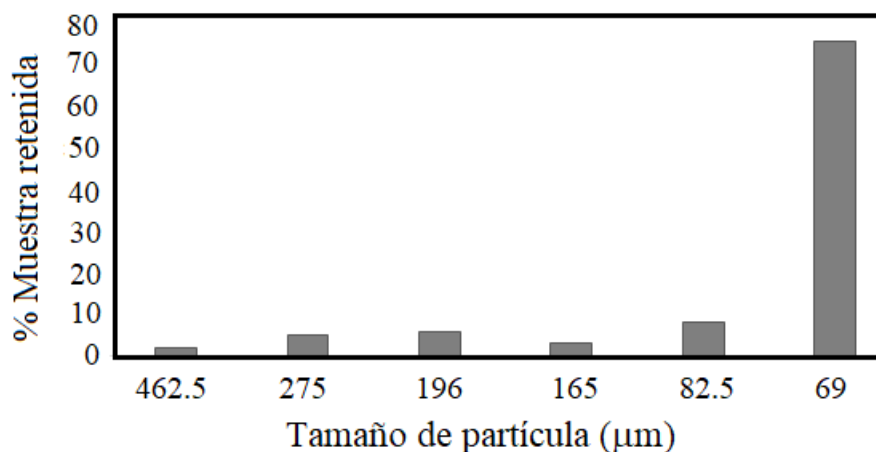


Figura 4.3. Distribución de tamaño de partícula de arena molida (AM). Diámetros obtenidos por la técnica de tamizado.

En la Figura 4.4 se presenta el D_{80} para arena molida (AM), el cual resultó ser de 72 μm , lo que indica que el 80 % del mineral tiene un tamaño de partícula menor a este valor. Con base en esta distribución, se concluye que el grado de liberación de la especie de oro es suficiente para el proceso de lixiviación por cianuración de acuerdo con Guerra García [8].

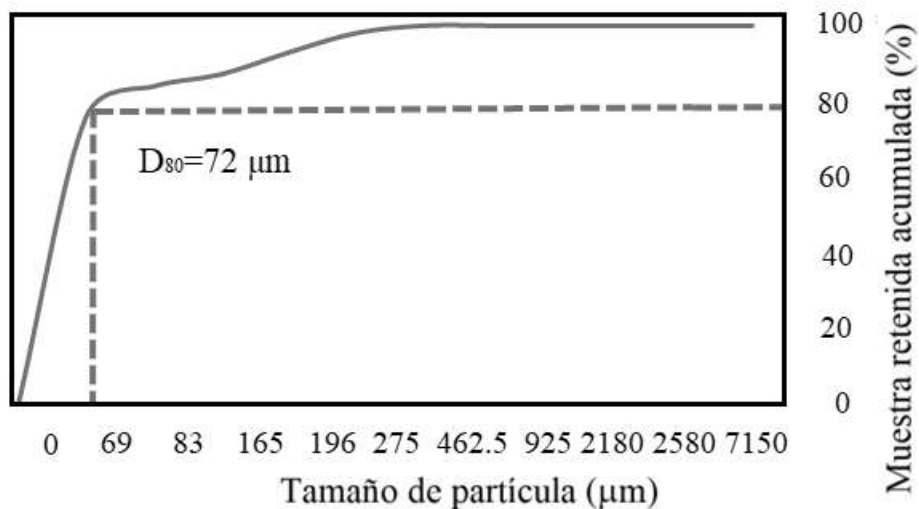


Figura 4.4. Gráfica para determinar el D_{80} por técnica de tamizado de arena molida (AM).

- Método láser:

En la Figura 4.5 se presenta la curva de % volumen acumulado contra el tamaño de partícula obtenido mediante el equipo COULTER® LS100Q. Este análisis fue necesario debido a que, para partículas de tamaños tan pequeños, la técnica manual de tamizado no es 100 % confiable. En la gráfica, se interpolaron los datos para compararlos con el valor de D_{80} determinado previamente por tamizado manual para el mineral de cabeza (MC). En este caso, el D_{80} se encuentra aproximadamente en $35 \mu\text{m}$, lo que indica que el 80% de las partículas tienen un diámetro igual o menor a este valor. Este tamaño es el adecuado para realizar la lixiviación por cianuración, en concordancia con Guerra García [8].

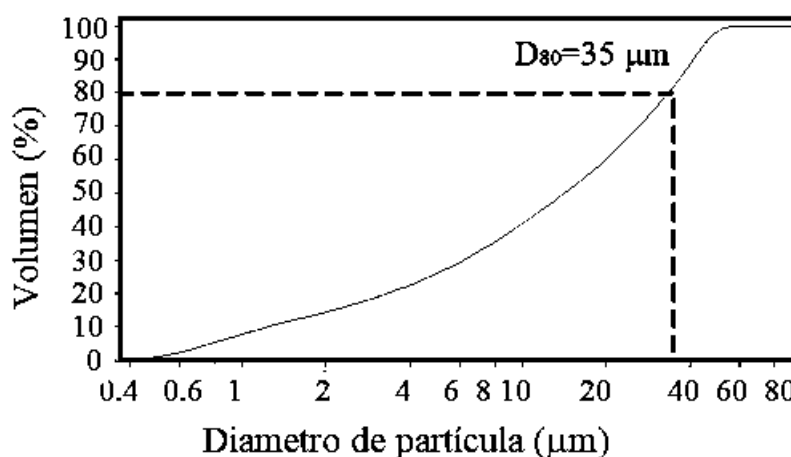


Figura 4.5. Determinación gráfica del D_{80} final por método láser. Mineral pulverizado.

De lo anterior, los valores de D_{80} obtenidos por el método láser y la técnica de tamizado, se concluye que la diferencia observada para la arena molida se debe principalmente a dos factores: la ausencia de tamices con aberturas menores a $75 \mu\text{m}$ (malla 200) y la pérdida de partículas finas durante el proceso de tamizado. Por lo anterior, en este caso resulta más confiable el valor de D_{80} determinado por el método láser, ya que este incluye la fracción de partículas menores a la malla 200, ofreciendo una medición más precisa y representativa para este rango de tamaños.

4.1.3 Densidad.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos de la densidad para arena molida (AM):

- Densidad por picnómetro de agua: 2.70 g/cm^3 .

- Densidad por picnómetro de helio: 2.76 g/cm^3 .

Se observa una diferencia entre ambas densidades a pesar de tratarse de la misma muestra. Esto se debe al principio de cada método de medición. En el caso del picnómetro de helio, el gas penetra en todos los poros accesibles de la muestra, permitiendo obtener la densidad real. En contraste, el picnómetro de agua no logra ingresar en su totalidad a los poros cerrados o de tamaño nanométrico, lo que resulta en una densidad aparente, generalmente menor que la medida con helio como se presenta para este caso.

Por otra parte, la densidad del silicio es de 2.33 g/cm^3 y, al ser el elemento mayoritario en la muestra, se esperaría un valor cercano a este. Sin embargo, el hecho de obtener una densidad superior sugiere la presencia de elementos de mayor densidad, como el oro, cuya densidad es de 19.3 g/cm^3 .

4.2 Caracterización instrumental.

En los siguientes apartados se desglosan y discuten los resultados obtenidos de la caracterización instrumental.

4.2.1 Florescencia de rayos X.

A partir del análisis elemental por FRX realizado a la muestra mineral arena molida (AM), como se muestra en la Tabla 4.1, se identifica que el Silicio es el elemento predominante, con un porcentaje de 46.1 % w/w, seguido por Fe (20.2 % w/w), Al (12,6 % w/w) y Ca (10,1 % w/w). Este análisis, aunque semicuantitativo, resulta fundamental para iniciar la experimentación, ya que proporciona información para establecer los elementos cianicidas presentes en el mineral, así como su porcentaje; con esta información se diseñan las reacciones de cianuración y se realiza el diseño termodinámico con base en la energía libre de Gibbs. Cabe destacar que cuanto más negativo sea el valor de la energía libre de Gibbs, mayor será la espontaneidad de la reacción.

Tabla 4.1. Análisis elemental de AM por FRX.

Elemento	(% w/w)	Elemento	(% w/w)
Si	46.1	Sr	0.33
Fe	20.2	Mn	0.274
Al	12.6	Ba	0.198
Ca	10.1	Zn	0.05
K	5.16	Cu	0.033
Ti	2.11	Rb	0.0243
Mg	1.84	V	0.013
P	1.02		

Por otra parte, FRX presenta una alta sensibilidad para el análisis de sistemas multifásicos y multicristalinos. Sin embargo, en este tipo de muestras los rayos deben atravesar múltiples estructuras cristalinas, lo que ocasiona una pérdida progresiva de sensibilidad del equipo. La forma ideal de analizar minerales mediante esta técnica es a través de perlas vítreas, ya que permiten homogenizar la muestra y minimizar los efectos de la matriz. No obstante, debido a la falta de crisoles de platino para realizar la fundición, este procedimiento no se llevó a cabo en la práctica, por lo que resulta complicado determinar la concentración de Au mediante esta técnica.

4.2.2 Difracción de rayos X.

En la Figura 4.6 se muestra el difractograma de la muestra de arena molida (AM), en el cual se identificaron las siguientes fases minerales: cuarzo (SiO_2), ortoclasa (KAlSi_3O_8), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de aluminio-magnesio (Al_2MgO_4). Cabe destacar que estos compuestos coinciden con los elementos determinados mediante fluorescencia de rayos X, como se observa en la Tabla 4.1. Finalmente, las fases de cuarzo y ortoclasa evidencian una alta cristalinidad, lo cual se refleja en la intensidad de sus picos característicos en el difractograma.

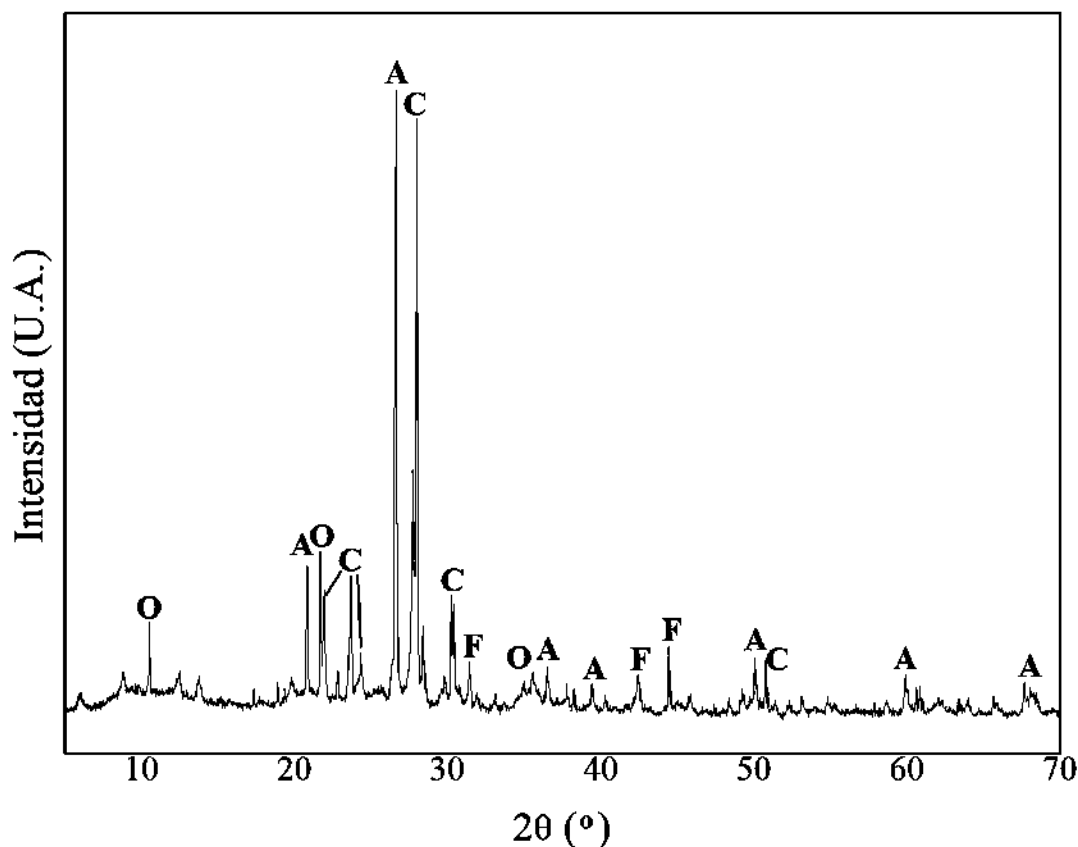


Figura 4.6. Difractograma del mineral de cabeza-MC. Simbología: A-ortoclasa; C-cuarzo; F-óxido de hierro; O-óxido de aluminio magnesio.

4.2.3 Cuantificación de Au por espectrometría de absorción atómica.

A continuación, se presenta el resultado del análisis químico por espectrometría de absorción atómica de arena molida (ver Tabla 4.2). En cuanto al valor de oro, se observa que presenta una ley de 27.61 g/ton, considerándose apto para lixiviación por cianuración, ya que los yacimientos auríferos con leyes a partir de 3 g/ton son factibles de procesarse para obtener oro. El resultado obtenido es el promedio de tres determinaciones.

Tabla 4.2. Análisis de absorción atómica para la cuantificación de oro de AM.

Muestra	Oro (g/ton)
AM	27.61

4.3 Análisis termodinámico de las reacciones de cianuración.

A partir de la caracterización cualitativa del mineral de cabeza, mediante difracción de rayos X, se encuentran en el mineral las especies cuarzo (SiO_2), ortoclasa (KAlSi_3O_8), óxido de hierro (Fe_2O_3) y óxido de aluminio-magnesio (Al_2MgO_4). A excepción de la hematita, ninguna de las otras especies minerales reacciona con el cianuro. En el caso de los complejos de aluminio y magnesio, bajo las condiciones experimentales de este estudio los complejos mencionados no se disocian y por lo tanto es imposible la reacción con el cianuro; incluso, de llegar a disociarse, en el caso del complejo de magnesio, se formaría el $\text{Mg}(\text{OH})_2$, que de acuerdo al diagrama de Pourbaix mostrado en la Figura 4.22 (apartado 4.5), este hidróxido es altamente estable y se pasiva.

4.4 Cuantificación de cianuro libre en soluciones sintéticas por vía húmeda.

En los siguientes puntos se desglosan los resultados obtenidos de la cuantificación de cianuro libre en soluciones sintéticas: unitarias, binarias y aquella que contienen todos los elementos cianicidas.

4.4.1 Dominio de la técnica para determinar el cianuro libre (CN^-) en soluciones.

Para el dominio de la técnica de volumetría, se cuantificaron inicialmente diferentes porcentajes de cianuro libre en solución, sin la presencia de elementos cianicidas. Una vez realizadas las cuantificaciones de las distintas soluciones, se elaboraron curvas de calibración con el fin de confirmar la veracidad de los valores obtenidos: una sin aplicar factor de dilución (véase Figura 4.7 inciso a) y otra aplicando un factor de dilución de 1:10 (véase Figura 4.7 inciso b). En ambos casos se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99, lo que indica que los datos experimentales presentan un excelente ajuste a la línea de tendencia.

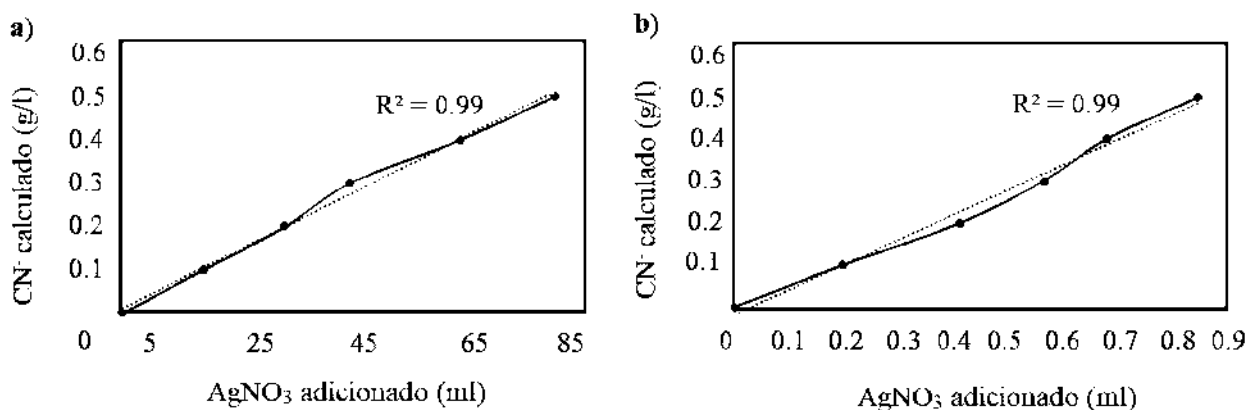


Figura 4.7. Curvas de calibración para la cuantificación volumétrica de cianuro libre; a) Sin aplicar factor de dilución, b) Con factor de dilución 1:10.

4.4.2 Orden de cianicidas en el mineral.

Del análisis termodinámico de las reacciones de cianuración, se establecen los elementos más afines químicamente al cianuro, de acuerdo al valor de energía libre de la reacción mostrado en la sección 2.7. De lo anterior, el orden de afinidad de los metales por el cianuro es: $\text{Ca} \rightarrow \text{Mg} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Cu} \rightarrow \text{Au}$. Los cuatro primeros elementos reaccionan con el CN^- antes que el Au , por lo que es esencial adicionar cianuro en una cantidad que asegure la disolución completa de los cinco metales cianicidas.

4.4.3 Soluciones unitarias.

Se realizó la cuantificación de CN^- en soluciones sintéticas unitarias para cada elemento cianicida, comenzando con una concentración conocida de metal (50 ppm) y variando la cantidad de cianuro. Los resultados obtenidos mediante volumetría se presentan en las Figuras 4.8 a 4.12, donde se muestran los valores de CN^- en función de la relación $\text{metal}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. Cada punto del gráfico presenta un promedio basado en cuatro mediciones.

Al mantener constante la concentración para cada metal y variar el porcentaje de cianuro adicionado, se logró calcular la cantidad de cianuro que reacciona con el metal, dejando prácticamente un 0 % de CN^- en el sistema en todos los casos, es decir, a medida que disminuya el porcentaje de cianuro adicionado, la concentración de cianuro libre en el sistema también disminuirá de forma consistente.

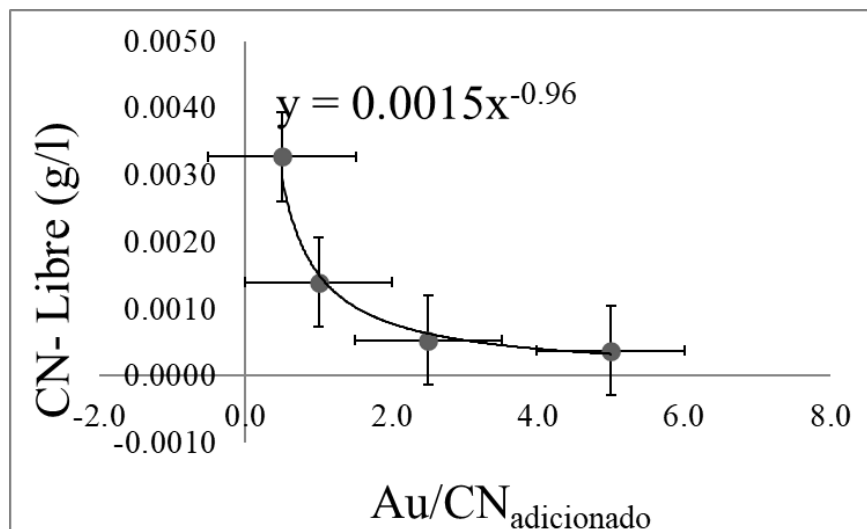


Figura 4.8. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Au/CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Au/CN}_{\text{adicionado}}$.

En el caso del oro (ver Figura 4.8.), la relación $\text{Au/CN}_{\text{adicionado}}$ necesario para alcanzar un 0 % de CN^- implica la adición de 0.01 g/l de cianuro, equivalente a 0.001 %. Esto significa que, por cada 50 ppm de oro presentes en el sistema, se deben agregar 0.01 g/l de cianuro para eliminar el cianuro libre residual.

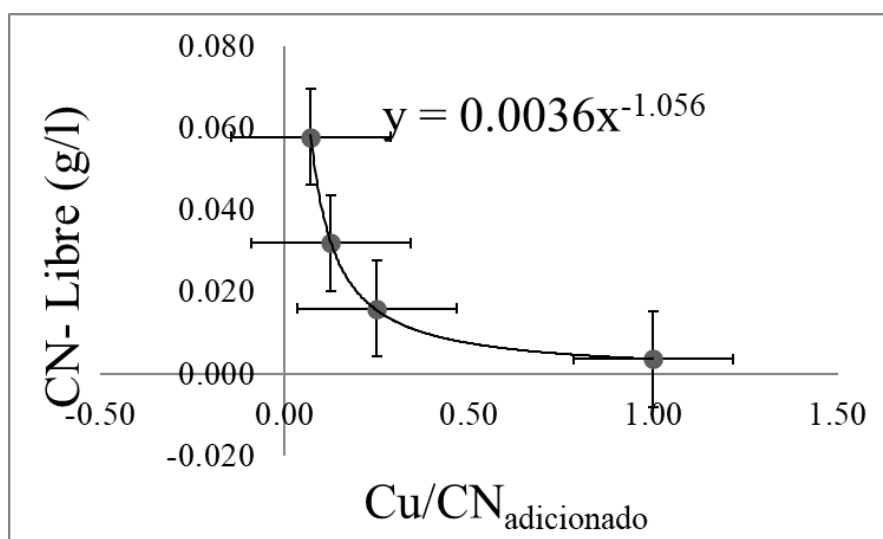


Figura 4.9. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Cu/CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Cu/CN}_{\text{adicionado}}$.

De acuerdo a la Figura 4.9, en el caso del cobre (Cu), la relación $\text{Cu}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ necesario para alcanzar un 0 % de CN^- corresponde a 0.05 g/l de cianuro, equivalente al 0.005 %. Esto indica que, por cada 50 ppm de Cu presentes en la solución, se deben agregar 0.05 g/l de CN para eliminar completamente el cianuro libre residual.

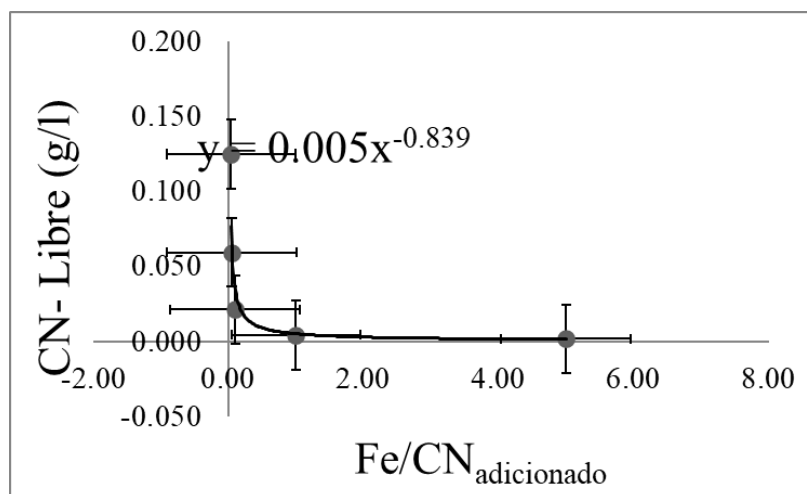


Figura 4.10. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Fe}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Fe}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$.

En la Figura 4.10. se observa que, para el caso del hierro, al igual que para el oro, la relación $\text{Fe}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ necesario para alcanzar un 0% de CN^- requiere la adición de 0.01 g/l de cianuro, lo que equivale a 0.001 %. Esto corresponde a una cantidad de cianuro suficiente por cada 50 ppm de Fe presentes en el sistema.

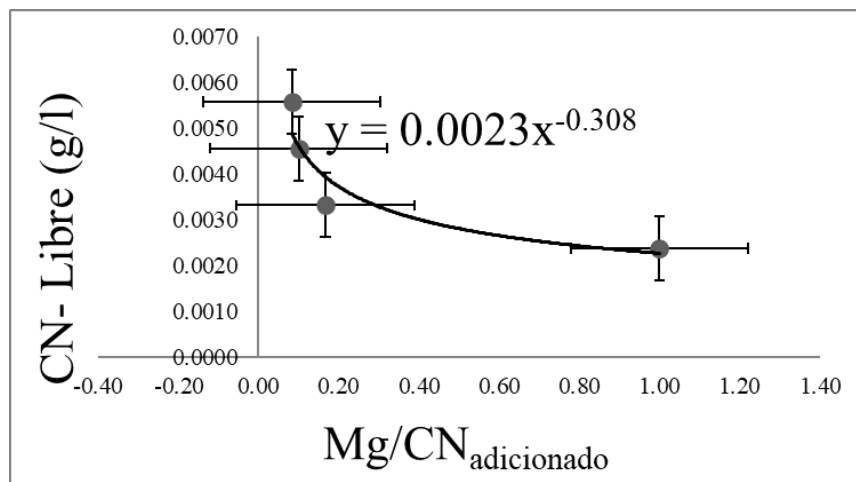


Figura 4.11. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Mg}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Mg}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$.

De acuerdo con la Figura 4.11. se aprecia que la cantidad de CN adecuado para reaccionar con 50 ppm de Mg asegurando 0 % de CN^- en solución es 0.05 g/l o lo que es equivalente a 0.005 %.

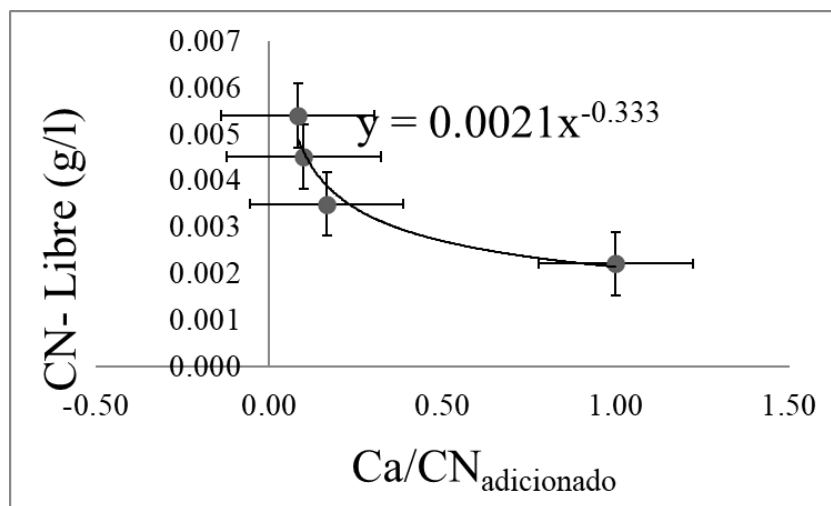


Figura 4.12. Relación entre cianuro libre (CN^-) y $\text{Ca}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$. En la ecuación, la variable dependiente “Y” es CN^- y la variable independiente “X” es la relación $\text{Ca}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$.

Para todos los casos, en cada figura se incluye la correspondiente ecuación de correlación; con esta expresión, es posible extrapolar la relación Metal/ $CN_{adicionado}$ y establecer en que cantidad de NaCN adicionado, el cianuro libre en solución es prácticamente cero.

Extrapolando para cada sistema la relación Metal/ $CN_{adicionado}$, donde el cianuro libre en solución se considera igual a cero si CN^- es igual o menor a 0.0001 g/l, encontramos que esta relación aumenta con el carácter cianicida del metal y concuerda con el orden de afinidad al cianuro sugerido por el valor de energía libre de la reacción, calculado para las reacciones (2) a la (6), y que se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Relación Metal/ $CN_{adicionado}$ y las energías libres de las reacciones (2) a (6) de los metales cianicidas.

Metal	No. Reacción	Relación Metal/ CN	ΔG reacción, KJ/mol
Au	(6)	10	-69.38
Cu	(5)	25	-82.19
Fe	(4)	50	-113.52
Mg	(3)	100	-129.90
Ca	(2)	5000	-154.81

De la tabla anterior se desprende que un aumento en la relación Metal/ $CN_{adicionado}$ indica que se requiere menos cianuro para formar el complejo $Me(CN)_x^-$, lo cual refleja una mayor espontaneidad en la reacción. Esto demuestra que el carácter cianicida de los metales corresponde a la secuencia de afinidad al cianuro sugerida por los valores de energía libre de reacción calculados para cada metal. Se confirma que el orden cianicida es: $Ca \rightarrow Mg \rightarrow Fe \rightarrow Cu \rightarrow Au$.

4.4.4 Soluciones binarias.

A continuación, se presentan los resultados de cuantificación de cianuro libre por la técnica de volumetría a soluciones binarias (agua desionizada + Au + metal cianicida + CN calculado), la concentración para el oro se fijó a 50 ppm mientras que para los demás metales se agregaron concentraciones proporcionales a su contenido determinado en el análisis por FRX. Los valores de CN^- son el promedio de tres mediciones.

En todos los casos (Figuras 4.13. - 4.16.), al agregar la cantidad calculada de cianuro (CN), el cianuro libre (CN⁻) en solución resulta prácticamente nulo. Por otro lado, cuando se agregó un porcentaje mucho mayor al calculado, como era de esperarse, se detectó un porcentaje mayor de CN⁻ en solución, lo que indica que el cianuro reaccionó completamente con los metales presentes, dejando un exceso de reactivo en forma de CN⁻. Finalmente, en el caso donde se añadió una cantidad menor al cianuro calculado, todo el CN reaccionó con los metales presentes, sin dejar CN⁻ residual en la solución.

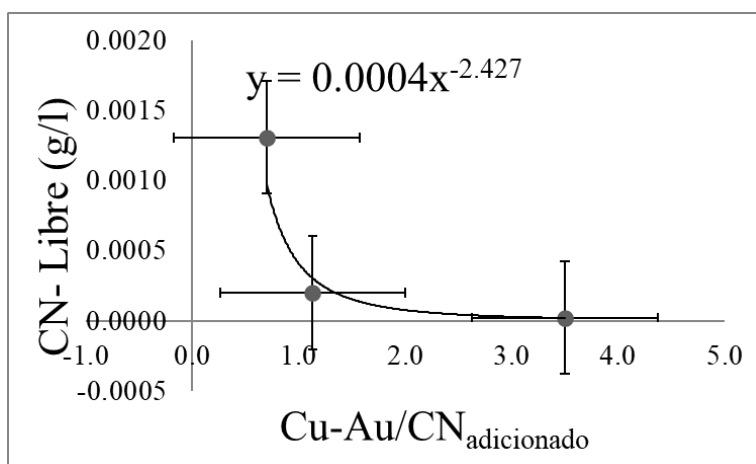


Figura 4.13. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN⁻) en la solución binaria Au-Cu, con diferentes relaciones Cu-Au/CN_{adicionado}. [Au]= 50 ppm; [Cu] = 200 ppm.

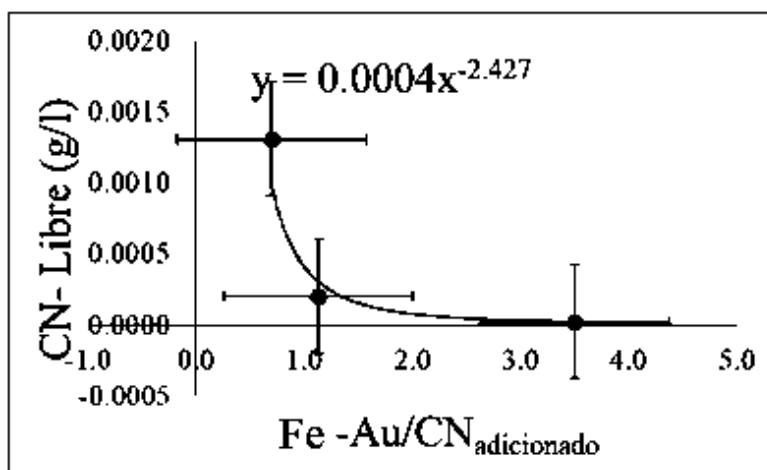


Figura 4.14. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN⁻) en la solución binaria Au-Fe, con diferentes relaciones Fe-Au/CN_{adicionado}. [Au]= 50 ppm; [Fe] = 300 ppm.

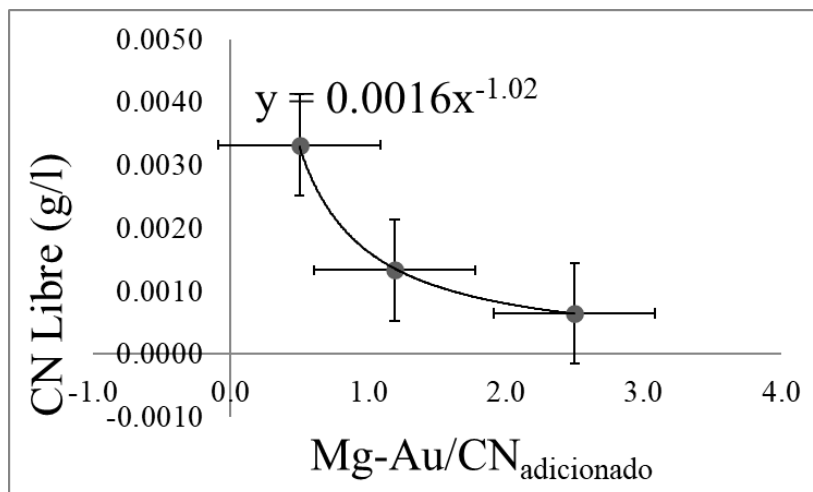


Figura 4.15. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN⁻) en la solución binaria Au-Mg, con diferentes relaciones Mg-Au/CN_{adicionado}. [Au]= 50 ppm; [Mg] = 200 ppm.

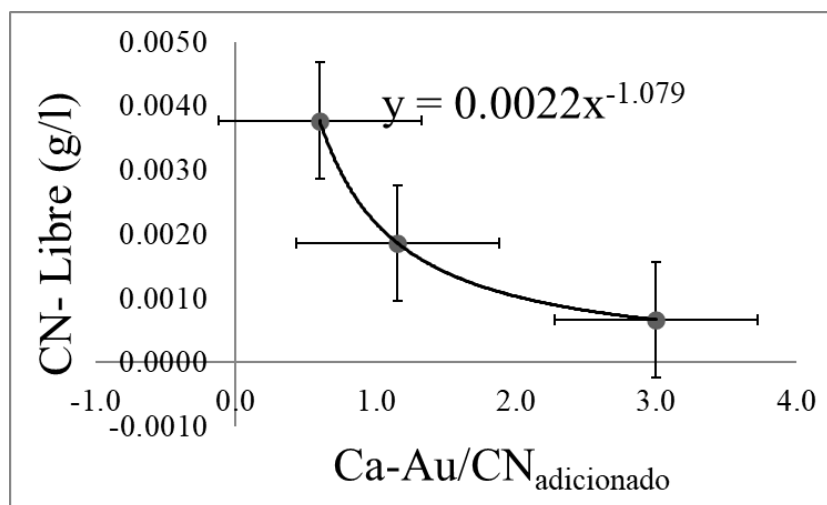


Figura 4.16. Resultados de cuantificación de cianuro libre (CN⁻) en la solución binaria Au-Ca, con diferentes relaciones Ca/CN_{adicionado}. [Au]= 50 ppm; [Ca] = 250 ppm.

Para todas las soluciones binarias, el punto en el que se añadió un exceso de cianuro (CN), se observa que, a pesar de la mayor concentración de CN, no se evidencia pasivación. Esto contrasta con lo señalado por Habashi [23], quien menciona que, a concentraciones elevadas de cianuro, puede ocurrir pasivación durante el proceso de cianuración. En los tres escenarios estudiados (adición de menos CN del calculado, adición exacta, y exceso de CN), los metales presentes reaccionan completamente con el cianuro. Sin embargo, solo en el caso del exceso

de CN se detectó cianuro libre en solución, mientras que en los otros dos casos no quedó CN^- .

Al incluir en una sola figura todas las relaciones $\text{Me}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ para todas las soluciones, unitarias y binarias, se obtiene lo mostrado en la Figura 4.17.

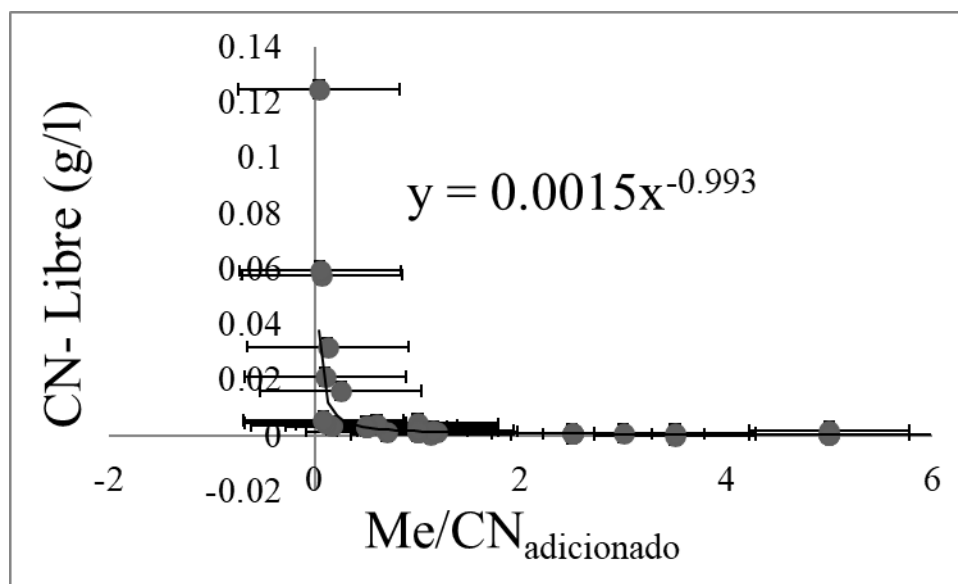


Figura 4.17. Resultados de cuantificación de CN^- libre para todas las relaciones $\text{Me}/\text{CN}_{\text{adicionado}}$ en soluciones unitarias y binarias.

De la figura anterior, se aprecia que todas las relaciones se ajustan razonablemente a una misma función que permite establecer la concentración de cianuro libre para cualquier concentración de metal cianicida y el cianuro adicionado al sistema acuoso.

Al conocer la concentración de los metales cianicidas en el sistema es posible determinar la cantidad de cianuro que se debe adicionar para que el cianuro libre sea menor o cercano a 0.0001 g/l, lo que ayudará a evitar el exceso de cianuro adicionado.

4.4.5 Identificación de los complejos CN-Metal por la técnica de UV-VIS.

Las soluciones analizadas mediante esta técnica mostraron evidencia de la formación de los complejos $\text{Me}(\text{CN})_2$ para los metales Mg, Fe, Cu, Au y Ca (ver Figura 4.18). En el caso del hierro (Fe), se identificó la especie $\text{Fe}(\text{CN})_6$, como se muestra en la Figura 4.18, inciso b). Los espectros de absorción UV-VIS de las soluciones cianuro-metal exhiben bandas

prominentes alrededor de 300 nm. Estas bandas se atribuyen a las especies Mg-CN, Fe-CN, Cu-CN, Au-CN y Ca-CN.

Por lo tanto, estas bandas se asocian a la formación de dichas especies en una comparación con las bandas de absorción reportadas tanto para el compuesto de cianuro (CN) [27] y los metales individuales (Mg, Fe, Cu, Au y Ca), cuyas longitudes de onda no coinciden con los espectros obtenidos experimentalmente.

Para el magnesio (Mg), Talaat M. Hammad y colaboradores [28] registraron una banda de absorción en 325 nm; en el caso del hierro (Fe), Besma Anfal Dekkiche identificó una banda en 300 nm [29]; respecto al cobre (Cu), Ruixue Kang y colaboradores reportaron una banda en 375 nm [30]; para el oro (Au), Fraga López reportó una banda de absorción en 325 nm [31]; y, finalmente, para el calcio (Ca), Cai Xix y colaboradores informaron una banda en 225 nm [32].

De lo anterior, se concluye que las diferencias en las longitudes de onda observadas experimentalmente se deben a la formación de los complejos mencionados (ver Figura 4.18 incisos a), b), c), d) y e)). Por otro lado, para la especie $\text{Au}(\text{CN})_2$, como se observa en la Figura 4.18, inciso e), los resultados coinciden con lo reportado por Keita Kuroiwa y colaboradores, quienes indican que esta especie presenta una banda entre 280-300 nm [33].

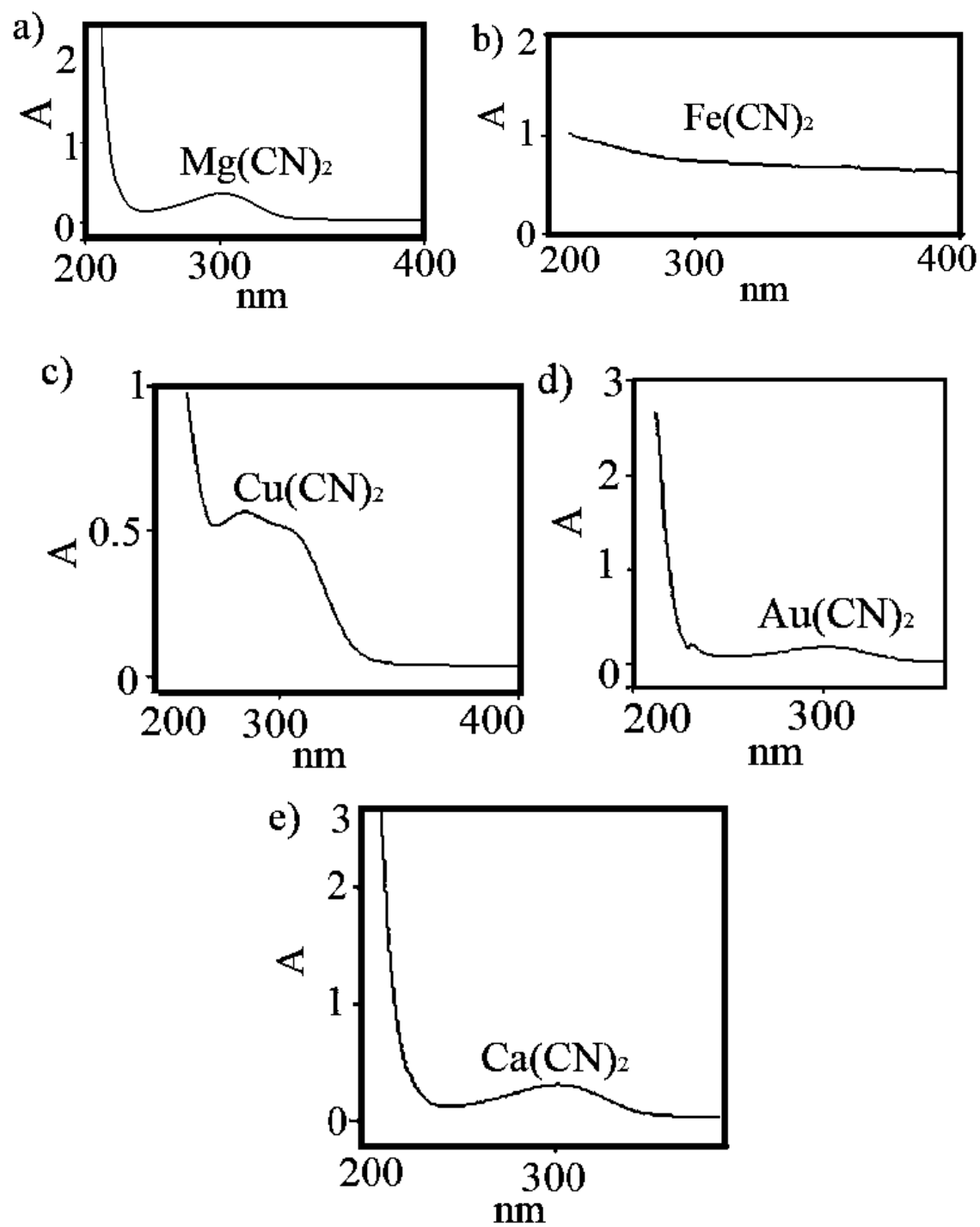


Figura 4.18. Espectros de UV-VIS de las especies a) Mg-CN , b) Fe-CN , c) Cu-CN , d) Ca-CN y e) Au-CN .

4.4.6 Solución con todos los elementos.

A continuación, se presentan los resultados de la cuantificación de CN^- en soluciones sintéticas que contienen la mezcla de todos los elementos cianicidas.

Tabla 4.4. CN total adicionado calculado y CN^- determinado por volumetría.

$\text{CN}_{\text{adicionado}}$ (g/l)	CN^- (g/l)
0.82	0.00011

De la Tabla 4.4 se observa el total de CN calculado equivalente a 2.76 % a partir de las soluciones unitarias, correspondiente a la cantidad necesaria para garantizar que la concentración de CN^- en solución sea igual a cero. El total de CN añadido fue de 0,82 g/l para un volumen de 50 ml. Tras realizar la titulación volumétrica, se determina que la concentración de CN^- en la solución fue de 0.00011 g/l, lo cual es prácticamente nulo. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de corroborar que la cantidad de CN calculada en las soluciones unitarias (Me-CN) fue la adecuada para evitar la presencia de CN^- .

4.5 Prueba exploratoria de lixiviación del mineral.

En este apartado se analizan y discuten los resultados obtenidos de la lixiviación del mineral aurífero real, realizada como prueba exploratoria, utilizando soluciones con diferentes concentraciones de cianuro: una por debajo del porcentaje calculado por medio de las soluciones sintéticas, otra correspondiente al porcentaje calculado y una tercera con un exceso de cianuro. La discusión se presenta de manera individual para cada elemento cianicida (Au, Cu, Fe, Mg y Ca).

En las soluciones preñadas se determinó el contenido de cianuro libre, obteniéndose los siguientes resultados: con una adición del 1% de CN permanecieron 0.00039 g/l de CN^- en solución; con una adición del 2.76%, quedaron 0.0009 g/l de CN^- ; y con una adición del 600%, permanecieron 0.13 g/l de CN^- (ver Tabla 4.5). En este último caso, durante el proceso de lixiviación se observó la formación progresiva de una capa blanca, la cual fue retirada y disuelta al finalizar el ensayo. El análisis confirmó la presencia de cianuro, lo que indica que

el exceso de reactivo deja de participar en la reacción con el mineral y tiende a precipitar nuevamente en forma sólida.

Estos resultados evidencian que, para este mineral, no es necesaria la adición de un exceso de cianuro, ya que un aumento en la concentración del reactivo no mejora la disolución del oro. Por el contrario, conduce a la acumulación de cianuro libre en la solución, lo que representa un uso ineficiente del reactivo y la generación de residuos innecesarios.

Tabla 4.5. Porcentaje de CN adicionado para la lixiviación, CN^- resultante.

CN adicionado (%)	CN^- (g/l)
1	0.00039
2.76	0.0009
600	0.13

4.5.1 Lixiviación de Au.

En la Figura 4.19 se puede observar de manera general que la concentración de Au aumenta en la solución preñada con la adición de CN. El porcentaje de recuperación de Au fue significativamente mayor en el caso de la adición del 600 % de CN (ver Tabla 4.6). Sin embargo, este aumento también produjo un incremento notable en la cantidad de cianuro libre, lo que podría generar graves problemas de contaminación, un aspecto que se busca minimizar en este estudio (ver Tabla 4.5). Por otra parte, esta concentración puede estar relacionada con interferencias en la cuantificación mediante espectroscopía de absorción atómica. De acuerdo con el análisis de fluorescencia de rayos X, la arena molida (AM) contiene un 20,2 % de hierro. Durante la lixiviación, la disolución de este elemento incrementa su presencia en la solución preñada, lo que genera interferencias al momento de determinar la concentración de oro. Esto se debe a que el hierro presenta una respuesta analítica con una linealidad comparable a la del oro, lo que provoca que, en muestras con alto contenido de hierro, los valores de oro cuantificados puedan resultar sobreestimados o alterados.

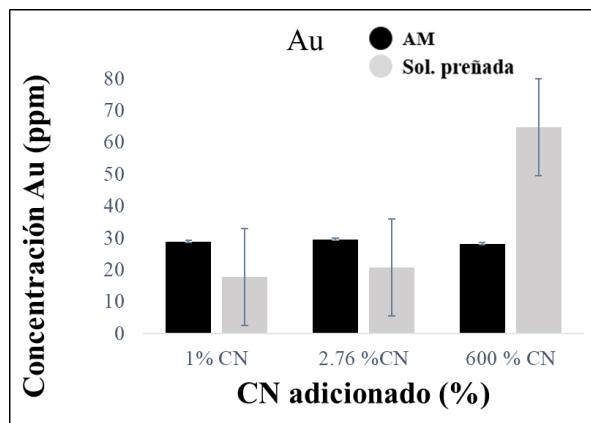


Figura 4.19. Concentración de Au en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.

Tabla 4.6. Concentración de Au en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).

% CN adicionado	[Au] AM (g/ton)	[Au] Sol. (ppm)
1	28.79	17.58
2.76	29.52	20.643
600	28.13	64.628

Por lo tanto, se sugiere agregar el porcentaje calculado correspondiente al 2.76%, ya que este valor asegura un porcentaje de recuperación de oro viable y, al mismo tiempo, minimiza la presencia de CN^- en las soluciones residuales.

4.5.2 Lixiviación de Fe.

En la Figura 4.20 se observa que a medida que aumentaba el porcentaje de cianuro, también se incrementaba la concentración de Fe en solución (ver Tabla 4.7); Sin embargo, esta no fue suficiente para recuperar todo el hierro presente en el mineral de cabeza. Aunque termodinámicamente el hierro es un elemento altamente cianicida, no se disuelve por completo, incluso en la solución con el mayor exceso de cianuro.

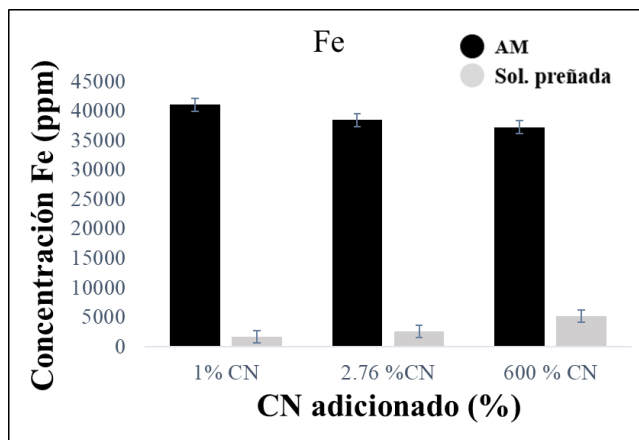


Figura 4.20. Concentración de Fe en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.

Por lo anterior, de acuerdo con J. Marsden y I. House [4], la solubilidad del hierro en cianuro depende de las especies en las que se encuentre en el mineral. Si el hierro está presente en forma de óxidos, estas especies no son solubles en cianuro, mientras que, si se encuentra en forma de sulfuros, presenta una mayor afinidad y solubilidad. Por lo tanto, se deduce que, en este caso, el mineral contiene ambas especies de hierro, lo que explica el comportamiento observado.

Tabla 4.7. Concentración de Fe en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).

% CN adicionado	[Fe] AM (g/ton)	[Fe] Sol. (ppm)
1	40974.6	1700.3
2.76	38413.5	2539.4
600	37198.9	5160

4.5.3 Lixiviación de Mg.

En la Imagen 4.21 y la Tabla 4.8 se observa que, en ninguno de los tres casos, se presentó disolución de magnesio (Mg). Esto puede explicarse a partir del diagrama de estabilidad de Pourbaix [33], (véase Figura 4.22). En dicho diagrama se muestra la formación del compuesto $Mg(OH)_2$, el cual se genera de manera espontánea y presenta una alta estabilidad debido a la presencia de H_2O y O_2 , junto con el magnesio, a un pH de 11.5, que fue el valor

alcanzado durante la lixiviación. Esta estabilidad dificulta considerablemente la disolución del magnesio en presencia de cianuro (CN^-).

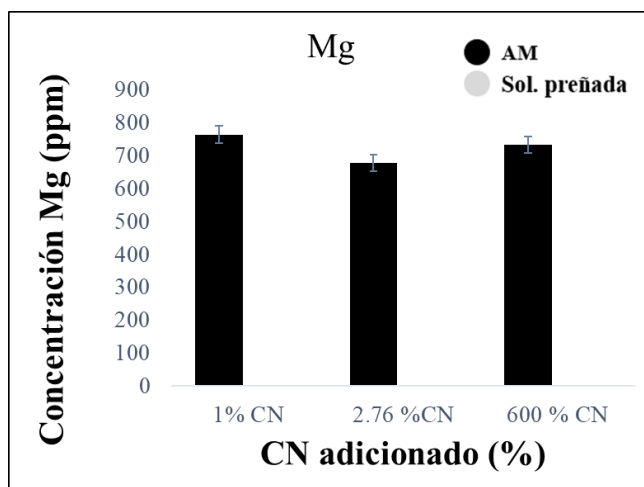


Figura 4.21. Concentración de Mg en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.

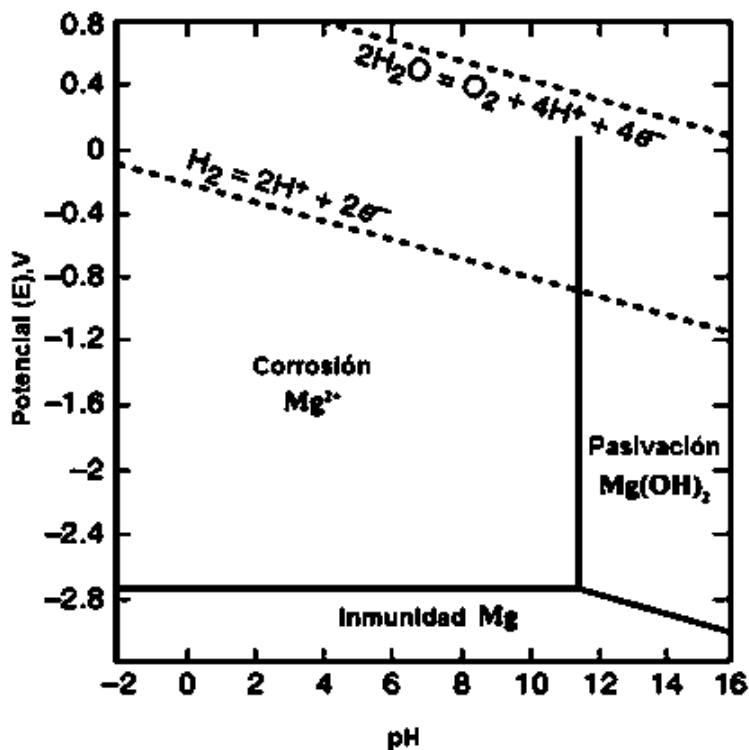


Figura 4.22. Diagrama de Pourbaix del Mg en H_2O pura [33].

Tabla 4.8. Concentración de Mg en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).

% CN adicionado	[Mg] AM (g/ton)	[Mg] Sol. (ppm)
1	762.3	0
2.76	675.7	0
600	731.1	0

Por otro lado, en la Gráfica 4.21 se observa una ligera variación en las barras correspondientes a la muestra de arena molida (AM), a pesar de tratarse de la misma muestra analizada. Esta diferencia puede deberse a las condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones, ya que los resultados obtenidos por EAA suelen presentar ligeras discrepancias asociadas tanto a la preparación de las muestras como a las condiciones operativas del equipo.

4.5.4 Lixiviación de Ca.

En cuanto a la lixiviación del calcio, como se observa en la Figura 4.23, prácticamente no ocurrió su disolución (ver Tabla 4.9). A pesar de que termodinámicamente el calcio es un elemento cianicida, Fathi Habashi [23] explica que, al ser un metal alcalinotérreo del grupo 2, tiende a formar compuestos iónicos estables como carbonatos (CaCO_3) o hidróxidos (Ca(OH)_2) en presencia de agua y en condiciones de pH alcalino. Esto limita su reactividad con el cianuro, favoreciendo la formación de estos compuestos estables en lugar de complejos cianurados como se muestra en el diagrama de Pourbaix en la Figura 4.24 [34].

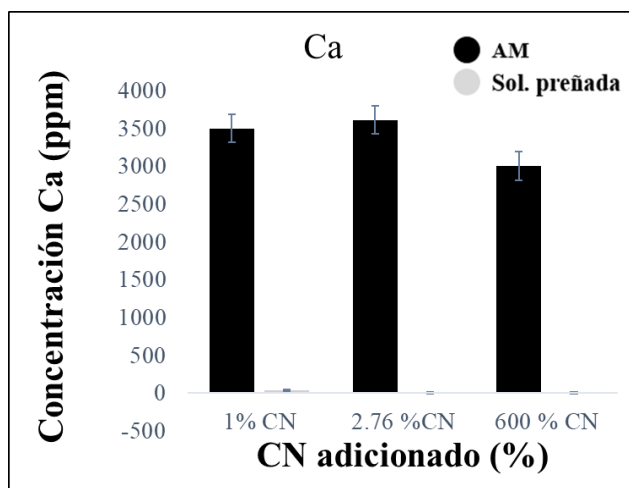


Figura 4.23. Concentración de Ca en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.

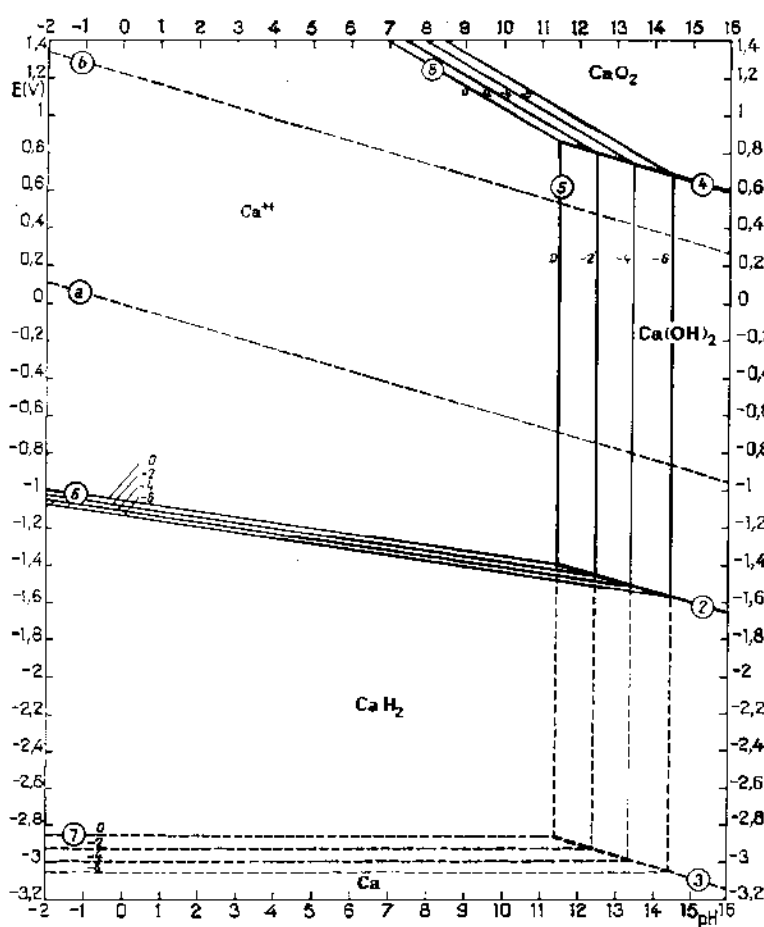


Figura 4.24. Diagrama de equilibrio potencial-pH para el sistema calcio-agua, a 25°C [33].

Tabla 4.9. Concentración de Ca en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).

% CN adicionado	[Ca] AM (g/ton)	[Ca] Sol. (ppm)
1	3500.9	36
2.76	3614.1	4.8
600	3005	0

Por lo tanto, aunque el calcio puede interactuar con algunos aniones presentes en solución, no forma complejos solubles con el cianuro de manera significativa, como sí ocurre con metales más afines, como el oro, durante la lixiviación. Esto limita su participación en el proceso de disolución. Por esta razón, en la práctica se utiliza cal para regular el pH; Mientras no haya un exceso de esto, actúa como un regulador eficiente, manteniendo condiciones óptimas sin generar interferencias en el proceso.

4.5.5 Lixiviación de Cu.

La gráfica 4.25 muestra que las concentraciones de cobre en la solución preñada son considerablemente altas. Se observa que, a medida que se agrega cianuro, la concentración de cobre en solución aumenta; Sin embargo, cuando se agrega un exceso de cianuro, la disolución se reduce. Esto puede explicarse por la pasivación del cobre, ya que el cianuro podría comenzar a reaccionar con otros elementos menos cianicidas presentes en la solución o por la falta de oxígeno, un factor clave en la cianuración, como lo menciona Fathi Habashi [23].

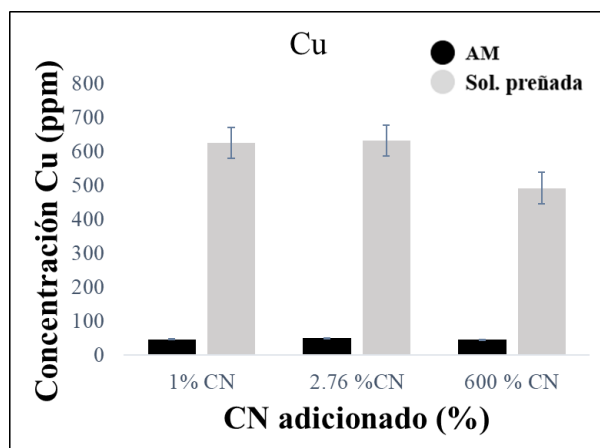


Figura 4.25. Concentración de Cu en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada) en función del cianuro adicionado en la lixiviación.

Tabla 4.10. Concentración de Cu en arena molida (AM) y solución preñada (sol. preñada).

% CN adicionado	[Cu] AM (g/ton)	[Cu] Sol. (ppm)
1	47	626.5
2.76	49.8	631.9
600	45.5	492.5

Por otro lado, la concentración de cobre aumenta de 47 ppm en la arena molida (AM) a más de 600 ppm en las soluciones lixiviantes, como se muestra en la Tabla 4.10. Aunque este incremento pueda parecer inusual, se explica por la reducción del tamaño de partícula, lo que favorece la liberación de especies de cobre solubles en cianuro. En contraste, durante la digestión con agua regia y ácido fluorhídrico, aun cuando la AM se somete a condiciones de temperatura y presión mediante microondas para facilitar la disolución completa, persiste la presencia de partículas finas al momento de cuantificar el mineral por EAA. Por esta razón, es necesario centrifugar la muestra para evitar introducir sólidos al equipo. En consecuencia, las partículas que no logran digerirse pueden retener una cantidad significativa de cobre, lo que impide que se reporte la totalidad de este elemento en la cuantificación de la muestra AM.



De acuerdo con las gráficas 4.19, 4.20 y 4.25, se observa que, conforme aumenta el porcentaje de cianuro adicionado en las tres condiciones evaluadas, el cobre (Cu) es el primero en reaccionar con el cianuro. Sin embargo, cuando se añade un exceso de reactivo, el comportamiento del Cu difiere de los dos primeros casos, lo que sugiere una posible pasivación del metal ante la alta concentración de cianuro. Una vez que el Cu se encuentra pasivado, se incrementa ligeramente la disolución del hierro (Fe) conforme aumenta la cantidad de cianuro disponible. No obstante, este incremento no es suficiente para lixiviar todo el hierro presente en la muestra, debido a que la especie de óxido de hierro identificada mediante difracción de rayos X (como se señala en el apartado 4.5.2) no presenta afinidad con el cianuro. Finalmente, tras la reacción de los cianicidas anteriores con el cianuro, se favorece la disolución del oro (Au), cuya reacción aumenta conforme se incrementa la adición de cianuro en los tres casos analizados.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- Se estableció la relación $Me/CN_{adicionado}$ que asegura la disolución de las especies cianicidas contenidas en una solución sintética, con cianuro residual ≤ 0.001 g/l en la solución preñada.
- De acuerdo con la termodinámica, el orden de reactividad cianicida es: $Ca > Mg > Fe > Cu > Au$. Sin embargo, en la cianuración del mineral, este orden cambió, estableciéndose como: $Cu > Au > Fe > Ca > Mg$. Este cambio se atribuye a la posible formación de complejos más estables (hidróxidos, carbonatos), que son termodinámicamente menos afines al cianuro.
- De los resultados con las soluciones sintéticas que involucra todos los elementos cianicidas, se propone una ecuación de correlación:

$$CN^- (g/l) = 0.0015 \left(\frac{Me}{CN_{Adicionado}} \right)^{-0.993}$$

- De la ecuación anterior, conociendo el porcentaje de metales cianicidas, se calcula la cantidad necesaria de cianuro para asegurar la disolución de las especies cianicidas incluyendo el oro. Esto evita la excesiva adición de cianuro y por lo tanto la contaminación del agua y suelo.
- Durante la lixiviación del mineral, utilizando la concentración calculada de cianuro necesaria para disolver las especies cianicidas, se logró una recuperación de oro del 76 %.
- Es necesario estudiar más a fondo el papel de otros elementos en el mineral que evitan mayor recuperación de oro.
- El método de volumetría permite la cuantificación precisa y reproducible del cianuro libre; sin embargo, las leves variaciones en las mediciones se atribuyen a la exactitud en el pesaje del NaCN y a la identificación de la turbidez que marca el punto final de la titulación.
- Se propone el procedimiento de lixiviación con cianuro para un mineral aurífero, viable para su aplicación a nivel planta, consta de los siguientes pasos:

1. **Caracterización del mineral:** Se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo del mineral para conocer su composición y propiedades.
2. **Determinación del porcentaje óptimo de cianuro por el método de volumetría:** Mediante soluciones sintéticas unitarias, se establece la cantidad de cianuro necesaria para reaccionar con los elementos cianicidas presentes en la muestra.
3. **Lixiviación del mineral:** Una vez determinado el porcentaje óptimo de cianuro, se lleva a cabo la lixiviación del mineral. Este proceso garantiza una disolución de oro superior al 70 % sin generar un exceso de cianuro libre en los residuos.

REFERENCIAS

- [1] I. T. R. Aleida Azamar Alonz, *Minería en México: panorama social, ambiental y economico*, Ciudad de México: ISBN SEMARNAT, 2022.
- [2] E. M. y. c. Garcia-Rosales, *Principios termodinámicos y cinéticos de la cianuración de oro y sus efectos en el proceso.*, Coahuila: Facultad de Ciencias Químicas, UAdeC, 2021.
- [3] D. y. c. Lovera, *Procesos de tostación - lixiviación de minerales auríferos con metales cianicidas*, Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, 2002.
- [4] J. & H. I. Marsden, *The Chemistry of Gold Extraction*, Colorado, USA: The Society For Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2006.
- [5] J.-. A. Ticona-Rueda, *Estudio de la Concentración por Flotación Inversa de la Pirolusita a Partir de Minerales de Baja Ley*, La Paz-Bolivia, 2014.
- [6] C.-K. Pamiez-Caro, *Comparación de metodologías para la determinación de recursos minerales en un yacimiento de hierro considerando la densidad de roca*, Santiago de Chile, 2024.
- [7] J. A. G. Torres, *Carbón activado de carácter básico para*, San Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., 2016.
- [8] J. O. G. G. D. Alba, *Lixiviación de especies de oro de un mineral aurífero*, Morelia: Instituto de Investigación en Materiales y Metalurgia, 2013.
- [9] M. P. C. Severo, *Lixiviación de menas auríferas con sales oxidantes en medio ácido mediante el proceso severo*, Lima- Peru: Revista del instituto de investigaciones de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas., 2002.

-
- [10] E. E.-R. A. U.-S. y. R. P.-G. F. Nava-Alonso*, *Análisis químico de cianuro en el proceso de cianuración: revisión de los principales métodos.*, Madrid: Revista de metalurgia, 2007.
- [11] S. M. C. o. t. A. P. H. Association, *4500-cn- cyanide In: Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*, Washintongton DC: Lipps WC, Baxter TE, Braun-Howland E, editors.
- [12] A. I. S. Worldwide, *Standard Test Methods for Cyanides in Water*, American Society for Testing and Materials, 91.
- [13] K. J. M. Cabrera, *Carbon activado para la absorcion de oro de soluciones cianuradas a partir de carbones minerales*, Santiago Cali: Universidad del Valle, 2017.
- [14] C. F. a. R. P. M.J. Nicol, *The Chemistry of the Extraction of Gold*, Council for Mineral Technology (Mintek), 1989.
- [15] T. M. A. A. Mike botz, *Cyanide Treatment: Physical, Chemical and Biological Processes*, Elsevier, 2016.
- [16] P. Afenya, *Treatment of carbonaceous refractory gold ores*, Elsevier, 1991.
- [17] M. C. S. Choque, *RECUPERACION DE ORO DE FILTROS DE CARBON ACTIVADO EN LA EMPRESA EXPORTADORES BOLIVIANOS S.R.L.*, La Paz: Universidad Mayor de San Andres, 2013.
- [18] M. A. LC, *Electrodeposicion del oro*, SCRIBD.
- [19] M. C. H. K. N. & T. H. Fuerstenau, *Principles of Mineral Processing.*, SME, 2003.
- [20] M. D. Adams, *Advances in gold ore processing*, Western Australia: B. A. Wills, 2005.
- [21] S. M. Bulatovic, *Handbook of Flotation Reagents: Chemistry, Theory and Practice*, Waltham: Elsevier, 2015.
-

-
- [22] E. y. c. Salinas, *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata, mediante la preoxidación de minerales sulfurosos con ozono*, Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2004.
- [23] F. Habashi, *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*, Montana: BUREAU OF MINES AND GEOLOGY, 1967.
- [24] J. A. Gasca-Torres, *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados*, San Luis Potosí, S.L.P: IPICYT, 2016.
- [25] A. S. f. T. a. Materials, *Standard Test Method for Cyanides in Water ASTM D7511-18*, ASTM International, 2018.
- [26] A. P. H. Association, *Standard Test Method for Cyanides in Water Method 4500-CN C*, American Public Health Association, 2017.
- [27] C. C. A. M. D. Oliveros-Bastidas Alberto de J., Estudio por espectrofotometría UV-Vis de la reacción entre los iones cianuro y picrato. un ejemplo práctico de aplicaciones analíticas y estudios cinéticos, Bogotá: Revista Colombiana de Química, 2009.
- [28] J. S. Talaat M. Hammad, *Optical Properties of Mg- and Ni- Doped Ag₂S Colloidal Nanoparticles*, 2018.
- [29] D. N. S. N. S. T. Anfal-Dekkiche Bisma, Effect of Natural and Artificial Light on Fe(III) Organic Complexes Photolysis: Case of Fe (III)-Malonate and Fe(III)-Malate, 2018.
- [30] J. L. B. L. Z. P. Ruixue Kang, *Copper Galvanic Replacement on Aluminum from a Choline*, ECS, 2014.
- [31] S.-T. V.-H. M.-O. J. Fraga-Lopez Francisco, Estudio calorimétrico de nanocompuestos de sistema epoxídico DGEBA n = 0/m-XDA con nanopartículas de oro, Revista Iberoamericana de Polímeros, 2010.
-

-
- [32] L. Z. S. W. P. R. Xixi Cai, Fabrication and characterization of the nanocomposite of whey protein hydrolysate chelated, Food Funct, 2015.
- [33] Y. M. Y. K. T. J. D. Keita Kuroiwa, Autoensamblaje de complejos metálicos discretos en solución acuosa mediante copolipéptidos anfifílicos en bloque, International Journal of Molecular Sciences, 2013.
- [34] M. Pourbaix, Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions, Houston, Texas, USA: NATIONAL ASSOCIATION of CORROSION ENGINEERS , 1974.
- [35] C. Octavio-Hinojosa, «Concentración gravimétrica de menas auríferas,» *Revista Metalúrgica UTO*, p. 42, 2016.
- [36] I. I. R. F. R. C. F. P. J. H. Eleazar Salinas, *Mejora del proceso de cianuración de oro y plata*, Hidalgo: Soc. Quím. Méx, 2004.
- [37] C. m. d. México, «La industria minera de México,» camimex, México, 2006.
- [38] D. A.-Skoog, D. M.-West, F.-J. Holler y S. R.-Crouch, Fundamentos de química analítica, D.F.: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V, 2015.
- [39] N. Campillo-Seva, *Introducción al análisis volumétrico*, Murcia, España: Universidad de Murcia, 2011.
- [40] Carbotecnia, *Intercambio iónico*, Carbotecnia, 2022.
- [41] M. & B. H. Avedesian, *Magnesium and Magnesium Alloys*, EUA: ASM, 1999.

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



A quien corresponda,

Por este medio, quien abajo firma, bajo protesta de decir verdad, declara lo siguiente:

- Que presenta para revisión de originalidad el manuscrito cuyos detalles se especifican abajo.
- Que todas las fuentes consultadas para la elaboración del manuscrito están debidamente identificadas dentro del cuerpo del texto, e incluidas en la lista de referencias.
- Que, en caso de haber usado un sistema de inteligencia artificial, en cualquier etapa del desarrollo de su trabajo, lo ha especificado en la tabla que se encuentra en este documento.
- Que conoce la normativa de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, en particular los Incisos IX y XII del artículo 85, y los artículos 88 y 101 del Estatuto Universitario de la UMSNH, además del transitorio tercero del Reglamento General para los Estudios de Posgrado de la UMSNH.

Datos del manuscrito que se presenta a revisión		
Programa educativo		
Título del trabajo		
	Nombre	Correo electrónico
Autor/es		
Director		
Codirector		
Coordinador del programa		

Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Asistencia en la redacción		

Formato de Declaración de Originalidad y Uso de Inteligencia Artificial

Coordinación General de Estudios de Posgrado
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Uso de Inteligencia Artificial		
Rubro	Uso (sí/no)	Descripción
Traducción al español		
Traducción a otra lengua		
Revisión y corrección de estilo		
Análisis de datos		
Búsqueda y organización de información		
Formateo de las referencias bibliográficas		
Generación de contenido multimedia		
Otro		

Datos del solicitante	
Nombre y firma	
Lugar y fecha	

Esmeralda Yairey García Alcázar

RELACIÓN CIANURO DE SODIO CIANICIDAS EN SOLUCIONES SINTÉTICAS, PARA LA LIXIVIACIÓN DE UN MI...

 Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid::3117:547394554

Fecha de entrega

19 ene 2026, 11:50 a.m. GMT-6

Fecha de descarga

19 ene 2026, 12:20 p.m. GMT-6

Nombre del archivo

RELACIÓN CIANURO DE SODIO CIANICIDAS EN SOLUCIONES SINTÉTICAS, PARA LA LIXIVIACIÓN D....pdf

Tamaño del archivo

2.3 MB

82 páginas

18.683 palabras

105.381 caracteres

13% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 10 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.