



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE



TESIS

RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CON TIOUREA PARA MINERAL AURÍFERO EN OLLACHEA - PUNO

PRESENTADA POR:

JULIO ALBERTO MAQUERA GIL

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2024

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

**RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCE
SO DE LIXIVIACIÓN CON TIOUREA PARA
MINERAL AURÍFERO EN OLLACHEA - PU**

AUTOR

JULIO ALBERTO MAQUERA GIL

RECuento DE PALABRAS

15706 Words

RECuento DE CARACTERES

86564 Characters

RECuento DE PÁGINAS

97 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

22.0MB

FECHA DE ENTREGA

Oct 15, 2024 7:25 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Oct 15, 2024 7:26 PM GMT-5

● **10% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 4% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 12 palabras)


Dr. A. Walter Sarmiento Sarmiento
DOCENTE - EPG


Ing. Estadístico e Informático
CIP. 116625

Resumen



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
ESCUELA DE POSGRADO
DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE

TESIS

**RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CON
TIOUREA PARA MINERAL AURÍFERO EN OLLACHEA - PUNO**



PRESENTADA POR:

JULIO ALBERTO MAQUERA GIL

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

APROBADA POR EL JURADO SIGUIENTE:

PRESIDENTE

.....
PhD. SABINO ATENCIO LIMACHI

PRIMER MIEMBRO

.....
Dra. SOFIA LOURDES BENAVENTE FERNANDEZ

SEGUNDO MIEMBRO

.....
D.Sc. PEDRO ALVARO EDWIN GALLEGOS PASCO

ASESOR DE TESIS

.....
D.Sc. ANTONIO WALTER SARMIENTO SARMIENTO

Puno, 03 de julio de 2024.

ÁREA: Ciencias de la Ingeniería.

TEMA: Recuperación de oro por el proceso de lixiviación con tiourea para mineral aurífero en Ollachea-Puno.

LÍNEA: Geología, Minas y Metalurgia.



DEDICATORIA

A la memoria de mis queridos padres (+). Pedro y Juana, que me dejaron sus sabias enseñanzas, los que me llevaron a ser siempre perseverante en la vida. Y el motivo de luchar por cada una mis metas. A mi esposa Beatriz, a mis hijos Rafael y Fernanda por el apoyo que siempre me brindaron para lograr mis objetivos.

A mis hermanos Marcia, David (+), Celia, Aníbal, Isela por el apoyo moral cada momento de mi vida y seguir siempre adelante.

Julio Alberto



AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Dios, a San Miguel Arcángel, por la vida y la buena salud que nos brinda para poder desarrollarme profesionalmente.

Un agradecimiento sincero a todo el personal de la labor minera Balcón Dorado Por todo el apoyo y amistad que me brindaron.

A mis jurados por ser los consejeros para la realización del presente trabajo.

Julio Alberto



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	vii
ACRÓNIMOS	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1	Marco teórico	5
1.1.1	Oro	5
1.1.2	Lixiviación de oro: alternativas a la cianuración	6
1.1.3	Uso de tiourea en la extracción de oro	6
1.1.4	Reacción Comparativa: Tiourea vs. Cianuro	9
1.1.5	Análisis de los datos de equilibrio de complejos no cianurados de oro	13
1.1.6	Lixiviación del oro con tiourea	18
1.1.7	Parámetros Críticos de la Lixiviación con Tiourea:	18
1.2	Antecedentes	22
1.2.1	Internacionales	22
1.2.2	Nacionales	27
1.2.3	Locales	28

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1	Identificación del problema	30
2.2	Enunciados del problema	31
2.2.1	Problema general	31
2.2.2	Problemas específicos	31
2.3	Justificación	32
		iii



2.4	Objetivos	33
2.4.1	Objetivo general	33
2.4.2	Objetivos específicos	33
2.5	Hipótesis	33
2.5.1	Hipótesis general	33
2.5.2	Hipótesis específicas	33

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	Lugar de estudio	34
3.2	Población	34
3.3	Muestra	34
3.4	Materiales	35
3.5	Método de investigación	35
3.6	Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	36
3.6.1	Caracterización del mineral, a ser tratado para la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación con tiourea	36
3.6.2	Determinación de la eficiencia de recuperación de oro por lixiviación con tiourea	37

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	Resultados	41
4.1.1	Características químicas y mineralógica del mineral aurífero en Ollachea – Puno	41
4.1.2	Recuperación de oro por lixiviación con de tiourea	43
4.2	Discusión	50
4.2.1	Caracterización Química del Mineral	50
4.2.2	Recuperación de Oro por Lixiviación con Tiourea	51

CONCLUSIONES	54
--------------	----

RECOMENDACIONES	55
-----------------	----

BIBLIOGRAFÍA	56
--------------	----

ANEXOS	61
--------	----



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Lixiviantes alternativos al cianuro	10
2. Constantes de Estabilidad y Potenciales de Reducción Estándar para Complejos de Oro a 25°C	15
3. Composiciones químicas del mineral aurífero (% en masa)	41
4. Composición mineralógica del mineral aurífero.	42
5. Porcentaje de recuperación	43
6. Análisis de la varianza	45
7. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)	45
8. Shapiro-Wilks (modificado)	45
9. Prueba T para muestras Independientes	46
10. Análisis de la varianza	47
11. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)	47
12. Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)	47



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
1. Diagrama Eh-pH que muestra las regiones típicas de funcionamiento de los lixiviantes del oro	16
2. Ubicación de la comunidad minera de Ollachea	34
3. Análisis de Varianza	46
4. Comparación de recuperación de oro (mg/l) mediante cianuro y tiourea (promedio – prueba de Tukey)	48
5. Regresión de la comparación de recuperación de oro (mg/l) mediante cianuro y tiourea (promedio – prueba de Tukey)	49
6. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de los componentes químicos del mineral aurífero.	86
7. Promedios y desviación estándar de las concentraciones de los componentes mineralógicos del mineral aurífero.	86
8. Promedios y desviación estándar de la recuperación de oro mediante cianuro y tiourea.	87



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Matriz de consistencia	61
2. Resultados de pruebas de barrido electrónico SEM	62
3. Resultados de pruebas de determinación de elementos químicos por ensayos de fuego y AA	76
4. Registro Fotográfico	80
5. Gráficos estadísticos	86



ACRÓNIMOS

%	:	Porcentaje
°C	:	Grados centígrados
µm	:	Micra
Bar	:	Unidad de presión
Cal	:	Caloría
cal/°K	:	Caloría por grado kelvin
Cal/g	:	Caloría por gramo
cm ²	:	Centímetro cuadrado
cm ² /seg	:	Centímetro cuadrado por segundo
cm ³	:	Centímetro cúbico
Eh	:	Potencial rédox
g	:	Gramo
g/ cm ³	:	gramo por centímetro cubico
g/lt	:	Gramo por litro
g/TM	:	Gramo por tonelada métrica
g/Tn	:	Gramo por tonelada
m ³ /h	:	Metros cúbicos por hora
mg/cm ²	:	Miligramo por centímetro cuadrado
mg/cm ² .h	:	Miligramo por centímetro cuadrado por hora
mg/lt	:	Miligramo por litro
min	:	Minuto
ml	:	Mililitro
mm	:	Milímetro
Oz/TM	:	Onza por tonelada métrica
pH	:	Potencial de Hidrógeno
t/h	:	Toneladas por hora
TM	:	Toneladas métricas

RESUMEN

En el Perú, la minería artesanal, como en Puno, utiliza técnicas obsoletas como la amalgamación con mercurio, causando emisiones significativas y riesgos ambientales; esta problemática aborda también la eficiencia del proceso de amalgamación cuya recuperación bordea el cincuenta por ciento. El objetivo de la investigación es recuperar oro por el proceso de lixiviación con tiourea a partir del mineral aurífero, comparar la eficiencia de recuperación entre la tiourea y la cianuración al modificar la concentración y el pH del medio de lixiviación. La metodología es cuantitativa experimental con un análisis estadístico de varianza paramétrico; incluye la preparación y clasificación de muestras de mineral, seguida de pruebas de lixiviación con cianuro y tiourea bajo diferentes condiciones de operación. Se realizaron análisis químicos y mineralógicos para caracterizar las muestras y se utilizan técnicas como espectroscopia de absorción atómica y ensayos de lixiviación. Los resultados muestran que el mineral estudiado es de naturaleza sulfurada, lo que sugiere una posible refractariedad. La lixiviación con tiourea demostró ser más rápida y selectiva que la cianuración, alcanzando tasas de disolución de oro del 96 % en comparación con el 46 % de la cianuración en el mismo tiempo de lixiviación. Sin embargo, los altos consumos de tiourea pueden implicar costos operativos elevados, aunque su uso justifica en minerales refractarios de alto tenor de oro. En conclusión, la lixiviación con tiourea presenta ventajas significativas en términos de velocidad y selectividad de disolución de oro, aunque se debe considerar cuidadosamente su viabilidad económica en comparación con la cianuración.

Palabras clave: Cianuro, estabilizadores, extracción de oro, lixiviación, tiourea.

ABSTRACT

In Peru, artisanal mining, such as in Puno, uses obsolete techniques such as mercury amalgamation, causing significant emissions and environmental risks. The objective of the investigation is to recover gold by the thiourea leaching process from gold-bearing ore, to compare the recovery efficiency between thiourea and cyanidation by modifying the concentration and pH of the leaching medium. The methodology is quantitative experimental with a parametric statistical analysis of variance; it includes the preparation and classification of ore samples, followed by cyanide and thiourea leaching tests under different operating conditions. Chemical and mineralogical analyses were performed to characterize the samples and techniques such as atomic absorption spectroscopy and leaching tests are used. The results show that the ore studied is sulfide-bearing in nature, suggesting possible refractoriness. Leaching with thiourea proved to be faster and more selective than cyanidation, achieving gold dissolution rates of 96% compared to 46% for cyanidation in the same leaching time. However, the high thiourea consumption may imply high operating costs, although its use is justified in refractory ores with high gold content. In conclusion, thiourea leaching presents significant advantages in terms of gold dissolution rate and selectivity, although its economic feasibility compared to cyanidation should be carefully considered.

Keywords: Cyanide, gold extraction, leaching, stabilizers, thiourea.



.....
Juan Marcos Aro Aro, Ph. D.
Ing. AGRQINDUSTRIAL
C.I.P. N 52422

INTRODUCCIÓN

El oro (Au), un metal precioso y químicamente inactivo, ocupa una posición esencial en la joyería, la economía y la tecnología industrial debido a su color brillante, alto precio, notable ductilidad y conductividad. Los principales procesos de la hidrometalurgia del oro son el pretratamiento, la lixiviación y la purificación. La lixiviación mediante cianuro siempre ha ocupado una posición dominante en la hidrometalurgia del oro (Hilson y Monhemius, 2006). Sin embargo, la cianuración es indeseable debido a la grave contaminación ambiental y al largo flujo del proceso (Johnson, 2015). La lixiviación con cianuro se inhibe gradualmente con la creciente preocupación por la salud y el medio ambiente, mientras que la lixiviación sin cianuro se convertirá en la corriente principal.

La extracción de oro es un proceso complejo y se han propuesto muchos métodos que incluyen separación por gravedad, flotación, amalgamación y lixiviación. La separación por gravedad es adecuada para minerales de oro con una gravedad específica grande y un tamaño de partícula grueso, como el oro de placer; mientras que el proceso de flotación es adecuado para minerales de oro con un tamaño de partícula más fino o minerales de sulfuro que contienen oro (Gül et al., 2012). El proceso de amalgamación utiliza la característica de que el oro puede ser humedecido selectivamente por mercurio para formar amalgama de oro (Au_2Hg_3 , Au_3Hg_4 , Au_4Hg_5 , Au_8Hg_{10}). El oro y el mercurio de la amalgama de oro se pueden separar calentando. Sin embargo, el mercurio y sus compuestos son tóxicos y tienen un impacto considerable en la salud humana; de ahí que este proceso esté siendo reemplazado paulatinamente por la lixiviación (Gonçalves et al., 2017). Actualmente, la lixiviación, particularmente la lixiviación con cianuro, es el proceso de extracción dominante de oro; sin embargo la lixiviación sin cianuro está atrayendo cada vez más atención y se han informado numerosos estudios de lixiviantes alternativos, como la tiourea (Guo et al., 2020), tiosulfato (Dong et al., 2019), polisulfuro (Guo et al., 2020), cloro (J. Li et al., 2023) y lixiviación halógena. Estos lixiviantes tienen mejores beneficios ambientales que el cianuro. Sin embargo, no se han aplicado ampliamente en la producción comercial (Aylmore, 2016), esto debido a las dificultades que presentan como por ejemplo: la lixiviación halógena puede extraer oro de manera eficiente, pero está limitado por la utilización de halógenos peligrosos y equipos adecuados resistentes a la corrosión, y los gases halógenos tóxicos se volatilizan fácilmente en el proceso de lixiviación de oro



(Hasab et al., 2014); La lixiviación con tiosulfato es una técnica rigurosa debido al alto consumo de tiosulfato y la alta contaminación por amoníaco (Tanriverdi et al., 2005). En comparación con los métodos mencionados anteriormente, la lixiviación de tiourea es más atractiva en términos de bajos riesgos ambientales, alta selectividad de impurezas, período de reacción corto, inversión de producción moderada, etc. (J. Li y Miller, 2002).

El presente estudio recuperación de oro por el proceso de lixiviación con tiourea para mineral aurífero en Ollachea - puno, haciendo lixivitaciones de oro con ambos métodos, para comparar el rendimiento en la recuperación de oro y generar procesos alternativos en la industria minera nacional.

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 Marco teórico

1.1.1 Oro

El oro, uno de los primeros metales nobles conocidos por el ser humano, ha sido objeto de fascinación desde tiempos ancestrales, utilizado tanto en monedas como en ornamentos que reflejan su estatus y valor. A lo largo de la historia, su brillo ha representado riqueza, poder y prestigio. En el siglo XIX, el oro se extraía directamente de yacimientos en la naturaleza, un proceso que conectaba al ser humano con la tierra de manera tangible y directa. Sin embargo, en la actualidad, la realidad de la minería de oro es mucho más compleja y desafiante. Con reservas estimadas en 54.000 toneladas, el oro sigue siendo el metal precioso más valioso del mundo. La demanda global ha crecido significativamente en los últimos años, alcanzando 4345 toneladas en 2018. Esta creciente demanda ha impactado su precio de mercado, que pasó de un promedio de US\$271/oz en 2001 a US\$1269/oz en 2012, según datos de Statista (2024). A pesar de su elevado valor económico, el proceso de extracción de oro ha evolucionado debido a la escasez de depósitos primarios y la disminución en la calidad de los mismos, lo que ha impulsado la necesidad de emplear técnicas más sofisticadas para obtener este valioso recurso (Oraby, 2009). Uno de los mayores desafíos en la extracción de oro actual proviene de los llamados depósitos refractarios y de baja ley. En estos depósitos, el oro se encuentra incrustado de manera muy fina en minerales sulfurosos como la pirita y arsenopirita, lo que dificulta su recuperación. Los minerales se clasifican como de molienda libre o refractarios, dependiendo del grado de extracción que se logra durante la lixiviación: en los de molienda libre, se pueden obtener más del 90 % del oro, mientras que, en los refractarios, la extracción suele ser inferior al 80 % (R.A. Williams, 1992). Aunque la extracción de oro continúa siendo una actividad rentable, en muchas regiones del mundo no es bien vista debido a su impacto ambiental y social. La minería moderna, a diferencia de las prácticas tradicionales, utiliza métodos que, si bien son más eficientes, también generan mayor preocupación en cuanto al uso de productos químicos, la degradación del medio

ambiente y las condiciones laborales de las comunidades involucradas. Esto ha llevado a que, en ciertos lugares, la minería de oro no sea aceptada socialmente, creando una brecha entre los beneficios económicos que genera y el costo social que implica su explotación (León, 2017). El oro, un símbolo de riqueza y prosperidad, es también un recordatorio de los desafíos que la humanidad enfrenta en su búsqueda por equilibrar el desarrollo económico con la protección de su entorno.

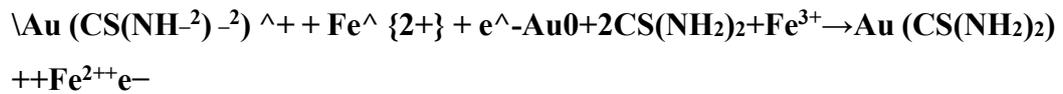
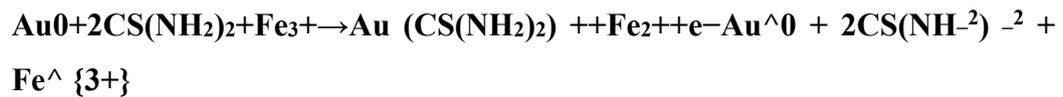
1.1.2 Lixiviación de oro: alternativas a la cianuración

El objetivo de la etapa de lixiviación es disolver el oro presente en el mineral en una solución acuosa para su posterior recuperación. Durante más de un siglo, la cianuración ha sido el método predominante en la industria debido a su alta eficiencia y bajos costos. Sin embargo, el uso del cianuro ha sido objeto de crecientes preocupaciones debido a su toxicidad, tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Esto ha limitado su aplicación en algunos contextos, forzando a la industria a explorar alternativas más seguras y sostenibles (Hilson y Monhemius, 2006).

En los últimos años, se han investigado más de 25 procesos lixiviantes alternativos al cianuro, siendo la tiourea uno de los métodos que ha mostrado un potencial considerable en aplicaciones específicas. La lixiviación con tiourea ofrece una alternativa menos tóxica y más ecológica para disolver el oro en minerales de baja ley o depósitos refractarios.

1.1.3 Uso de tiourea en la extracción de oro

La tiourea (NH_2CSNH_2) es un agente lixiviante que disuelve el oro en soluciones ácidas mediante la formación de un complejo catiónico de oro-tiourea. Este proceso ha sido investigado debido a sus ventajas medioambientales en comparación con el cianuro. La reacción básica que ocurre durante la lixiviación con tiourea es la siguiente:



En este proceso, la tiourea actúa como el agente disolvente, mientras que el ion férrico (Fe^{3+}) sirve como oxidante para facilitar la disolución del oro. El oro metálico se oxida formando un complejo soluble que puede ser recuperado posteriormente. A diferencia del cianuro, el uso de tiourea no genera subproductos peligrosos como el ácido cianhídrico (HCN).

A. Ventajas y Desafíos del Uso de Tiourea

A.1 Menor toxicidad

La tiourea es considerablemente menos tóxica que el cianuro, lo que reduce los riesgos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. Esto la convierte en una opción más segura en términos de manejo y almacenamiento, especialmente en operaciones a pequeña escala como la minería artesanal.

A.2 Impacto ambiental reducido

A diferencia del cianuro, la tiourea no genera subproductos tan peligrosos, como el ácido cianhídrico. Esto mitiga el riesgo de contaminación del suelo y los cuerpos de agua circundantes, siendo una alternativa más amigable con el entorno natural.

A.3 Eficacia en minerales refractarios

La tiourea ha demostrado ser más eficaz que el cianuro en la lixiviación de minerales refractarios, aquellos que contienen compuestos de sulfuro o elementos como arsénico y cobre, los cuales inhiben la extracción de oro mediante cianuración.

A.4 Compatibilidad con minerales complejos

Es menos sensible a la presencia de metales base como el cobre, plomo y zinc, lo que permite su aplicación en minerales que contienen estos elementos sin afectar significativamente el proceso de extracción del oro.

B. Desafíos

B.1 Costo elevado

La tiourea es más costosa que el cianuro, lo que incrementa los costos operativos. Este es uno de los principales impedimentos para su adopción a gran escala, especialmente en operaciones mineras donde los márgenes de beneficio son estrechos.

B.2 Rápida oxidación

En condiciones de lixiviación, la tiourea se oxida rápidamente, lo que lleva a un mayor consumo de reactivo. Esta rápida oxidación no solo incrementa el costo del proceso, sino que también puede reducir la eficacia de la extracción si no se controla adecuadamente.

B.3 Sensibilidad al pH

El proceso de lixiviación con tiourea es altamente dependiente de un control preciso del pH, que debe mantenerse en un rango ácido (generalmente entre 1 y 2). Esto requiere una atención constante y un control estricto para evitar la descomposición prematura del reactivo.

B.4 Desarrollo de subproductos no deseados

En ciertos minerales, la tiourea puede reaccionar con otros elementos presentes, como el cobre o el arsénico, formando productos secundarios que inhiben la lixiviación del oro o crean capas pasivantes sobre las superficies del mineral, reduciendo la eficiencia de extracción.

B.5 Recuperación de oro más compleja

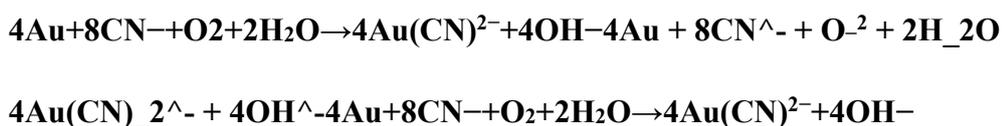
La recuperación del oro lixiviado con tiourea puede ser más complicada que con cianuro, ya que los métodos convencionales, como la adsorción en carbón activado, requieren ajustes para adaptarse a las propiedades de los complejos de tiourea. Esto puede aumentar los costos operativos y tecnológicos del proceso.

C. Parámetros clave en la lixiviación con tiourea

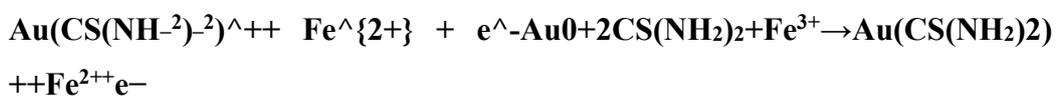
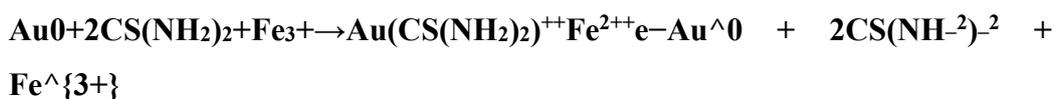
- **pH:** Debe mantenerse en un rango ácido (1-2) para garantizar la estabilidad de la tiourea y maximizar la eficiencia de la lixiviación.
- **Oxidante:** El uso de Fe^{3+} como oxidante es esencial para mantener la reacción en marcha.
- **Consumo de tiourea:** Puede ser elevado debido a su inestabilidad en soluciones ácidas, lo que afecta la viabilidad económica del proceso.

1.1.4 Reacción Comparativa: Tiourea vs. Cianuro

La siguiente ecuación resume el proceso de lixiviación del oro con cianuro, que ha sido el método estándar hasta ahora:



En esta reacción, los iones de cianuro permiten que el oro se disuelva en presencia de oxígeno, formando el complejo dicianoaurato, que luego es recuperado. Si bien este proceso es eficiente, el impacto ambiental del cianuro y su alta toxicidad generan grandes preocupaciones. En comparación, el proceso con tiourea, aunque más costoso, ofrece un enfoque más seguro:



Este proceso no genera subproductos tóxicos como el ácido cianhídrico y, si se optimizan las condiciones de lixiviación, podría reducirse el consumo de tiourea y mejorar su viabilidad comercial.

Tabla 1

Lixiviantes alternativos al cianuro

Lixiviantes alternativos al cianuro

1. Tiosulfato (Cu(II)-NH₃-S₂O₃)
2. Tiourea (Fe(III), CS(NH₂)₂)
3. Haluro (Cl₂, Br₂, I₂)
4. Procesos oxidativos de cloruro
 - a) Agua regia
 - b) Cloruro férrico ácido
 - c) Haber-Platsol
 - d) Intec/N-Chlo
 - e) Kell
5. Sistemas de sulfuro
6. Amoníaco/O₂ o Cu(II)
7. Bacterias/ácidos naturales
 - a) Aminoácidos
 - b) Plantas hiperacumuladoras
8. Tiocianato/Fe(III)
9. Nitrilos/O₂ o Cu(II)
10. Cianuro p otra combinación
 - a) Amoníaco-cianuro
 - b) Cianoforno alcalino
 - c) Cianamida cálcica

Cianuro de bromo

- **Tiosulfato (Cu(II)-NH₃-S₂O₃):** El tiosulfato de amonio es una alternativa prometedora al cianuro, particularmente en minerales refractarios. Este proceso puede ser más amigable con el medio ambiente, aunque requiere la presencia de cobre como catalizador para facilitar la lixiviación.
- **Tiourea (Fe(III), CS(NH₂)₂):** Como hemos discutido anteriormente, la tiourea es un lixivante eficaz en condiciones ácidas y se utiliza en minerales refractarios. A diferencia del cianuro, es menos tóxica, aunque su consumo puede ser elevado debido a su rápida oxidación en solución.
- **Haluro (Cl₂, Br₂, I₂):** Los haluros, como el cloro, bromo y yodo, se utilizan en soluciones acuosas para lixiviar oro. Este proceso puede ser más selectivo en ciertos minerales, aunque los haluros también pueden ser costosos y tener efectos ambientales si no se controlan adecuadamente.

A. Procesos oxidativos de cloruro:

A.1 Agua regia

Esta mezcla de ácido clorhídrico y nítrico es extremadamente potente y se utiliza en la disolución completa de metales, incluidos el oro y el platino.

A.2 Cloruro férrico ácido

Es otro agente lixivante en soluciones ácidas que puede oxidar el oro y disolverlo.

A.3 Haber-Platsol

Un proceso que utiliza cloruro y otros agentes oxidantes bajo presión para la disolución de oro.

A.4 Intec/N-Chlo y Kell

Estos procesos usan diferentes enfoques de cloración o cloruro oxidante para disolver minerales.

B. Sistemas de sulfuro

Los sulfuros son particularmente efectivos en minerales de sulfuro que contienen oro, como la pirita o arsenopirita, que pueden ser tratados para liberar el oro encapsulado.

C. Amoníaco/O₂ o Cu(II)

Esta combinación de amoníaco con oxígeno o cobre como catalizador es una opción para tratar ciertos minerales refractarios y puede ser más selectivo que el cianuro.

D. Bacterias/ácidos naturales

D.1 Aminoácidos

Los aminoácidos pueden actuar como lixiviantes biológicos para extraer oro en procesos menos agresivos.

D.2 Plantas hiperacumuladoras

Utilizan plantas que absorben metales pesados y oro, que luego pueden ser cosechadas y procesadas para extraer los metales.

- **Tiocianato/Fe(III):** El tiocianato es otro reactivo lixivante que puede ser utilizado junto con hierro (III) para extraer oro en medios acuosos.
- **Nitrilos/O₂ o Cu(II):** Los nitrilos en combinación con oxígeno o cobre pueden utilizarse como lixiviantes alternativos.

E. Cianuro y combinaciones

E.1 Amoníaco-cianuro

Combinación de cianuro con amoníaco para mejorar la eficiencia del proceso en ciertos minerales.

E.2 Cianoforno alcalino y Cianamida cálcica

Modificaciones del proceso de cianuración para mejorar la extracción o reducir los impactos negativos del uso de cianuro.

E.3 Cianuro de bromo

Es otra variación del proceso de cianuración, con posibles aplicaciones en minerales difícil

1.1.5 Análisis de los datos de equilibrio de complejos no cianurados de oro

Cuando evaluamos la estabilidad de los complejos de oro en sus estados de oxidación I y III, podemos observar cómo los diferentes ligandos no cianurados, como el tiosulfato, la tiourea y el bisulfuro, presentan una menor estabilidad en comparación con el complejo tradicional de cianuro. Esta diferencia en la estabilidad de los complejos es significativa para la eficiencia del proceso de lixiviación, ya que los valores de las constantes de estabilidad (β_2 o β_4) muestran que estos reactivos son varios órdenes de magnitud menos estables que el cianuro. Esto sugiere que, aunque estos reactivos son menos tóxicos y presentan un menor riesgo ambiental, su efectividad podría depender de condiciones de operación más estrictas o específicas, como la necesidad de ajustar con precisión el pH, la temperatura y la concentración de los reactivos.

Uno de los principales retos que enfrenta la minería moderna es encontrar alternativas que no solo sean seguras para el medio ambiente y las comunidades locales, sino que también sean viables desde un punto de vista técnico y económico. Aunque el cianuro es altamente eficiente y ha sido el reactivo estándar en la lixiviación de oro durante más de un siglo, su toxicidad plantea graves riesgos para la salud pública y el medio ambiente. Por esta razón, la búsqueda de métodos alternativos ha llevado a la exploración de compuestos como el tiosulfato y la tiourea. Sin embargo, la optimización de estos procesos sigue siendo un desafío.

Por ejemplo, el tiosulfato ha demostrado ser prometedor en la lixiviación de minerales de oro refractarios que contienen sulfuros y metales base, donde el cianuro tradicional no es tan efectivo. No obstante, el tiosulfato es menos estable que el cianuro y puede requerir la adición de catalizadores como el cobre para mejorar la cinética de lixiviación. Además, el proceso con tiosulfato es más sensible a la presencia de otros minerales y requiere un control más riguroso de

las condiciones operativas, lo que puede aumentar los costos y la complejidad del proceso.

Por otro lado, la tiourea ha ganado interés por su menor impacto ambiental y su capacidad para lixiviar oro en condiciones ácidas, lo que la hace una opción atractiva para minerales refractarios que contienen sulfuros. Sin embargo, la rápida oxidación de la tiourea en solución y su costo elevado en comparación con el cianuro representan barreras significativas para su adopción a gran escala. Además, el proceso con tiourea también presenta desafíos en términos de recuperación del oro, ya que los métodos convencionales como la adsorción en carbón activado requieren ajustes para adaptarse a las propiedades de los complejos de tiourea.

A pesar de estos desafíos, la búsqueda de alternativas al cianuro sigue siendo una prioridad en la minería moderna, no solo por la necesidad de reducir el impacto ambiental, sino también por las crecientes preocupaciones sobre la seguridad y la sostenibilidad de las operaciones mineras. Para que reactivos como la tiourea y el tiosulfato se conviertan en soluciones viables a gran escala, es esencial que los avances en investigación y desarrollo continúen enfocándose en la optimización de las condiciones de lixiviación y la mejora de la recuperación de oro.

En resumen, aunque los reactivos no cianurados como la tiourea y el tiosulfato representan alternativas menos tóxicas para la lixiviación de oro, su implementación efectiva requiere condiciones de operación más controladas y una mayor investigación para mejorar su estabilidad y eficiencia. El desafío es encontrar un equilibrio entre la eficiencia técnica y el respeto al medio ambiente, con el objetivo de desarrollar procesos de extracción que sean tanto sostenibles como económicamente viables.

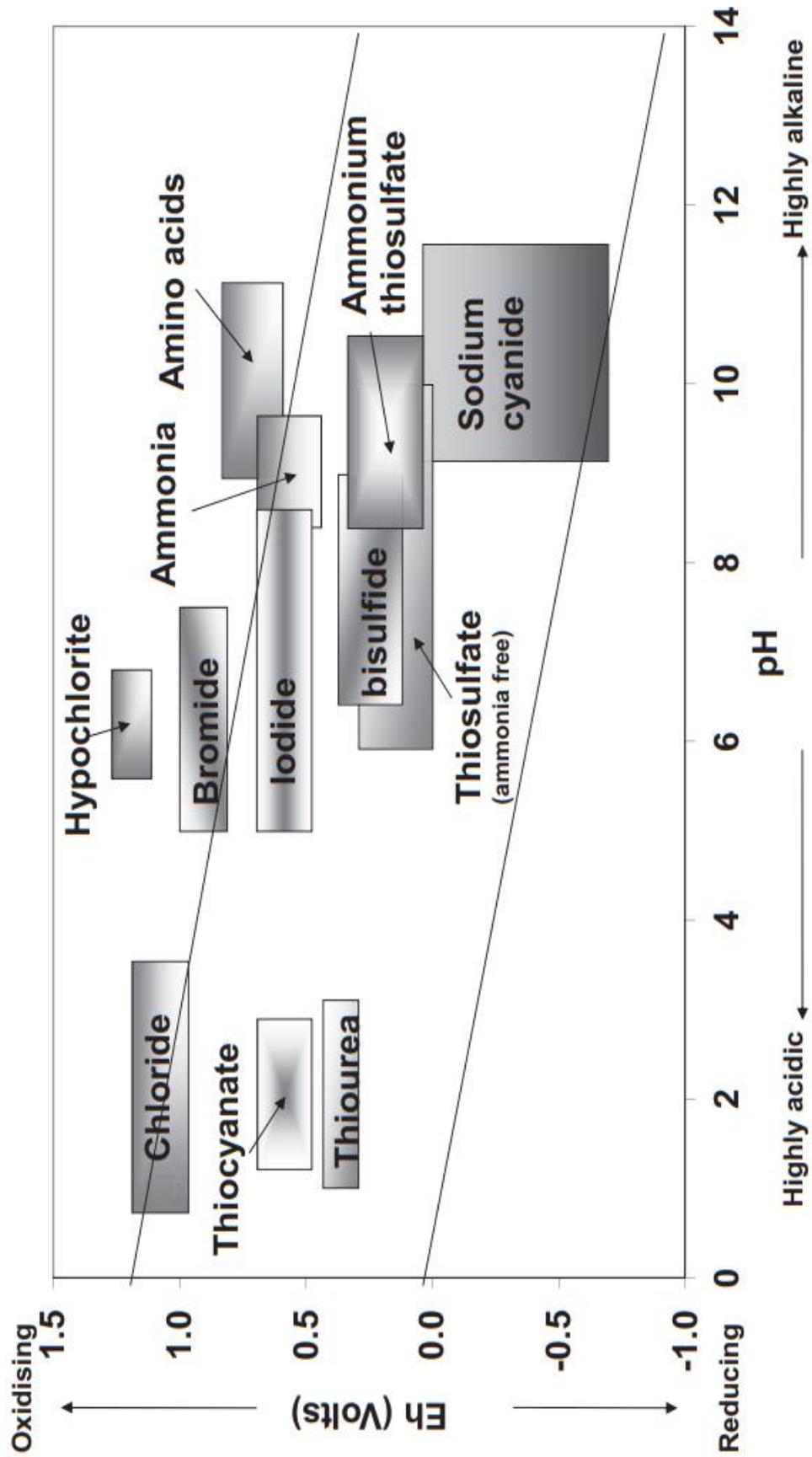
Tabla 2

Constantes de Estabilidad y Potenciales de Reducción Estándar para Complejos de Oro a 25°C

Ligand	Au(I) or Au(III) Complex	Log β_2 or β_4	E° Au (I or III)/Au (V vs. SHE ^a)	pH Range
CN ⁻	Au(CN) ₂ ⁻	38,3	-0,57	>9
S ₂ O ₃ ²⁻	Au(S ₂ O ₃) ₂ ³⁻	28,7	0,17	8-10
CS(NH ₂) ₂	Au(NH ₂ CSNH ₂) ₂ ⁺	23,3	0,38	<3
Cl ⁻	AuCl ₂ ⁻	9,1	1,11	<3
	AuCl ₄ ⁻	25,3	1,00	
Br	AuBr ₂ ⁻	12,0	0,98	5-8
	AuBr ₄ ⁻	32,8	0,97	
I ⁻	AuI ₂ ⁻	18,6	0,58	5-9
	AuI ₄ ⁻	47,7	0,69	
HS ⁻	Au(HS) ₂ ⁻	29,9	-0,25	<9
NH ₃	Au(NH ₃) ₂ ⁺	13	0,57	>9
Glycinate	Au(NH ₂ CH ₂ COO) ₂ ⁻	18	0,632	9
SCN ⁻	Au(SCN) ₂ ⁻	17,1	0,66	<3
	Au(SCN) ₄ ⁻	43,9	0,66	
SO ₃ ²⁻	Au(SO ₃) ₂ ³⁻	15,4	0,77	>4

Figura 1

Diagrama Eh-pH que muestra las regiones típicas de funcionamiento de los lixiviantes del oro



Como resultado de la amplia gama de valores de las constantes de estabilidad de los complejos de oro, los potenciales de reducción estándar para las diferentes especies de ligandos de oro varían en casi 2V (Ritchie et al., 2001). Para muchos de los ligandos, como tiosulfato y tiourea, la oxidación del ligando se produce a un potencial inferior al del complejo Au(I) correspondiente, mientras que lo contrario ocurre con los ligandos SCNe y Cle. Por lo tanto, existe una reacción competidora a la disolución del oro con la mayoría de los lixiviantes alternativos, lo que aumenta el consumo de reactivo. La presencia de un catalizador de Fe(III) en soluciones ácidas de tiourea y de un catalizador de Cu(II) en soluciones alcalinas de tiosulfato también provoca una rápida oxidación del ligando. El propio oxígeno suele ser un oxidante debido a las bajas tasas de transporte de masa y a las lentas tasas de reducción en las superficies de oro en sistemas no cianurados. A excepción de los haluros, el funcionamiento de los lixiviantes alternativos es claramente más complejo que el del cianuro.

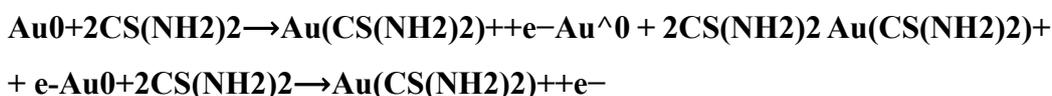
La mayoría de los reactivos tienen una pequeña ventana operativa en la que los lixiviantes alternativos disuelven eficazmente el oro en comparación con el cianuro.

Los elevados potenciales de oxidación que conllevan algunos lixiviantes conducen inevitablemente a elevados consumos de reactivos debido a la reacción con cualquier mineral sulfurado, así como a la oxidación del propio reactivo (Nicol, 1980). Esto se aplica particularmente al tiocianato y al tiosulfato. Por consiguiente, las condiciones de lixiviación deben controlarse mejor que las utilizadas para la lixiviación con cianuro. Igualmente, importante, aunque no siempre se tenga en cuenta, es la adsorción de reactivos y/o la precipitación de oro en algunas arcillas y minerales de ganga, lo que será perjudicial para la recuperación global del oro.

1.1.6 Lixiviación del oro con tiourea

El uso de tiourea (NH_2CSNH_2) en la extracción de oro ha demostrado ser una alternativa prometedora al cianuro, especialmente en condiciones ácidas. Este método ha sido ampliamente estudiado debido a su menor toxicidad y su capacidad para disolver rápidamente el oro, formando un complejo catiónico estable. En condiciones adecuadamente controladas, se pueden lograr extracciones de oro de hasta un 99 % (Yannopoulos, 1991).

La reacción anódica que tiene lugar en condiciones ácidas se describe mediante la ecuación:



Esta reacción es rápida y eficaz, pero debe llevarse a cabo en un rango de pH entre 1 y 2 para maximizar la eficiencia del proceso. La tiourea es termodinámicamente estable en medios ácidos y neutros, pero se descompone rápidamente en soluciones básicas (Monhemius, 2018). Para que la lixiviación sea eficaz, es fundamental optimizar parámetros clave como el pH, el potencial redox y la concentración de tiourea, ya que cualquier desviación puede disminuir la eficiencia del proceso.

1.1.7 Parámetros Críticos de la Lixiviación con Tiourea:

- **pH:** 1,4 ajustado con H_2SO_4
- **Potencial redox:** Máximo 250 mV; Mínimo 150 mV
- **Concentración de tiourea:** 1 %
- **Consumo de tiourea:** 2 kg/t
- **Tiempo de lixiviación:** 10 a 15 min

La lixiviación con tiourea ha destacado como una opción viable para el tratamiento de minerales refractarios y concentrados de flotación, aunque su adopción comercial ha sido limitada debido a su alto costo y el elevado consumo de reactivos.

A. Ventajas de la Tiourea sobre el Cianuro

A.1 Menor toxicidad

La tiourea es menos tóxica que el cianuro, lo que representa una menor amenaza medioambiental (Ubal dini et al., 1998; Juárez y Dutra, 2000).

A.2 Baja sensibilidad a metales básicos

Es menos afectada por elementos como plomo, cobre, zinc y arsénico, lo que la hace ideal para minerales complejos.

A.3 Recuperación eficiente de oro

Especialmente útil para minerales carbonosos y refractarios, superando a la cianuración en ciertos casos.

B. Desafíos de la Lixiviación con Tiourea

A pesar de las ventajas, la lixiviación con tiourea presenta algunos desafíos importantes:

B.1 Costo elevado

La tiourea es más costosa que el cianuro, lo que incrementa los costos operativos.

B.2 Elevado consumo de reactivos

La tiourea se oxida fácilmente en solución, lo que aumenta su consumo durante el proceso.

B.3 Recuperación del oro

La recuperación de oro a partir de las soluciones de tiourea aún requiere más investigación y desarrollo para optimizar su eficiencia.

C. Proceso de Lixiviación con Tiourea

El proceso de lixiviación del oro con tiourea implica varios pasos clave:

D. Pretratamiento de la mena

La mena aurífera se somete a molienda para aumentar la exposición de las partículas de oro.

D.1 Formación del complejo oro-tiourea

El oro se disuelve formando complejos solubles con la tiourea en la solución.

D.2 Extracción del oro

El oro es extraído de la solución mediante adsorción en carbón activado o resinas de intercambio iónico.

D.3 Regeneración de la tiourea

La tiourea puede regenerarse y reutilizarse, lo que mejora la sostenibilidad del proceso.

E. Variables que Afectan la Lixiviación con Tiourea

E.1 Concentración de tiourea

Es esencial ajustar la cantidad adecuada de tiourea para evitar costos elevados y mejorar la eficiencia.

E.2 Ph

Un pH ácido (1-2) es óptimo para la solubilidad de la tiourea y la formación de complejos con el oro.

E.3 Presencia de oxígeno

El oxígeno es crucial para la oxidación del oro y la eficiencia del proceso.

E.4 Temperatura

Las temperaturas más altas aceleran las reacciones, pero es importante controlar el proceso para evitar problemas de manejo.

E.5 Tamaño de partícula

Una molienda adecuada aumenta la superficie de exposición del oro, facilitando la lixiviación.

E.6 Tiempo de lixiviación

Determinar el tiempo óptimo es crucial para maximizar la recuperación del oro.

E.7 Aditivos y catalizadores

La adición de ciertos compuestos puede mejorar la eficiencia de la lixiviación.

F. Situación Actual de la Tiourea

Situación Actual de la Tiourea: Aunque la tiourea ha demostrado un gran potencial como alternativa al cianuro en la lixiviación de oro, su uso presenta limitaciones importantes. Uno de los mayores obstáculos es su clasificación como un carcinógeno potencial, lo que ha generado preocupaciones respecto a su manejo y condiciones de uso en entornos industriales. Además, la rápida oxidación de la tiourea en soluciones ácidas puede incrementar significativamente el consumo del reactivo, lo que afecta la viabilidad económica del proceso.

A pesar de estos desafíos, las investigaciones continúan enfocándose en optimizar la estabilidad de la tiourea y reducir su consumo, con el objetivo de hacer el proceso más competitivo frente a métodos tradicionales como la cianuración. La implementación de tecnologías más avanzadas para la recuperación de oro a partir de soluciones de tiourea, como el uso de adsorbentes y catalizadores especializados, es uno de los enfoques actuales para mejorar la eficiencia del proceso.

El desafío clave radica en lograr que la tiourea, con sus ventajas medioambientales, pueda ser económicamente sostenible y segura para su adopción a gran escala en la minería de oro. Esto no solo implica mejorar la tecnología del proceso, sino también abordar las preocupaciones sobre

la salud y seguridad de los trabajadores y las comunidades cercanas a las operaciones mineras.

1.2 Antecedentes

1.2.1 Internacionales

Groenewald (1976) evaluó el potencial de la tiourea ácida como reactivo para la lixiviación de oro, realizó un estudio de la disolución del oro en soluciones ácidas de tiourea que contienen varios oxidantes. Los experimentos los realizó en discos giratorios de oro puro y en minerales de oro molidos. Los oxidantes químicos utilizados incluyeron hierro (III), peróxido de hidrógeno, oxígeno y disulfuro de formamidina; este último reactivo la formó in situ por la acción tanto del peróxido de hidrógeno como del oxígeno disuelto sobre la tiourea. Observó que el oro se disolvía en estas soluciones a velocidades que se acercaban a la velocidad controlada de difusión límite. El hierro (III) como oxidante provocó la velocidad inicial más rápida de disolución del oro, pero esta velocidad pronto disminuyó debido a la reacción entre el hierro (III) y la tiourea; esto dio como resultado el consumo de una cantidad excesiva de tiourea, lo que hizo que el uso de hierro (III) como oxidante fuera poco atractivo en cualquier sistema de lixiviación de minerales basado en el uso de tiourea como agente de lixiviación.

Los resultados que observó en el estudio del disco giratorio fueron aplicados a la lixiviación de minerales triturados. Una gran proporción del oxidante necesario para la extracción del oro se derivaba del propio mineral; el resto del oxidante requerido podría suministrarse como peróxido de hidrógeno durante la preparación del licor de lixiviación y mediante agitación de la suspensión mediante un flujo de aire. Cuando se utilizaron soluciones que contenían tiourea 1,2 M, fue posible extraer el oro de un mineral en una hora; En estas condiciones, el consumo de tiourea fue de aproximadamente 1,4 kg de tiourea por tonelada de mineral tratado. Esta cifra podría reducirse a 0,4 kg de tiourea/tonelada si se utilizara tiourea 0,1 M; La extracción completa del oro se produjo en ocho horas.

El oro puede lixiviarse a un ritmo mucho mayor mediante soluciones ácidas de tiourea que mediante técnicas de cianuración convencionales. Sin

embargo, por motivos económicos debe preferirse esta última técnica, a menos que se requiera una velocidad de disolución del oro realmente rápida.

Lacoste-Bouchet et al. (1998) investigó la lixiviación de oro usando tiourea en minerales con 0,4 % Cu y 5,6 g/t Au. Se evaluaron pretratamientos ácidos, tiempo, pH, concentración de tiourea y agentes oxidantes. La extracción de oro fue del 89 % con un consumo de 3,9 kg/t de tiourea y sin consumo de ácido a pH 3. Se recomienda el pretratamiento con lavado ácido para mejorar la eficiencia y reducir el uso de tiourea. El sulfato férrico fue el mejor oxidante, aunque costoso. La tiourea disuelve menos cobre que el cianuro. Las condiciones óptimas fueron: lavado ácido previo, 12 g/t de tiourea, 72 h de lixiviación a pH 3 y potencial redox entre 410-450 mV/SHE.

Örgül y Atalay (2002) llevaron a cabo un estudio en un mineral aurífero finamente diseminado de Kaymaz, Turquía. El objetivo principal fue determinar el mecanismo de reacción entre tiourea y Fe^{3+} en la lixiviación del oro con tiourea. También se examinaron los niveles de consumo de tiourea durante las operaciones de lixiviación para diferentes parámetros de lixiviación, es decir, relación molar de sulfato férrico/tiourea, pH y temperatura. comparó la lixiviación mediante el proceso de tiourea con la cianuración. En condiciones óptimas de lixiviación, obteniendo un 85,8 % de extracción de oro con una alimentación de tamaño de partícula de -53 μm en 6 h.

Murthy et al. (2003) presentan el trabajo realizado en el procesamiento de un mineral de oro refractario y de baja ley utilizando tiourea. La lixiviación directa del mineral "tal como se recibió" con tiourea ha arrojado sólo un 16 % de extracción de oro. Partiendo de un mineral que contiene 1,4 g/t de oro, se ha podido generar un concentrado de sulfuro con 6,1 g/t de oro mediante beneficio físico del mineral mediante flotación por espuma. La lixiviación con tiourea de este concentrado de flotación después de la presión y la preoxidación ha dado como resultado una extracción de oro del 98 %, con una recuperación general de oro del 74 %. Se encontró que la oxidación a presión era ligeramente superior a la tostación para la peroxidación del mineral/concentrado de oro refractario.

Gönen (2003) investiga la recuperación de oro de minerales finamente diseminados usando tiourea como alternativa a la cianuración. Se realizaron

experimentos en muestras de mineral epitermal de Gümüşhane-Mastra, Turquía, evaluando parámetros como tamaño de partículas, tiempo de mezclado, concentraciones de extractante y oxidante, y pH en la lixiviación por agitación. Se encontró que la cianuración fue más eficaz debido a un menor consumo de reactivos y mayores eficiencias tecnológicas en comparación con la tiourea. Aunque se mejoró la eficiencia con tiourea mediante aumentos en oxidante y tiempo de mezclado, la formación de azufre elemental limitó la difusión y la recuperación de oro no superó el 78 %. Tanriverdi et al. (2005) investigan la cinética de lixiviación del mineral de oro de Ovacık, que es el primer proyecto de lo que es potencialmente una nueva gran industria minera en Turquía, y se determinaron los principales parámetros utilizando cianuro, tiourea y tiosulfato. La disolución del oro se analiza en términos de tasas de extracción y consumo de reactivos durante la lixiviación.

Gönen et al. (2007) investigan la aplicabilidad de los procesos de lixiviación y CIL en la recuperación de oro con el método de tiourea, alternativa a la cianuración del mineral refractario de Gümüşhane-Kaletaş/Región Oriental del Mar Negro (Turquía), los experimentos que llevaron a cabo en condiciones de laboratorio utilizando muestras de mineral de las cuales aproximadamente el 80 % fueron molidas a $-0,038$ mm. La ley de las muestras de mineral fue de 6,8 g Au/ton. En la primera parte de los estudios experimentales, asumiendo que el oro podría recuperarse con procesos CIC y CIP, investigaron los efectos del pH, la tiourea, el consumo de agente oxidante y el tiempo de lixiviación sobre la lixiviación. Luego, en base a los valores óptimos de pH y consumo de reactivos obtenidos en la primera parte (pH = 1,5, 15,2 kg de tiourea/tonelada de mineral, 140,9 kg de sulfato de hierro (III)/tonelada de mineral y 46,2 kg de consumo de ácido sulfúrico /tonelada de mineral) y agregando 50 kg de carbón activado/tonelada de mineral al inicio de los experimentos. Como resultado de los experimentos, el aumento en la extensión fue de aproximadamente un máximo del 8 % y la mayor extensión de lixiviación de oro se obtuvo con un 75 % al final de la quinta hora.

S. Orgul y Atalay (2007) el estudio exploró la lixiviación de oro usando tiourea como alternativa al cianuro, junto con sulfato férrico como oxidante, en mineral de oro Kaymaz de Turquía. Se investigaron parámetros como

concentración de tiourea, sulfato férrico, relación molar, duración de lixiviación y tamaño de partículas. Se logró una extracción del 80.5 % a temperatura ambiente con 15.96 kg/t de tiourea a pH 1.35 en 6 horas para partículas de 106 μm . Se observaron extracciones más altas del 92.5 % con partículas más finas y pH más bajos. El estudio destacó la viabilidad de la tiourea con sulfato férrico pero también señaló el consumo variable de tiourea bajo diferentes condiciones.

Whitehead et al. (2009) el estudio comparó la lixiviación de oro, plata y metales básicos en un mineral sulfurado utilizando diversos agentes y oxidantes en líquidos iónicos y medios acuosos. Se evaluaron el peroxomonosulfato (HSO_5^-) y Fe(III) como oxidantes, y tiourea, cloruro, bromuro e yoduro como agentes de lixiviación en líquidos iónicos y K_2SO_4 acuoso saturado. Se alcanzó una recuperación del 85 % de oro y plata con $\text{HSO}_5^- /$ tiourea a 25–50 °C, siendo superior en líquidos iónicos bmimCl . La selectividad fue alta para Au y Ag, con mejoras significativas utilizando I^- en bmimCl . Las condiciones óptimas fueron definidas por estudios de concentración de haluro y oxidante.

Yang et al. (2011) estudió la lixiviación de oro en soluciones de tiourea – tiocianato mediante la técnica de disco giratorio utilizando sulfato férrico como oxidante. Estudiaron los efectos de las concentraciones iniciales de hierro, tiourea (Tu) y tiocianato, así como la temperatura y el pH, sobre las tasas de lixiviación de oro. Obtuvieron una tasa de lixiviación de oro inicial del orden de $10^{-9} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ a 25 °C, que fue mayor que las tasas obtenidas cuando se usaron por separado soluciones de tiocianato férrico o tiourea férrica wsw . El efecto sinérgico se atribuyó a la formación de un complejo de ligando mixto $\text{Au}(\text{Tu})_2 \text{SCN}$. Las determinaciones de la energía de activación aparente indican que el proceso fue controlado por una combinación de reacción química y difusión en el sistema lixivante mixto. Los potenciales de circuito abierto muestran que la estabilidad del tiocianato aumenta en la mezcla.

Romero Bonilla et al. (2021) evaluó el impacto de la velocidad de agitación y la concentración de tiourea en la cinética de lixiviación de minerales flotados de oro, comparando los resultados con la cianuración. Se utilizó un reactor con agitación mecánica y se analizaron parámetros como concentración de tiourea (1, 3, 6, 9, 12 g/L), velocidad de agitación (420-700 rpm), y tiempo de

reacción (4 h). La concentración óptima de 9 g/L de tiourea mostró la mejor recuperación de oro. Se determinó que el proceso sigue un modelo cinético de difusión a través de la capa de cenizas. La tiourea demostró una recuperación de oro ligeramente inferior (1.74 %) en comparación con la cianuración bajo condiciones específicas.

K. Li et al. (2023) investigaron la mejora de la lixiviación de oro con tiourea utilizando oxalato y citrato como aditivos. Observaron una reducción significativa en el consumo de tiourea y un aumento en la extracción de oro, comparándola favorablemente con la cianuración. Los aditivos facilitaron una mayor adsorción de oro en el carbón activado al reducir los productos secundarios de la descomposición de la tiourea. El citrato mostró un rendimiento superior al oxalato, atribuible a la formación de complejos con Fe^{3+} que estabilizaron la solución y disminuyeron el consumo de tiourea. Este enfoque promete una tecnología más efectiva y menos contaminante para la extracción de oro.

Sasaki et al. (2023) evaluó la efectividad de la tiourea (TU) y la etilentiourea (ETU) como ligandos alternativos al cianuro para la lixiviación sostenible de oro en minerales con distintos contenidos de hierro. La recuperación máxima de oro logró con minerales de bajo contenido de Fe utilizando TU. Sin embargo, los minerales con alto contenido de Fe presentaron desafíos debido a la descomposición de TU y la complejación con Fe^{3+} , que inhibieron la lixiviación de oro. La adición de Na_2SO_3 mejoró la extracción de oro al reducir Fe^{3+} a Fe^{2+} . ETU demostró ser más efectiva que TU en minerales con Fe alto, mostrando potencial para la hidrometalurgia del oro sin cianuro. K. Li et al., (2024) investigó el impacto de la pirita en la lixiviación de oro con tiourea, crucial para maximizar la recuperación de oro de minerales refractarios. Se emplearon experimentos de lixiviación, caracterización de superficies y cálculos DFT para entender el proceso. La presencia de pirita redujo significativamente la disolución del oro y la estabilidad de la tiourea, atribuida a su catalización en la oxidación de la tiourea por Fe^{3+} . El citrato actuó como aditivo mejorando la estabilidad de la tiourea al competir con ella por la adsorción en la pirita y formar complejos menos oxidativos con Fe^{3+} . Estos hallazgos son fundamentales para optimizar la extracción de oro de minerales refractarios.

Sasaki et al. (2024) investigó un método alternativo para extraer oro de minerales refractarios carbonosos sin cianuro. Utilizando biooxidación a 45 °C con bacterias oxidantes de hierro y azufre seguido de lixiviación con tiourea en condiciones ácidas, lograron una eficiencia de extracción del oro cercana al 100 % en 12 horas, sin readsorción. La adsorción del complejo $\text{Au}(\text{CS}(\text{NH}_2)_2)^+$ en resina confirmó la recuperación cuantitativa. La biooxidación redujo los sulfuros metálicos con Fe, minimizando la descomposición de la tiourea, mientras que el complejo formado mostró baja afinidad por la materia carbonosa. Este enfoque no requiere tostación previa ni utiliza cianuro, destacándose por su eco-amigabilidad y aplicabilidad en la minería aurífera.

K. Li et al. (2024a) investigó el efecto de la calcopirita en la lixiviación de oro con tiourea, crucial para optimizar la recuperación de minerales auríferos sulfurados refractarios. Mediante experimentos de lixiviación, caracterización de superficies y cálculos DFT, se demostró que la calcopirita inhibe significativamente la disolución del oro y la estabilidad de la tiourea al catalizar su oxidación por Fe^{3+} . El uso de oxalato como aditivo mejoró la eficacia al competir con la tiourea por la adsorción en la calcopirita y formar complejos estables con Fe^{3+} , reduciendo su capacidad oxidativa. Estos hallazgos subrayan la importancia del oxalato para mitigar los efectos adversos de la calcopirita en la lixiviación de oro con tiourea.

Hou et al. (2024) investigó la lixiviación de oro utilizando un sistema de tiourea asistida por oxidación Fenton, empleando especies reactivas de oxígeno (ROS) generadas por la reacción de Fenton como oxidante y tiourea como ligando. Con un control preciso de parámetros, se logró una rápida lixiviación del 100 % en 30 minutos desde un concentrado de oro tostado, destacando una cinética extremadamente rápida. La optimización con ácido nitrilotriacético (NTA) redujo el consumo de tiourea sin afectar la eficiencia. La selectividad alta hacia el radical superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) en la generación de ROS demostró potencial para aplicaciones limpias en hidrometalurgia del oro.

1.2.2 Nacionales

Jos y Re (2012) investigaron en laboratorio la optimización de variables para la extracción de oro de piritas auríferas del río Tablachaca, Perú, utilizando

tiourea (TU) seguido de electro-deposición. La electrólisis la empleó para oxidar TU y producir disulfuro formamidina (FDS), un agente oxidante para el oro. La conversión óptima de TU a FDS se logró en 2,5 horas con 4,5 V y pH 1,5. Usó una membrana aniónica para evitar reacciones no deseadas. Previo a la lixiviación, lavó el mineral con ácido sulfúrico. Los resultados demostraron un bajo consumo de TU (1,76 kg/TM de mineral), viabilidad económica.

Bernaola Flores (2018) evaluó la lixiviación de acantita utilizando tiourea como alternativa al cianuro, buscando determinar su eficiencia técnica y ambiental. Se emplearon métodos analíticos y simulaciones computacionales DFT para modelar las reacciones de lixiviación. Experimentalmente, se compararon concentraciones de 1, 3, 5 y 7 g/L de tiourea con 1, 3 y 5 g/L de cianuro de sodio. Se encontró que la tiourea extrajo un 3 % más de plata a las tres horas y consumió 13.6 veces menos lixivante que el cianuro. Sin embargo, el efluente de tiourea excedió los límites permitidos para pH y sólidos en suspensión. Se concluyó que la tiourea muestra ventajas en eficiencia y costo, pero requiere mejoras en tratamiento de efluentes.

Sánchez y Castrejón (2014) investigó la eficiencia de la tiourea en la extracción de oro de un mineral sulfurado, variando el pH y el tiempo de lixiviación por agitación. Se utilizó tiourea junto con ácido sulfúrico y ácido cítrico como oxidantes. Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Nacional de Trujillo, utilizando botellas de lixiviación con muestras de mineral molido a malla #-200. Los resultados mostraron que se logró una extracción del 45.35 % de oro con ácido sulfúrico a pH 2.5 y del 44.94 % con ácido cítrico a pH 1.5, ambos usando 3g/L de tiourea durante 48 horas. Concluyeron que el ácido cítrico puede ser una alternativa viable al ácido sulfúrico, proporcionando resultados comparables a menor pH.

1.2.3 Locales

El estudio de Rivera Mendoza et al. (2023) examinan de manera detallada cómo la variación en la concentración de tiourea influye en la lixiviación de oro bajo condiciones ácidas, lo que aporta importantes conocimientos para mejorar la eficiencia de este proceso. Realizado en la mina Antuyo, en Tiquillaca, Puno, el



experimento involucró mineral con una ley de oro de 3,88 g/t y tamaños de partícula controlados. Los resultados obtenidos revelaron que las concentraciones de tiourea de 0,0625, 0,125 y 0,25 M tienen un impacto directo en la cinética de lixiviación.

Uno de los hallazgos más significativos fue que a una concentración de tiourea de 0,25 M y un pH de 2, se logró una recuperación del 90 % de oro en un tiempo relativamente corto de 90 minutos, con un consumo de tiourea de solo 1 g/L. Este rendimiento destaca la capacidad de la tiourea para actuar como un lixivante eficiente, incluso en condiciones adversas como minerales refractarios. Además, se observó que los iones oxidantes generados durante el proceso en un entorno ácido favorecen la oxidación del oro, facilitando la formación de complejos estables que mejoran su disolución.

Este estudio reafirma la viabilidad del uso de la tiourea como una alternativa más ecológica al cianuro, sobre todo en minerales difíciles de tratar, y proporciona una base sólida para su optimización en futuras aplicaciones industriales.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Identificación del problema

En el Perú, la minería artesanal es una de las principales fuentes de emisiones de mercurio, generando graves problemas de contaminación ambiental. Esta actividad, que se lleva a cabo principalmente en regiones como Puno, utiliza tecnologías tradicionales y obsoletas que resultan en un impacto ambiental significativo. Un ejemplo claro de esta situación se encuentra en la comunidad minera de Ollachea, donde la amalgamación es el método predominante para la extracción de oro. En este proceso, el mercurio es añadido manualmente a los molinos amalgamadores o kimbaletes, y luego, mediante presión manual, se extrae la amalgama de oro. Esta manipulación manual del mercurio expone a los mineros a riesgos severos, ya que el mercurio puede ingresar al cuerpo a través de la piel, las uñas o por inhalación de vapores.

El mercurio ha sido reconocido como un neurotóxico e inmunotóxico por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que lo clasifica como uno de los diez productos químicos más peligrosos para la salud pública. Los riesgos asociados con el mercurio no solo se limitan a la salud humana, sino también al medio ambiente. El mercurio puede bioacumularse en los ecosistemas y permanecer en la atmósfera durante largos períodos, lo que permite que se desplace a largas distancias. Una vez en los sistemas terrestres y acuáticos, se transforma en otras especies más peligrosas de mercurio, afectando tanto a la fauna como a las comunidades humanas que dependen de estos recursos (Wang et al., 2012; Gonzalez-Raymat et al., 2017).

En 2010, se estimó que las emisiones totales de mercurio en Perú provenientes de la minería artesanal y de pequeña escala de oro (ASGM, por sus siglas en inglés) fueron de 70 toneladas, y se presume que estas cifras han aumentado en años recientes (GEF, 2018). Estas emisiones no solo contaminan el ambiente local, sino que también contribuyen a problemas de salud pública y a la degradación de los ecosistemas circundantes.

Para mitigar el uso del mercurio y sus efectos devastadores, es fundamental la adopción de alternativas más limpias y sostenibles para el procesamiento de minerales auríferos en la minería artesanal. Estas alternativas deben ser capaces de ofrecer una mayor recuperación de oro para que sean económicamente viables y, al mismo tiempo, minimizar el impacto ambiental. Además, es crucial sensibilizar a los actores de la minería artesanal sobre la necesidad de realizar sus operaciones dentro de un marco de legalidad y responsabilidad ambiental, evitando prácticas peligrosas como la utilización de mercurio. El desafío es enorme, pero con el apoyo de políticas

públicas, tecnologías innovadoras y la colaboración de las comunidades mineras, es posible avanzar hacia una minería más limpia y segura para todos.

2.2 Enunciados del problema

2.2.1 Problema general

- ¿Cómo recuperar oro por el proceso de lixiviación con tiourea para mineral aurífero en Ollachea-Puno?

2.2.2 Problemas específicos

A. ¿Cuáles son las características del mineral a ser tratado para la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación con tiourea?

El conocimiento detallado de las características del mineral es fundamental para determinar la eficiencia del proceso de lixiviación con tiourea. Factores como la composición mineralógica, el contenido de sulfuros, la granulometría, y la presencia de elementos que puedan interferir en la lixiviación, como el cobre o el arsénico, juegan un papel determinante en la elección del método de procesamiento. Las propiedades específicas del mineral, como su refractariedad y la disposición del oro dentro de la matriz mineral, influyen directamente en el rendimiento del proceso y en la recuperación final del metal precioso.

B. ¿Cuál será la eficiencia de recuperación de oro por lixiviación con tiourea?

La eficiencia de recuperación de oro mediante el uso de tiourea depende de diversos parámetros operacionales y de las condiciones experimentales. Estos incluyen la concentración de tiourea, la acidez del medio (pH), el tipo y cantidad de oxidante utilizado (como el ion férrico), la temperatura, la velocidad de agitación, el tiempo de lixiviación, y la proporción sólido/líquido en el reactor. Además, es importante analizar el consumo de reactivos, la estabilidad de la tiourea en solución y la posibilidad de regeneración del reactivo. La determinación precisa de la eficiencia permitirá establecer la viabilidad técnica y económica del uso de tiourea frente a métodos convencionales como la cianuración.

2.3 Justificación

La presente investigación se justifica debido a la necesidad de encontrar alternativas más seguras y sostenibles para la minería artesanal y la pequeña minería en Perú, particularmente en regiones como Ollachea, donde el uso de mercurio sigue siendo prevalente. La tiourea se presenta como una opción ambientalmente amigable que puede reemplazar al cianuro, contribuyendo a la protección de los ecosistemas acuáticos, terrestres y atmosféricos, así como a la salud humana. Dado que el mercurio es un neurotóxico altamente peligroso, su reemplazo es esencial para mitigar los daños que ocasiona tanto al medio ambiente como a las comunidades expuestas.

El uso de tiourea no solo representa un avance en términos ambientales, sino también sociales y económicos. Esta alternativa podría beneficiar a los mineros de Ollachea y sus alrededores, permitiéndoles trabajar de manera más segura y sostenible, reduciendo su exposición a sustancias tóxicas como el mercurio. La aceptación y adopción de la tiourea por parte de los mineros podría fomentar una minería responsable, ayudando a la preservación de los recursos naturales y promoviendo la legalización de las actividades mineras bajo estándares más elevados de protección ambiental.

Desde una perspectiva económica, la utilización de tiourea puede representar una ventaja competitiva frente al cianuro en la producción industrial, no solo por su menor toxicidad, sino también por la necesidad creciente de implementar prácticas sostenibles. En el futuro, es probable que las normativas ambientales se vuelvan más estrictas, obligando a la adopción de reactivos menos nocivos, como la tiourea, en procesos extractivos. Esto ayudaría a consolidar el desarrollo sostenible de la minería, alineándose con las tendencias globales de responsabilidad ambiental y social.

Adicionalmente, la investigación está dirigida a abordar el tratamiento de minerales refractarios, que presentan una recuperación limitada de oro con los métodos tradicionales de lixiviación con cianuro. Estos minerales, en los que el oro está diseminado en sulfuros como la pirita, arsenopirita y calcopirita, requieren métodos alternativos como la preoxidación y la lixiviación con tiourea para alcanzar niveles de recuperación adecuados. La tiourea, por su baja toxicidad, se perfila como un lixivante prometedor capaz de sustituir al cianuro, especialmente en el procesamiento de minerales complejos y refractarios, donde los métodos convencionales resultan ineficientes.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

- **Recuperar oro utilizando el proceso de lixiviación con tiourea** como alternativa sostenible al cianuro, aplicado a mineral aurífero de la zona de Ollachea, Puno, con el fin de minimizar el impacto ambiental y ofrecer una opción más segura para la minería artesanal en la región.

2.4.2 Objetivos específicos

- **Caracterizar el mineral aurífero** a ser tratado en el proceso de lixiviación con tiourea, identificando su composición mineralógica y las condiciones óptimas para su procesamiento.
- **Determinar la eficiencia de recuperación de oro** mediante el proceso de lixiviación con tiourea, evaluando los parámetros críticos del proceso, como la concentración del reactivo, el pH, el tiempo de reacción y la temperatura.

2.5 Hipótesis

2.5.1 Hipótesis general

- La lixiviación con tiourea es efectiva para la recuperación de oro en mineral aurífero procedente de Ollachea-Puno, permitiendo una extracción eficiente y económicamente viable bajo condiciones controladas de pH y concentración de tiourea.

2.5.2 Hipótesis específicas

- El mineral aurífero de Ollachea-Puno presenta características mineralógicas y composicionales que favorecen la formación de complejos estables entre la tiourea y el oro, lo cual facilita su extracción mediante el proceso de lixiviación.
- La eficiencia de recuperación de oro por lixiviación con tiourea será significativamente influenciada por parámetros como el pH de la solución lixivante y la concentración de tiourea utilizada.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Lugar de estudio

El lugar de donde se tomaron las muestras se encuentra ubicado en:

- Región : Puno.
- Provincia : Carabaya.
- Distrito : Ollachea.
- Localidad : Comunidad Minera Ollachea.

Figura 2

Ubicación de la comunidad minera de Ollachea



3.2 Población

En la investigación se tomó en cuenta como población, 1,5TM de mineral fresco, provenientes de la minería artesanal en la comunidad de Ollachea.

3.3 Muestra

En esta investigación se utilizó un mineral de oro refractario de alta ley procedente de la minería artesanal en la comunidad de Ollachea. El análisis químico del mineral "tal como se recibió", que contenía 1,4 Oz/t de oro.

3.4 Materiales

Los reactivos utilizados en este estudio, como tiourea, cianuro sódico y ácido sulfúrico, fueron todos analíticamente puros. En todos los experimentos se utilizó agua destilada.

En esta investigación se utilizó un mineral de oro refractario de baja ley procedente de la zona minera Comunidad de Ollachea.

3.5 Método de investigación

El método utilizado en la presente investigación es cuantitativo experimental. Se empleó mineral aurífero proveniente de la comunidad de Ollachea, en la región de Puno, y las pruebas experimentales fueron llevadas a cabo en los laboratorios de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Para el proceso experimental, las muestras de mineral fueron preparadas y clasificadas mecánicamente utilizando métodos convencionales. De cada muestra se obtuvieron 500 g, con un rango de tamaño de partícula comprendido entre ASTM -100 +200 mesh (75 a 150 μm) antes de su procesamiento para lixiviación y análisis químico. Este tamaño de partícula se seleccionó para maximizar la exposición del oro a los reactivos lixiviantes, mejorando así la eficiencia en la disolución del mineral.

Todas las soluciones empleadas tanto para el pretratamiento como para el proceso de lixiviación fueron preparadas utilizando agua desionizada y productos químicos de grado analítico para asegurar la pureza y consistencia de los reactivos. El pH de las soluciones fue ajustado con ácido sulfúrico diluido para mantener las condiciones ácidas necesarias en el proceso de lixiviación con tiourea. En los experimentos de pretratamiento, se utilizó una agitación mecánica constante a 400 rpm, lo cual permitió una mezcla homogénea y una interacción eficiente entre el mineral y los reactivos.

Al finalizar el pretratamiento, la solución resultante, denominada PPS (pregnant pretreatment solution), que contenía oro disuelto y complejos de metales base, fue separada del residuo sólido mediante filtración. Esta solución fue sometida a análisis para determinar la concentración de oro y otros metales. Posteriormente, el residuo sólido fue lavado y preparado para su caracterización con el fin de evaluar la cantidad de oro

remanente y la presencia de elementos que pudieran haber interferido en la eficiencia del proceso de lixiviación.

Este enfoque experimental permitió establecer las condiciones óptimas para la recuperación de oro mediante lixiviación con tiourea, evaluando factores como el pH, la concentración de tiourea y el tiempo de lixiviación.

3.6 Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

3.6.1 Caracterización del mineral, a ser tratado para la recuperación de oro mediante el proceso de lixiviación con tiourea

Para la caracterización del mineral aurífero, se llevaron a cabo una serie de análisis metalúrgicos y pruebas de laboratorio con el fin de determinar su composición elemental y evaluar su potencial de recuperación mediante lixiviación con tiourea. El proceso de caracterización incluyó los siguientes métodos:

A. Ensayos de fuego

Se utilizaron ensayos de fuego para la determinación precisa del contenido de oro y otros metales presentes en las muestras de mineral. Estos ensayos consisten en un proceso de fusión y posterior separación de los metales preciosos para su cuantificación. El análisis se complementó mediante espectrometría de absorción atómica (AAS), una técnica que permitió identificar con precisión la concentración de oro y otros elementos metálicos en las muestras.

B. Pruebas de lixiviación diagnóstica

Estas pruebas se realizaron con el objetivo de evaluar la susceptibilidad del mineral a la lixiviación con tiourea. Las muestras se sometieron a lixiviación en condiciones controladas de pH, concentración de reactivos y tiempo de agitación. El propósito de estas pruebas fue determinar qué porcentaje de oro era posible disolver en la solución de tiourea, en comparación con el método tradicional de cianuración.

C. Determinación del grado de lixiviabilidad mediante agitación

Se llevaron a cabo ensayos de agitación para determinar la velocidad de disolución del oro en la solución de tiourea. Estas pruebas incluyeron la medición de la cinética de disolución del oro bajo condiciones de lixiviación con tiourea, lo que permitió evaluar la eficiencia del proceso y determinar los parámetros óptimos para maximizar la recuperación de oro. Las muestras fueron sometidas a agitación mecánica constante y se controlaron variables como el tiempo, la velocidad de agitación y la temperatura para obtener datos precisos sobre la lixiviabilidad del mineral.

Estos métodos permitieron obtener una comprensión detallada de las características del mineral y su comportamiento frente al proceso de lixiviación con tiourea, sentando las bases para la optimización del proceso de recuperación de oro.

3.6.2 Determinación de la eficiencia de recuperación de oro por lixiviación con tiourea

La prueba de agitación se realizó con agitación mecánica mediante impulsor tipo paleta y un recipiente con una capacidad de 2 litros.

A. Lixiviación con cianuro

Durante las pruebas de lixiviación, se examinaron diversos parámetros clave que influyen en la eficiencia del proceso de extracción de oro, como el contenido de sólidos, la cantidad de cianuro de sodio (NaCN), la velocidad de agitación, la duración de la reacción y la capacidad del reactor. El experimento se realizó bajo las siguientes condiciones:

- **Contenido de sólidos:** Se utilizó una concentración del 25 %.
- **Cantidad de NaCN:** Se añadió 500 mg/L de cianuro de sodio a la mezcla.
- **Velocidad de agitación:** El reactor operó a una velocidad de 450 revoluciones por minuto (rpm).
- **Duración de la reacción:** El proceso se llevó a cabo durante un período total de 120 horas.
- **Capacidad del reactor:** Se empleó un reactor con una capacidad de 2 litros.

Inicialmente, el pH de la mezcla fue ajustado a 10,5 mediante la adición de cal para garantizar un ambiente alcalino favorable para la lixiviación con cianuro. Luego, se controló la concentración de NaCN en la solución mediante la adición de cianuro, manteniendo los niveles de CN⁻ necesarios para el proceso de disolución del oro. Este control se realizó de manera constante para evitar una disminución significativa de la concentración de NaCN, lo cual podría afectar la eficiencia del proceso.

Se realizaron controles y muestreos a intervalos de tiempo específicos: 2, 4, 8, 12, 24, 48, 72 y 120 horas. En cada intervalo, se tomaron 40 ml de la mezcla para su análisis. Posteriormente, las muestras fueron filtradas y se analizó su contenido de oro (Au) para determinar el rendimiento del proceso de lixiviación.

Este método de análisis permitió evaluar la evolución del proceso de extracción y optimizar los parámetros, con el objetivo de maximizar la recuperación de oro. Este enfoque es esencial para lograr una operación eficiente y económicamente viable, asegurando que el consumo de reactivos sea el adecuado y que la recuperación de metales sea lo más alta posible.

B. Lixiviación con tiourea

La lixiviación con tiourea es una alternativa prometedora al uso del cianuro para la extracción de oro, especialmente en ambientes controlados donde se busca minimizar el impacto ambiental. En los ensayos realizados, se emplearon los siguientes parámetros: un 25 % de sólidos, 12 g/L de tiourea (TU), una velocidad de agitación de 450 rpm, y un tiempo de reacción de 120 horas. Para llevar a cabo el proceso, se utilizó un reactor de 2 litros de capacidad efectiva. Estos experimentos preliminares permitieron estudiar la cinética de la disolución del oro bajo condiciones de temperatura ambiente y presión atmosférica, asegurando la estabilidad del sistema.

El pH del medio de lixiviación, un factor crucial en la estabilidad de la tiourea, fue ajustado mediante la adición de ácido sulfúrico (H_2SO_4) hasta alcanzar un valor de 1.5, un rango óptimo para evitar la descomposición prematura de la tiourea. La densidad de pulpa se mantuvo al 25 % de sólidos en peso, lo que permitió asegurar una correcta interacción entre los reactivos y el mineral.

A lo largo del proceso, se llevaron a cabo mediciones a intervalos regulares (2, 4, 8, 12, 24, 48, 72 y 120 horas). En cada uno de estos puntos, se extrajeron 40 ml de la suspensión para su análisis. Esta suspensión fue filtrada y sometida a una evaluación para determinar la concentración de oro disuelto, utilizando espectroscopia de absorción atómica. Este método permitió obtener datos precisos sobre la cantidad de oro extraído a lo largo del tiempo, proporcionando una visión clara de la eficiencia del proceso de lixiviación.

Además, el consumo de tiourea, un factor determinante para la viabilidad económica del proceso, fue monitorizado mediante titulación con yodato de potasio, utilizando almidón como indicador. Este análisis permitió evaluar la estabilidad de la tiourea en solución y ajustar su concentración según las necesidades del proceso.



B.1 Reflexión humanizada

La lixiviación con tiourea presenta una solución más segura para la extracción de oro en comparación con el cianuro. A través de un proceso cuidadosamente controlado, es posible reducir la toxicidad ambiental y proteger tanto a las comunidades cercanas como a los trabajadores involucrados. Este enfoque más sostenible refleja el compromiso de la industria con el desarrollo de tecnologías que minimicen el impacto ecológico sin sacrificar la eficiencia. Aunque persisten algunos desafíos, como el costo y el consumo de reactivos, los avances en este campo abren la puerta a una minería de oro más ética y responsable, que no solo se centra en el rendimiento económico, sino también en el bienestar del entorno y de las personas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

4.1.1 Características químicas y mineralógica del mineral aurífero en Ollachea – Puno

De acuerdo al primer objetivo específico los resultados del análisis por difracción de rayos X (DRX) (Tabla 1) confirman que los minerales estudiados son de naturaleza sulfurada. La presencia de las fases de pirita (Fe_2S), enargita (Cu_3AsS_4) y calcopirita (CuFeS_2) en el mineral sulfurado sugiere su potencial refractario debido a la posible asociación del oro con estas estructuras mineralógicas.

Tabla 3

Composiciones químicas del mineral aurífero (% en masa)

Repeticiones	Componentes químicos (%)					
	Au	Ag	Fe tot.	SiO ₂	Cu	Fe
1	92,83	43,57	42,27	29,28	4,35	1,52
2	90,17	44,26	47,73	20,58	2,58	2,48
3	93,24	43,58	39,44	21,27	3,94	2,01
Promedio	92,08	43,80	43,15	23,71	3,62	2,00
DE	1,67	0,40	4,21	4,84	0,93	0,48
CV (%)	1,81	0,90	9,77	20,40	25,57	23,96

Nota: Prom = promedio; DE = desviación estándar; CV (%) = coeficiente de variación en porcentaje.

Tabla 4

Composición mineralógica del mineral aurífero.

Composición Mineralógica		Hematita	Magnetita	Arsenopirita	Pirita	Calcopirita	Cuarzo	
Muestra 1		-	-	2,71	0,71	4,67	66,36	
Muestra 2		-	-	4,97	3,16	4,34	54,53	
Composición Mineralógica		Cuarzo	Muscovita	Chlorita	Siderita	Pirita	Arsenopirita	Pyrrhotite
Muestra 1		66,36	16,18	3,80	0,39	0,71	2,71	9,85
Muestra 2		54,53	10,72	1,72	0,66	3,16	4,97	24,24
Muestra 3		60,38	13,48	2,31	0,47	1,59	3,25	14,33
Prom		60,42	13,46	2,61	0,51	1,82	3,64	16,14
DE		5,92	2,73	1,07	0,14	1,24	1,18	7,36
CV (%)		9,79	20,28	41,07	27,37	68,19	32,39	45,62

Nota. Prom = promedio; DE = desviación estándar; CV (%) = coeficiente de variación en porcentaje.

La caracterización química del mineral aurífero muestra la presencia de cianidas como cobre, zinc, arsénico, azufre, telurio y antimonio. Estos elementos pueden afectar significativamente la eficacia de la lixiviación con tiourea, ya que algunos de ellos tienen la capacidad de reducir la cantidad de reactivo disponible para el proceso o inhibirlo directamente. Su presencia sugiere que el mineral tiene una naturaleza refractaria, lo que implica un desafío adicional en la extracción de oro. La identificación de estos componentes es fundamental para ajustar las condiciones del proceso y maximizar la recuperación del metal.

4.1.2 Recuperación de oro por lixiviación con de tiourea

En relación con el segundo problema específico, las pruebas de lixiviación con tiourea arrojaron resultados prometedores, alcanzando tasas de disolución de hasta un 40 % del oro durante las primeras horas. Este comportamiento inicial indica que la tiourea es capaz de disolver una cantidad significativa de oro rápidamente bajo condiciones óptimas. Sin embargo, la disminución de la velocidad de disolución observada después de este periodo sugiere que el agotamiento de reactantes o la formación de una capa pasivante podrían estar limitando el proceso. Este fenómeno requiere posibles soluciones, como la optimización de la concentración de tiourea el uso de aditivos que prevengan la pasivación un análisis más detallado para determinar las causas exactas y explorar.

Tabla 5

Porcentaje de recuperación

Repeticiones	Soluciones	
	Cianuro	Tiourea
1	0,77	1,30
2	1,47	3,52
3	2,98	4,40
4	4,07	6,69
5	6,07	10,56
6	9,51	--
7	11,01	--
Prom	5,13	5,29
DE	3,93	3,52
CV (%)	76,72	66,50

Nota. Datos transformados del cuadro anterior a raíz cuadrada de $X+0.5$:

Tabla 6

Porcentaje de recuperación

Repeticiones	Soluciones	
	Cianuro	Tiourea
1	1,13	1,34
2	1,40	2,00
3	1,87	2,21
4	2,14	2,68
5	2,56	3,33
6	3,16	--
7	3,39	--
Prom	2,24	2,31
DE	0,85	0,74
CV (%)	38,19	32,13

A. Pruebas de Supuestos

A.1 Homogeneidad de varianza: Prueba de Levene

Tabla 7

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
RABS Rec Oro	12	0,03	0,00	66,13

Tabla 8

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,05	1	0,05	0,29	0,6008
Tratamiento	0,05	1	0,05	0,29	0,6008
Error	1,74	10	0,17		
Total	1,79	11			

Interpretación: Como el P-valor de residuos absolutos (RABS) de la recuperación de oro, resultaron con una cifra de 0.6008 y ésta es mayor o igual a 0.05 (probabilidad), indica que los resultados de recuperación del oro mediante los dos métodos presentaron homogeneidad de varianza, por tanto, cumplieron con este supuesto mediante la prueba de Levene. Hasta este punto lo normal es realizar una prueba paramétrica de T de Student.

A.2 Normalidad de datos: Prueba de Shapiro Wilks

Tabla 9

Shapiro-Wilks (modificado)

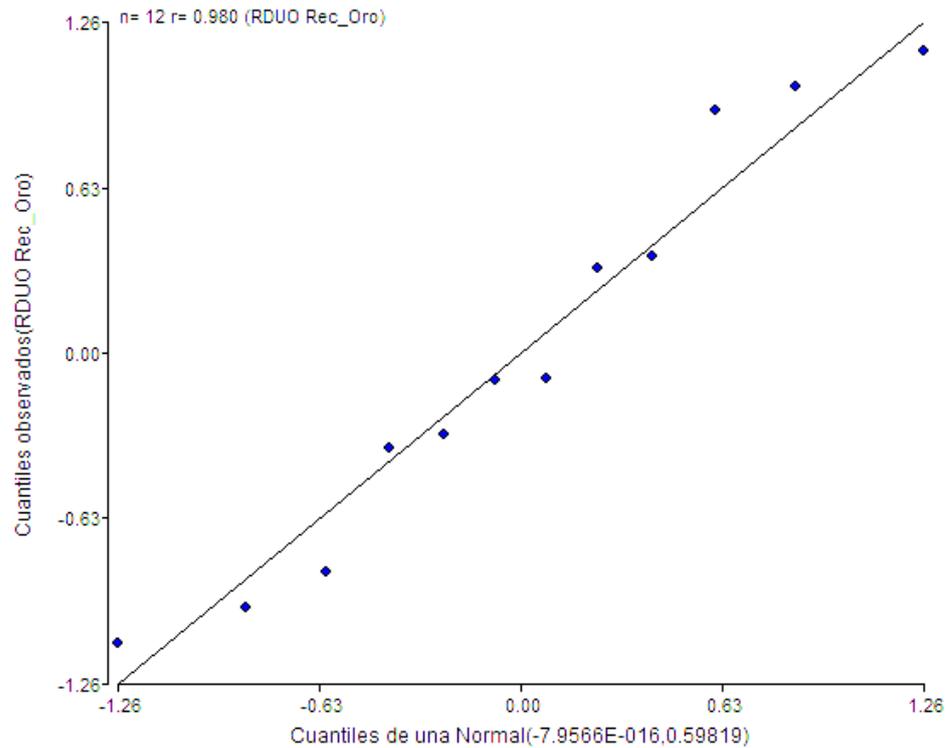
Variable	n	Media	D.E.	W*	p(Unilateral D)
RDUO Rec Oro	12	0,00	0,77	0,91	0,3228

Interpretación: Como el P-valor de residuos (RDUOS) de la recuperación de oro, resultaron con una cifra de 0.3228 y ésta es mayor o igual a 0.05 (probabilidad), indica que los resultados de recuperación del oro mediante los dos métodos presentaron Normalidad de Datos, por tanto,

cumplieron con este supuesto mediante la prueba de Shapiro - Wilks. Hasta este punto lo normal es realizar una prueba paramétrica de Análisis de Varianza.

Figura 3

Análisis de Varianza



En este gráfico Q-Q plot del software libre Infostat, se confirma que sus datos están próximos a la recta promedio, por lo que se reafirma que sus datos poseen Normalidad de Datos. Por lo tanto, al cumplir con los dos supuestos Homogeneidad de Varianza y Normalidad de Datos, es apropiado realizar la prueba paramétrica de T de Student y Tukey.

Tabla 10

Prueba T para muestras Independientes

Clasific	Variable	Grupo 1	Grupo 2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)
TRATAMIENTO	Au mg/l	{Cianuro}	{Tiosulfato}	7	5	2.24	2.31
	Media(1)-Media(2)	LI(95)	LS(95)	pHomVar	T	p-valor	prueba
	-0.08	-1.13	0.98	0.8315	-0.16	0.8756	Bilateral

Tabla 11

Análisis de la varianza

<i>Variable</i>	<i>N</i>	<i>R=</i>	<i>R= Aj</i>	<i>cv</i>
Au mg/l	12	2.6E-03	0.00	35.77

Tabla 12

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0,02	1	0,02	0,03	0,8756
TRATAMIENTO	0,02	1	0,02	0,03	0,8756
Error	6,53	10	0,66		
Total	6,60	11			

Test: Tukey Alfa=0.05 DMS=1.05831

Tabla 13

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

Tratamiento	Medias	N	E.e.
Tiosulfato	2.31	5	0.36 A
Cianuro	2.24	7	0.31 A

Nota. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

Error: 0.6580 gl: 10

Figura 4

*Comparación de recuperación de oro (mg/l) mediante cianuro y tiourea
(promedio – prueba de Tukey)*

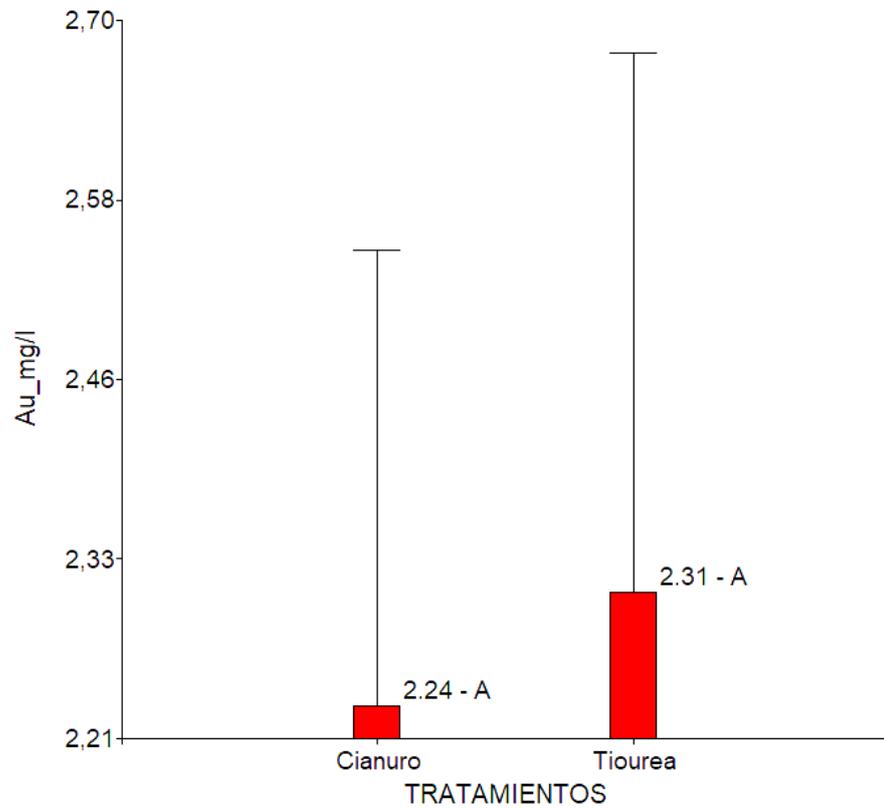
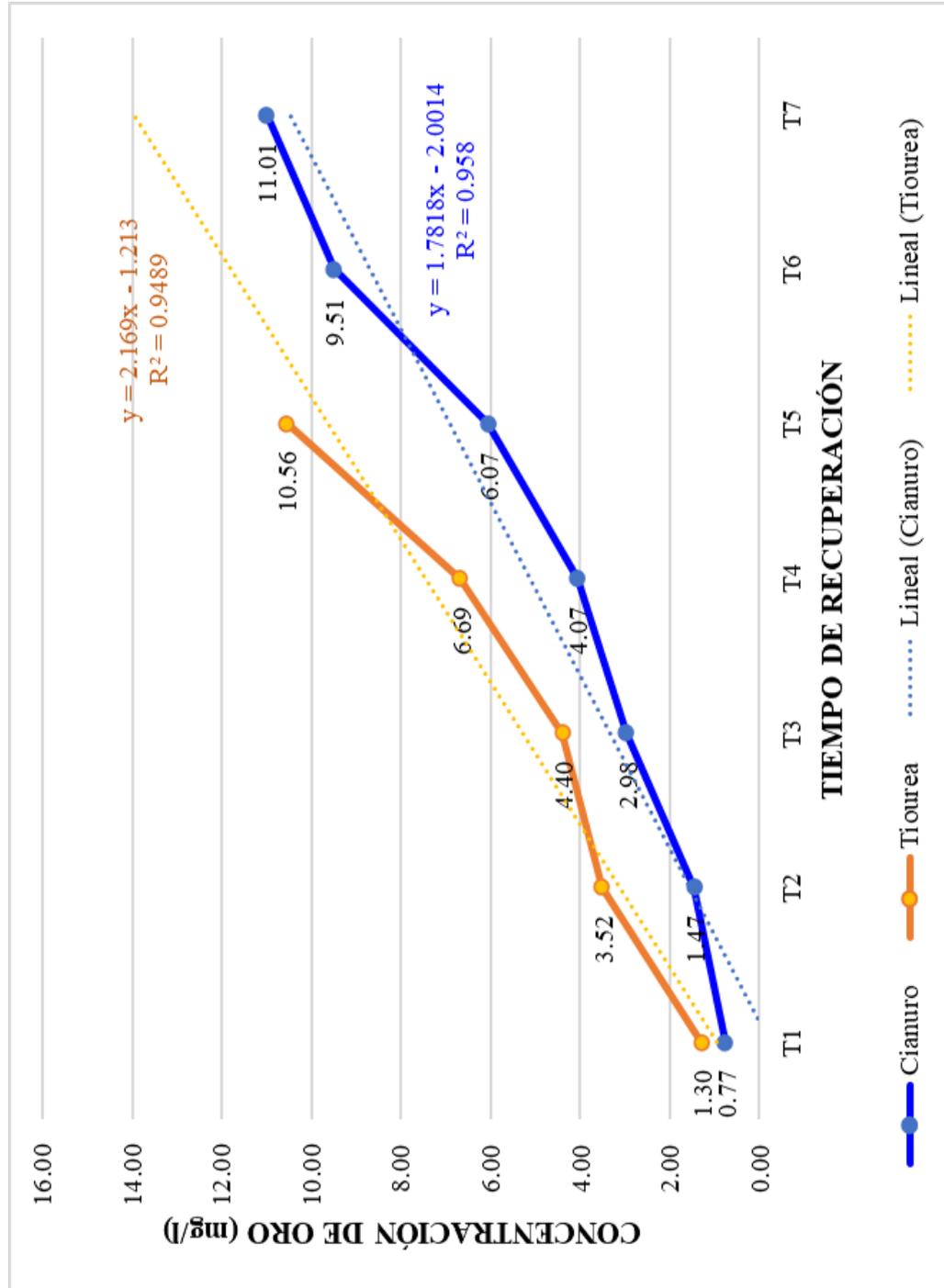


Figura 5
Regresión de la comparación de recuperación de oro (mg/l) mediante cianuro y tiourea (promedio – prueba de Tukey)



- **En la curva de TIOUREA:** Si R^2 es igual a 0.9489, quiere decir que el 94.89 % de la concentración final de oro DEPENDE del tiempo de recuperación (horas), y un 5.11 % de la concentración de oro puede deberse a otros factores desconocidos o por investigar.
 - **Por otro lado, se obtuvo una $r = 0.974$,** indicando una correlación positiva y alta (o fuerte).
 - **Asimismo, la ecuación de la regresión es:** $Y = a + bX$, reemplazando
 - $Y = -1.213 + 2.169X$, donde el valor b (2.169) indica que, al incrementar 1 hora de tiempo de recuperación, la concentración de oro incrementa en 2.169 mg.

- **En la curva de CIANURO:** Si R^2 es igual a 0.958, quiere decir que el 95.80 % de la concentración final de oro DEPENDE del tiempo de recuperación (horas), y un 4.20 % de la concentración de oro puede deberse a otros factores desconocidos o por investigar.
 - **Por otro lado, se obtuvo una $r = 0.974$,** indicando una correlación positiva y alta (o fuerte).
 - **Asimismo, la ecuación de la regresión es:** $Y = a + bX$, reemplazando
 - $Y = -2.0014 + 1.7818X$, donde el valor b (1.7818) indica que, al incrementar 1 hora de tiempo de recuperación, la concentración de oro incrementa en 1.7818 mg.

4.2 Discusión

4.2.1 Caracterización Química del Mineral

Los resultados del presente estudio sobre el mineral aurífero de Ollachea-Puno revelan una composición rica en oro, lo cual lo convierte en un recurso valioso para la explotación. Sin embargo, también se detectó una presencia significativa de elementos como cobre, arsénico y azufre, que son comunes en

minerales sulfurados. Estos elementos pueden tener un impacto negativo en la eficiencia del proceso de lixiviación con tiourea.

El cobre y el arsénico, por ejemplo, pueden actuar como competidores del oro en la formación de complejos con tiourea, reduciendo así la cantidad de tiourea disponible para disolver el oro. Además, el azufre y otros componentes sulfurados pueden formar productos secundarios no deseados que, al adsorberse en la superficie del oro, podrían formar capas pasivantes que inhiban su disolución en la solución de tiourea.

En comparación con el proceso de cianuración, que a menudo es ineficaz en minerales refractarios debido a la presencia de sulfuros, la lixiviación con tiourea ha demostrado ser una alternativa prometedora. Estudios anteriores han señalado que la tiourea puede superar algunas de las limitaciones de la cianuración, especialmente en minerales refractarios como la pirita, enargita y calcopirita. Estos minerales tienden a dificultar el proceso de disolución del oro con cianuro, mientras que la tiourea ha mostrado ser más eficaz en estas condiciones.

A pesar de sus ventajas, el proceso de lixiviación con tiourea también enfrenta desafíos, especialmente en minerales con alta concentración de elementos que interfieren, como los que se encuentran en el mineral de Ollachea. La necesidad de optimizar el pH, la concentración de reactivos y otros parámetros operativos es fundamental para mejorar la eficiencia de la lixiviación y minimizar el impacto de los elementos interferentes en el proceso.

4.2.2 Recuperación de Oro por Lixiviación con Tiourea

La lixiviación con tiourea ha generado un creciente interés en la industria minera debido a su potencial para sustituir al cianuro en la extracción de oro, especialmente en minerales refractarios o de baja ley. Investigadores como Yang et al. (2011) han destacado que la formación de complejos de tiourea con hierro y otros iones metálicos es fundamental en este proceso. Dichos complejos influyen en la cinética de disolución del oro, afectando tanto la velocidad inicial de lixiviación como la estabilidad de la tiourea en solución. Este comportamiento

químico puede representar una ventaja o un desafío, dependiendo de las condiciones del proceso y de los componentes presentes en el mineral.

Los resultados experimentales han mostrado que, bajo condiciones controladas, se logró una disolución máxima del 10.56 % de oro utilizando tiourea, en comparación con el 6.07 % obtenido mediante cianuración. Este hallazgo sugiere que la tiourea podría ser más efectiva para la extracción de oro en contextos específicos, como minerales que contienen metales de base o en ambientes donde el cianuro no es una opción viable debido a su toxicidad. Sin embargo, la mayor eficiencia de la tiourea viene acompañada de un mayor consumo de reactivo, lo que podría impactar los costos operativos.

Uno de los aspectos críticos de la lixiviación con tiourea es la disminución de la velocidad de disolución del oro después de las primeras horas de proceso. Esta reducción puede atribuirse a la formación de subproductos o a la descomposición de la tiourea, lo que disminuye su concentración en la solución y afecta la continuidad del proceso. Además, la naturaleza ácida de la lixiviación con tiourea requiere un control preciso del pH y del potencial redox para evitar la rápida oxidación del reactivo, lo que aumenta su consumo y puede afectar la viabilidad económica del proceso en operaciones a gran escala.

Desde una perspectiva más humanizada, la lixiviación con tiourea representa un avance significativo en la búsqueda de métodos más seguros y sostenibles para la extracción de oro. El reemplazo del cianuro por tiourea no solo responde a la necesidad de reducir el impacto ambiental y los riesgos para la salud humana, sino también a la creciente presión social y regulatoria que enfrentan las operaciones mineras. Las comunidades locales, muchas de las cuales dependen de la minería para su subsistencia, suelen estar en el centro del debate sobre los impactos ambientales de estas actividades. La adopción de tecnologías como la lixiviación con tiourea podría mejorar la aceptación social de la minería y contribuir al desarrollo de prácticas más responsables y sostenibles.

A pesar de sus ventajas potenciales, el uso de tiourea en la extracción de oro aún enfrenta desafíos importantes. Además del alto consumo de reactivo, la recuperación del oro a partir de soluciones de tiourea sigue siendo un área de investigación activa, ya que la estabilidad de los complejos formados y su



interacción con otros metales presentes en el mineral afectan la eficiencia del proceso. Sin embargo, con investigaciones continuas y mejoras en las técnicas de recuperación, la tiourea podría consolidarse como una alternativa viable al cianuro en el futuro cercano.



CONCLUSIONES

- Luego del análisis de caracterización del mineral aurífero de Ollachea dio como resultado en su composición partículas metálicas y compuestos sulfurados como pirita, enargita y calcopirita, además agentes cianicidas como el cobre, hierro y arsénico.
- La lixiviación utilizando tiourea demostró una velocidad considerablemente mayor que la cianuración, y mostró una mayor eficiencia alcanzando tasas de disolución de oro del 96 % después de diez horas de tratamiento, en comparación con el 46 % obtenido con la cianuración durante un periodo de 35 horas; pero los altos consumos de tiourea se traducen en un elevado costo de operación, sin embargo, su uso podría justificarse en minerales refractarios de alto tenor de oro.



RECOMENDACIONES

- Investigar la selectividad del proceso de lixiviación con tiourea en presencia de otros minerales y elementos presentes en el mineral aurífero, para comprender mejor su eficacia y posibles limitaciones.
- Realizar análisis económicos para evaluar la viabilidad económica de la lixiviación con tiourea en comparación con otros métodos de extracción de oro, considerando costos de operación, recuperación de oro y potenciales beneficios ambientales.
- Se continúe la investigación en áreas como la mejora de la eficiencia del proceso, el desarrollo de nuevas tecnologías y la exploración de aplicaciones en diferentes tipos de minerales auríferos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aylmore, M. G. (2016). Alternative Lixiviants to Cyanide for Leaching Gold Ores. In *Gold Ore Processing: Project Development and Operations* (Issue 1). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>
- Bernaola Flores, R. I. (2018). *Tiourea como alternativa ambiental al uso del Cianuro: comparación termoquímica computacional y experimental de lixiviación*. 112.
- Dong, Z., Jiang, T., Xu, B., Yang, Y., & Li, Q. (2019). An eco-friendly and efficient process of low potential thiosulfate leaching-resin adsorption recovery for extracting gold from a roasted gold concentrate. *Journal of Cleaner Production*, 229, 387–398. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.033>
- Global gold mining - statistics & facts | Statista*. (n.d.). <https://www.statista.com/topics/1204/gold/#topicOverview>
- Gonçalves, A. O., Marshall, B. G., Kaplan, R. J., Moreno-Chavez, J., & Veiga, M. M. (2017). Evidence of reduced mercury loss and increased use of cyanidation at gold processing centers in southern Ecuador. *Journal of Cleaner Production*, 165, 836–845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.097>
- Gönen, N. (2003). Leaching of finely disseminated gold ore with cyanide and thiourea solutions. *Hydrometallurgy*, 69(1–3), 169–176. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(03\)00005-7](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(03)00005-7)
- Gönen, N., Körpe, E., Yildirim, M. E., & Selengil, U. (2007). Leaching and CIL processes in gold recovery from refractory ore with thiourea solutions. *Minerals Engineering*, 20(6), 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.11.003>
- Groenewald, T. (1976). The dissolution of gold in acidic solutions of thiourea. *Hydrometallurgy*, 1(3), 277–290. [https://doi.org/10.1016/0304-386X\(76\)90004-9](https://doi.org/10.1016/0304-386X(76)90004-9)
- Gül, A., Kangal, O., Sirkeci, A. A., & Önal, G. (2012). Beneficiation of the gold bearing ore by gravity and flotation. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(2), 106–110. <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0523-4>

- Guo, X. yi, Zhang, L., Tian, Q. hua, & Qin, H. (2020). Stepwise extraction of gold and silver from refractory gold concentrate calcine by thiourea. *Hydrometallurgy*, 194(April), 105330. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105330>
- Hasab, M. G., Rashchi, F., & Raygan, S. (2014). Chloride-hypochlorite leaching and hydrochloric acid washing in multi-stages for extraction of gold from a refractory concentrate. *Hydrometallurgy*, 142, 56–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2013.11.015>
- Hilson, G., & Monhemius, A. J. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13 SPEC. ISS.), 1158–1167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.005>
- Hou, L., Valdivieso, A. L., Chen, Y., Chen, P., Zainiddinovich, N. Z., Wu, C., Song, S., & Jia, F. (2024). A highly efficient clean hydrometallurgy process for gold leaching in a Fenton oxidation assisted thiourea system. *Sustainable Materials and Technologies*, 40(March), e00975. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00975>
- Johnson, C. A. (2015). The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective. *Applied Geochemistry*, 57, 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.05.023>
- Jos, J., & Re, W. (2012). *Electrolixiviación Y Electrodeposición Tiourea a Partir De Sulfuros Concentrados Experimental Determination of the Optimum Operating Parameters Electro Leaching in the Process of Gold and Sequential Electrodeposition in Acidic Solutions of Thiourea From S. 22(1)*.
- Juarez, C. M., & Dutra, A. J. B. (2000). Gold electrowinning from thiourea solutions. *Minerals Engineering*, 13(10), 1083–1096. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(00\)00092-3](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(00)00092-3)
- La Brooy, S. R., Linge, H. G., & Walker, G. S. (1994). Review of gold extraction from ores. *Minerals Engineering*, 7(10), 1213–1241. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0892-6875(94)90114-7)
- Lacoste-Bouchet, P., Deschênes, G., & Ghali, E. (1998). Thiourea leaching of a copper-gold ore using statistical design. *Hydrometallurgy*, 47(2–3), 189–203. [https://doi.org/10.1016/s0304-386x\(97\)00043-1](https://doi.org/10.1016/s0304-386x(97)00043-1)

- Lee, H. Y., Kim, S. G., & Oh, J. K. (1997). Cementation behavior of gold and silver onto Zn, Al, and Fe powders from acid thiourea solutions. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36(3), 149–155. <https://doi.org/10.1179/cmqr.1997.36.3.149>
- Li, J., Kou, J., Sun, C., Zhang, N., & Zhang, H. (2023). A review of environmentally friendly gold lixiviants: Fundamentals, applications, and commonalities. *Minerals Engineering*, 197(March), 108074. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108074>
- Li, J., & Miller, J. D. (2002). Reaction kinetics for gold dissolution in acid thiourea solution using formamidine disulfide as oxidant. *Hydrometallurgy*, 63(3), 215–223. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(01\)00212-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(01)00212-2)
- Li, K., Li, Q., Zhang, Y., Liu, X., Yang, Y., & Jiang, T. (2023). Improved thiourea leaching of gold from a gold ore using additives. *Hydrometallurgy*, 222(January). <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106204>
- Li, K., Li, Q., Zhang, Y., Yang, Y., & Jiang, T. (2024a). Catalysis of chalcopryrite on thiourea oxidation by Fe³⁺ and the advantage of oxalate during thiourea leaching of gold. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 133(November 2023), 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.062>
- Li, K., Li, Q., Zhang, Y., Yang, Y., & Jiang, T. (2024b). Evaluating the catalytic effect of pyrite on thiourea leaching of gold in the absence and presence of citrate. *Journal of Molecular Liquids*, 399(November 2023), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.124385>
- Loyson, P. (2014). James Moir as inorganic chemist. *South African Journal of Chemistry*, 67, 167–174.
- Monhemius, J. (2018). *Recent advances in the treatment of refractory gold ores Scanned by CamScanner. November.*
- Murthy, D. S. R., Kumar, V., & Rao, K. V. (2003). Extraction of gold from an Indian low-grade refractory gold ore through physical beneficiation and thiourea leaching. *Hydrometallurgy*, 68(1–3), 125–130. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00197-4](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00197-4)

- Oraby, E. A. (2009). Gold Leaching in Thiosulfate Solutions and Its Environmental Effects Compared With Cyanide. *Doktora Tezi, Curtin University of Technology, School of Engineering and Computing, Department of Civil Engineering, November*, 239. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/148>
- Örgül, S., & Atalay, Ü. (2002). Reaction chemistry of gold leaching in thiourea solution for a Turkish gold ore. *Hydrometallurgy*, 67(1–3), 71–77. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(02\)00136-6](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(02)00136-6)
- Prasad, M. S., Mensah-Biney, R., & Pizarro, R. S. (1991). Modern trends in gold processing - overview. *Minerals Engineering*, 4(12), 1257–1277. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(91\)90171-Q](https://doi.org/10.1016/0892-6875(91)90171-Q)
- R.A. Williams. (1992). The Chemistry of gold extraction. *Minerals Engineering*, 5(9), 1069–1070. [https://doi.org/10.1016/0892-6875\(92\)90134-u](https://doi.org/10.1016/0892-6875(92)90134-u)
- Rivera Mendoza, D. G., Calla Choque, D., & Chavez Gutierrez, E. R. (2023). Efecto De La Concentración De Tiourea En La Lixiviación De Oro En La Minera Antuyo. *Revista de Investigaciones*, 12(2), 104–114. <https://doi.org/10.26788/ri.v12i2.4461>
- Romero Bonilla, H. I., Guerrero Rodríguez, R., & Mora Morocho, M. (2021). Effect of the speed of the agitation on the kinetics of the leaching with thiourea of gold-floated minerals. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 243–258. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.531.3>
- S. Orgul, & Atalay, U. (2007). *GOLD EXTRACTION FROM KAYMAZ GOLD ORE BY THIOUREA LEACHING*. 2(2), 22–28.
- Sánchez, O. A., & Castrejón, R. R. Y. (2014). Influencia del pH y tiempo en la extracción de oro utilizando tiourea con oxidante inorgánico y orgánico, mediante lixiviación por agitación - Cajamarca, 2019. *Ucv*, 0–116. <http://hdl.handle.net/11537/23824>
- Sasaki, K., Suyama, I., Aoki, Y., Konadu, K. T., Cindy, Chuaicham, C., Miki, H., & Hirajima, T. (2023). Significance of Fe contents on the surface of the gold ores in gold leaching by thiourea and ethylene thiourea. *Minerals Engineering*, 191(November 2022), 107957. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107957>



- Sasaki, K., Suyama, I., Takimoto, R., Konadu, K. T., Ichinose, H., & Eksteen, J. (2024). Complete gold extraction and recovery from double refractory gold ores by thiourea after bio-oxidation. *Hydrometallurgy*, 227(November 2023), 106330. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2024.106330>
- Tanriverdi, M., Mordoğan, H., & Ipekoğlu, Ü. (2005). Leaching of Ovacık gold ore with cyanide, thiourea and thiosulphat. *Minerals Engineering*, 18(3), 363–365. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.012>
- Ubal dini, S., Fornari, P., Massidda, R., & Abbruzzese, C. (1998). An innovative thiourea gold leaching process. *Hydrometallurgy*, 48(1), 113–124. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(97\)00076-5](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(97)00076-5)
- Whitehead, J. A., Zhang, J., McCluskey, A., & Lawrance, G. A. (2009). Comparative leaching of a sulfidic gold ore in ionic liquid and aqueous acid with thiourea and halides using Fe(III) or HSO₅⁻ oxidant. *Hydrometallurgy*, 98(3–4), 276–280. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.05.012>
- Yang, X., Moats, M. S., Miller, J. D., Wang, X., Shi, X., & Xu, H. (2011). Thiourea-thiocyanate leaching system for gold. *Hydrometallurgy*, 106(1–2), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.11.018>
- Yannopoulos, J. C. (1991). *The Extractive metallurgy of Gold* (1st editio). <https://doi.org/10.31399/asm.tb.bcp.t52230071>

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

Título	Recuperación de oro por el proceso de lixiviación con tiourea para mineral aurífero en Ollachea - Puno
Problema de investigación	¿Cómo influye la lixiviación con tiourea en la recuperación de oro a partir de minerales auríferos en Ollachea?
Objetivo General	Evaluar la efectividad del proceso de lixiviación con tiourea en la recuperación de oro de los minerales auríferos de Ollachea, Puno.

Objetivos Específicos	Hipótesis	Variables	Métodos
1. Determinar la influencia del pH en la eficiencia del proceso de lixiviación con tiourea.	La eficiencia de la lixiviación con tiourea depende significativamente del pH en un rango ácido.	Variable independiente: pH Variable dependiente: Recuperación de oro	Análisis de laboratorio ajustando el pH en diferentes niveles y midiendo la recuperación de oro.
2. Evaluar el consumo de tiourea en función del tiempo de lixiviación.	A mayor tiempo de lixiviación, el consumo de tiourea aumenta.	Variable independiente: Tiempo de lixiviación Variable dependiente: Consumo de tiourea	Monitoreo del consumo de tiourea en intervalos de tiempo durante la lixiviación.
3. Analizar el impacto del oxidante (Fe^{3+}) en el proceso de lixiviación.	La presencia de un oxidante (Fe^{3+}) incrementa la eficiencia de la disolución de oro en la solución de tiourea.	Variable independiente: Concentración de Fe^{3+} Variable dependiente: Eficiencia en la disolución del oro	Ensayos con distintas concentraciones de Fe^{3+} en la solución de lixiviación.
4. Comparar la lixiviación con tiourea frente a la lixiviación con cianuro en términos de impacto ambiental.	La lixiviación con tiourea presenta un menor impacto ambiental en comparación con el cianuro.	Variable independiente: Tipo de lixivante Variable dependiente: Impacto ambiental	Evaluación comparativa de los residuos generados en ambos procesos y su tratamiento

Anexo 2. Resultados de pruebas de barrido electrónico SEM

1. *Morfología de la Superficie Antes del Proceso de Lixiviación*

- **Imagen SEM a 1000x:** Antes de la lixiviación, la superficie del mineral aurífero muestra una estructura densa con partículas de sulfuro (pirita y arsenopirita). El oro se encuentra finamente disperso dentro de estas matrices, lo que confirma la naturaleza refractaria del mineral.
- **Análisis elemental (EDX):** Las partículas analizadas presentan picos de **Fe, S, As**, con trazas de **Au** incrustadas en las matrices de sulfuros.

2. *Morfología de la Superficie Después de la Lixiviación con Tiourea*

- **Imagen SEM a 1000x:** Luego de la lixiviación, la superficie del mineral muestra una notable erosión en las partículas de sulfuro. El oro previamente incrustado ha sido parcialmente removido, dejando cavidades que indican la disolución del metal. También se observan depósitos de productos secundarios de la reacción.
- **Análisis elemental (EDX):** Los picos de **Au** han disminuido considerablemente en las zonas analizadas, lo que indica que la mayor parte del oro ha sido disuelto en la solución de tiourea. Los picos de **Fe** y **S** también han reducido su intensidad, lo que sugiere que parte de los sulfuros ha sido lixiviada junto con el oro.

3. *Imágenes Comparativas (Antes y Después)*

- **Superficie sin tratar:** La imagen inicial muestra una textura relativamente suave con partículas incrustadas, lo que dificulta la liberación del oro mediante lixiviación tradicional con cianuro.
- **Superficie tratada con tiourea:** Posterior a la lixiviación, las imágenes revelan una superficie más porosa, con indicios de la extracción del oro y sulfuros, lo que corrobora la eficacia del proceso de lixiviación con tiourea en comparación con otros métodos.

4. *Implicaciones de los Resultados SEM*

- **Eficiencia de la Lixiviación:** Las imágenes SEM muestran una disminución significativa en el contenido de oro después del proceso de lixiviación con tiourea, lo que sugiere que este reactivo es eficaz para disolver el oro en condiciones controladas de pH ácido.
- **Impacto en los Minerales Asociados:** La lixiviación también afectó la estructura de los minerales asociados, como la pirita y la arsenopirita, lo que contribuyó a liberar el oro encapsulado en estos sulfuros.

Discusión de los Resultados

- La lixiviación con tiourea ha demostrado ser un proceso eficiente para la disolución del oro, según lo observado en las imágenes SEM.
- La presencia de cavidades en la superficie de los minerales refractarios sugiere que el oro fue disuelto, lo que coincide con las predicciones teóricas sobre el comportamiento de la tiourea en condiciones ácidas.
- Los residuos de sulfuro observados en las imágenes post-lixiviación indican que el proceso también afecta a otros minerales, lo que podría influir en el consumo de reactivos.

Project: Mineral

Mineral1A

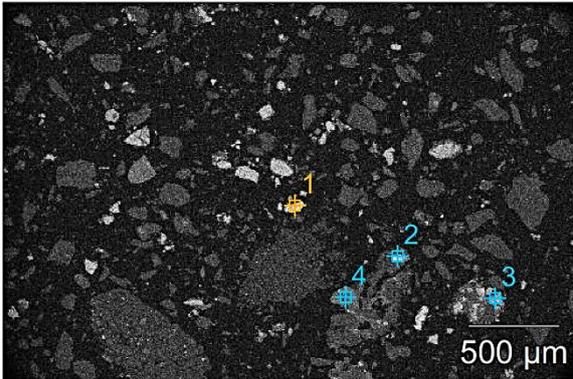
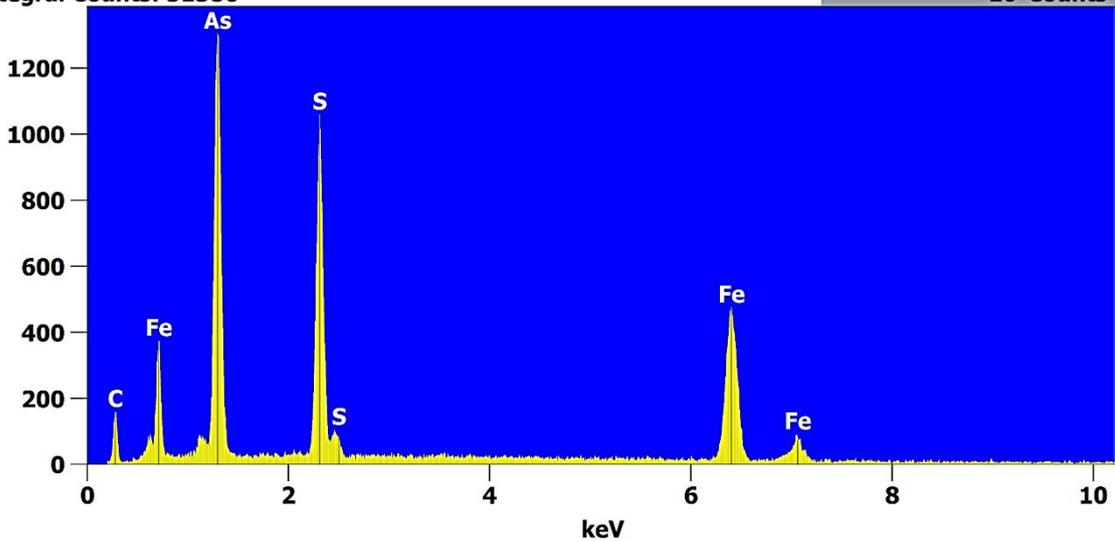


Image Name: Mineral1A
Image Resolution: 512 by 340
Image Pixel Size: 6.20 μm
Acc. Voltage: 21.0 kV
Magnification: 65

Full scale counts: 1305
Integral Counts: 51586

Mineral1A_pt1

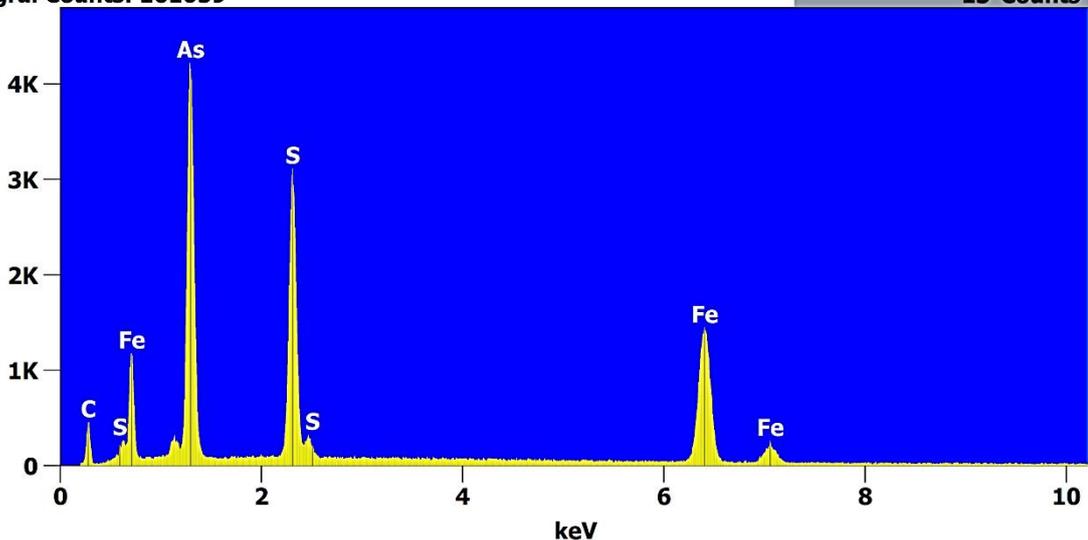
Cursor: 10.211 keV
10 Counts



Full scale counts: 4225
Integral Counts: 161059

Mineral1A_pt2

Cursor: 10.211 keV
15 Counts



Project: Mineral

Mineral1A

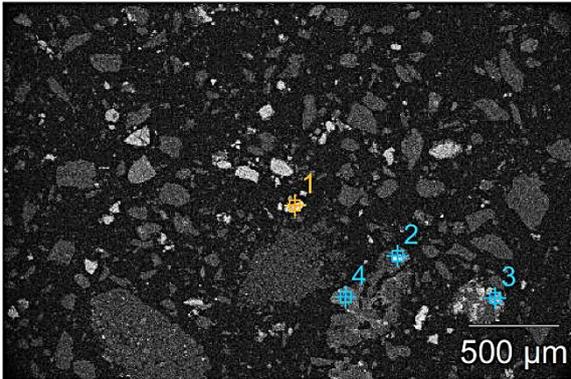
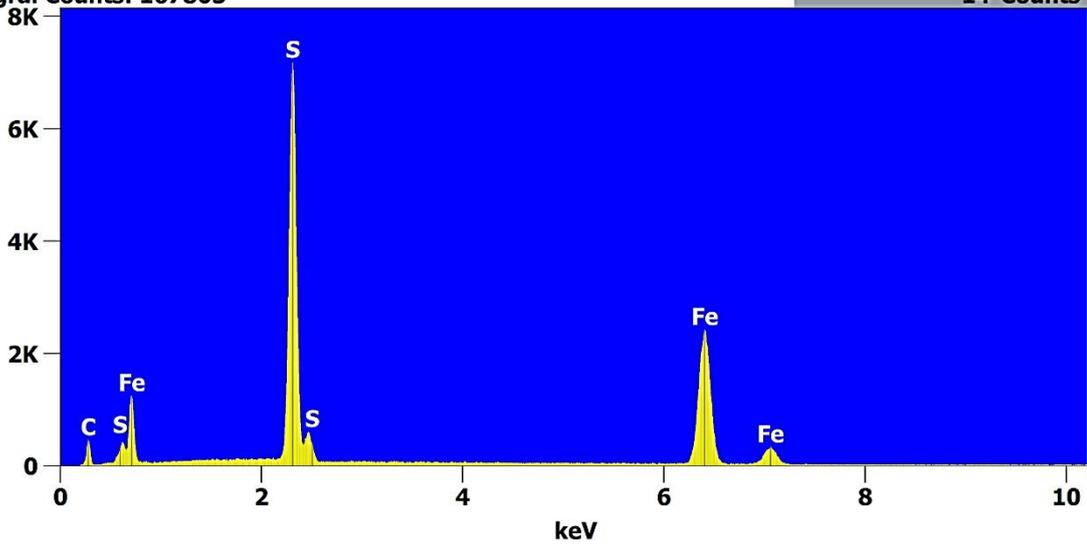


Image Name: Mineral1A
 Image Resolution: 512 by 340
 Image Pixel Size: 6.20 μm
 Acc. Voltage: 21.0 kV
 Magnification: 65

Full scale counts: 7172
 Integral Counts: 167805

Mineral1A_pt3

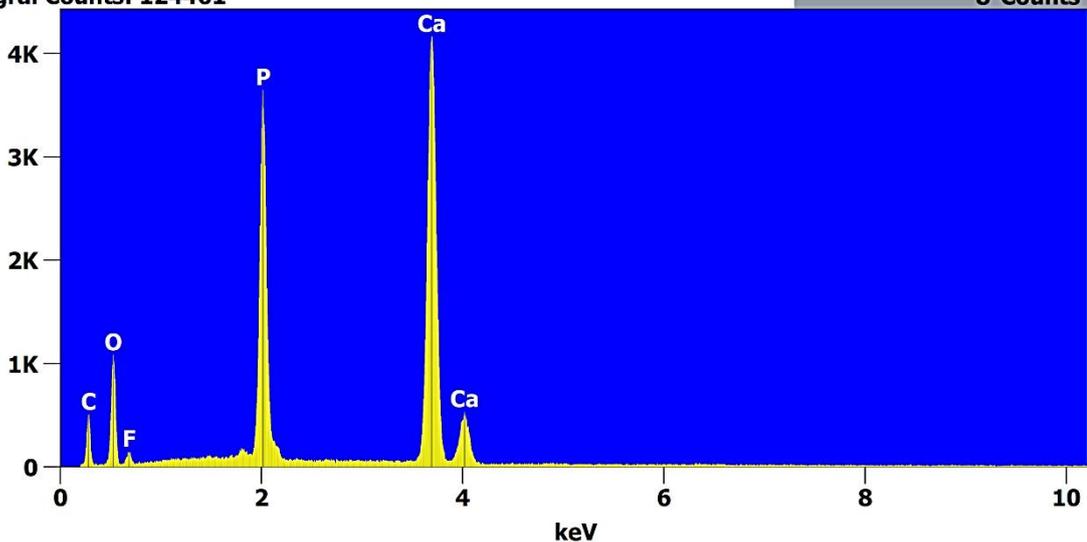
Cursor: 10.211 keV
 14 Counts



Full scale counts: 4164
 Integral Counts: 124461

Mineral1A_pt4

Cursor: 10.211 keV
 8 Counts



Project: Mineral

Net Counts

	C	O	F	P	S	Ca	Fe	As
Mineral1A_pt1	808				10143		7080	2157
Mineral1A_pt2	2248				31862		22485	6722
Mineral1A_pt3	2200				75063		37517	
Mineral1A_pt4	2372	5221	596	33096		49415		

Intensity

	C	O	F	P	S	Ca	Fe	As
Mineral1A_pt1	---				---		---	---
Mineral1A_pt2	---				---		---	---
Mineral1A_pt3	---				---		---	---
Mineral1A_pt4	---	---	---	---		---		

Weight %

	C	O	F	P	S	Ca	Fe	As
Mineral1A_pt1	8.92				16.95		33.48	40.65
Mineral1A_pt2	8.02				17.13		34.16	40.69
Mineral1A_pt3	7.90				33.95		58.15	
Mineral1A_pt4	5.76	27.99	2.61	18.64		45.00		

Atom %

	C	O	F	P	S	Ca	Fe	As
Mineral1A_pt1	30.78				21.91		24.84	22.48
Mineral1A_pt2	28.33				22.67		25.95	23.05
Mineral1A_pt3	23.84				38.40		37.76	
Mineral1A_pt4	11.72	42.77	3.36	14.71		27.45		

Project: Mineral

Mineral1B

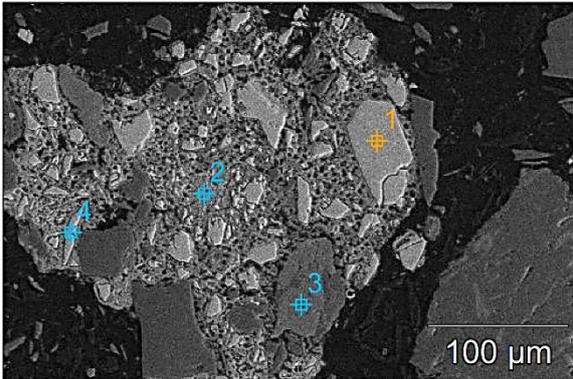
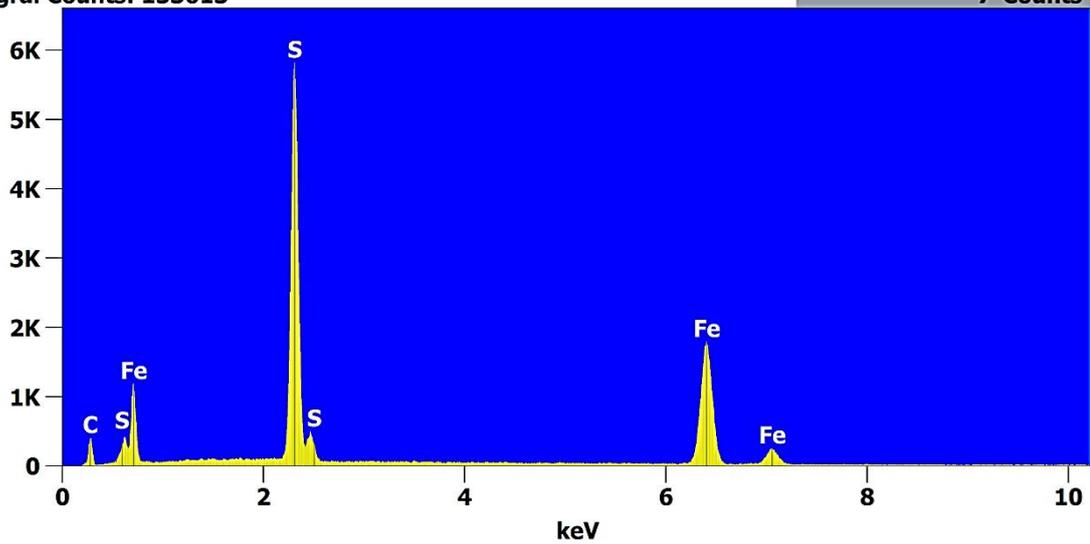


Image Name: Mineral1B
Image Resolution: 512 by 340
Image Pixel Size: 0.81 μm
Acc. Voltage: 20.0 kV
Magnification: 500

Full scale counts: 5818
Integral Counts: 133613

Mineral1B_pt1

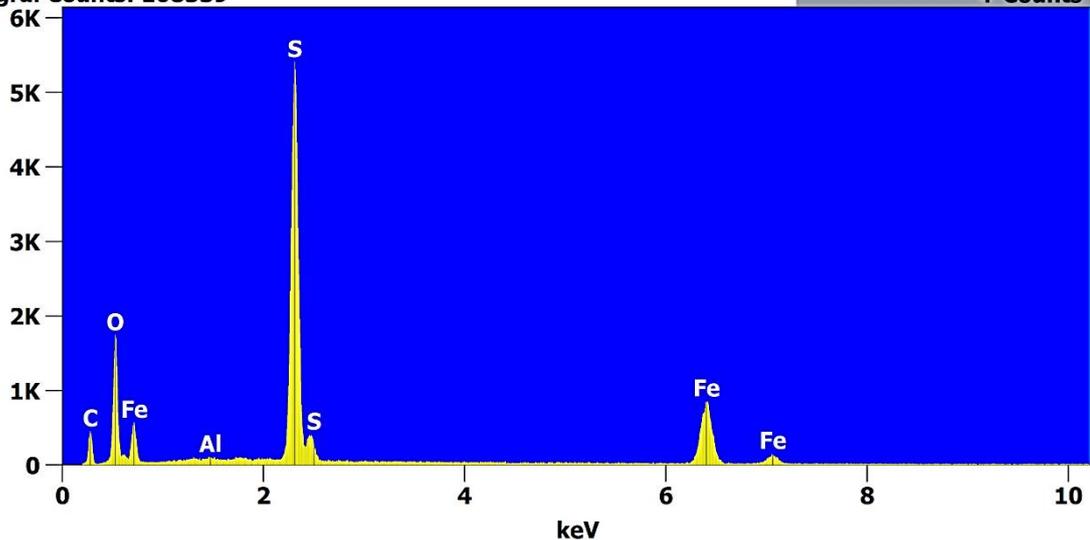
Cursor: 10.211 keV
7 Counts



Full scale counts: 5409
Integral Counts: 108339

Mineral1B_pt2

Cursor: 10.211 keV
4 Counts



Project: Mineral

Mineral1B

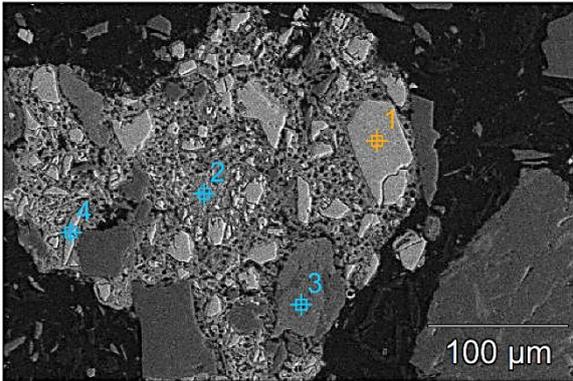
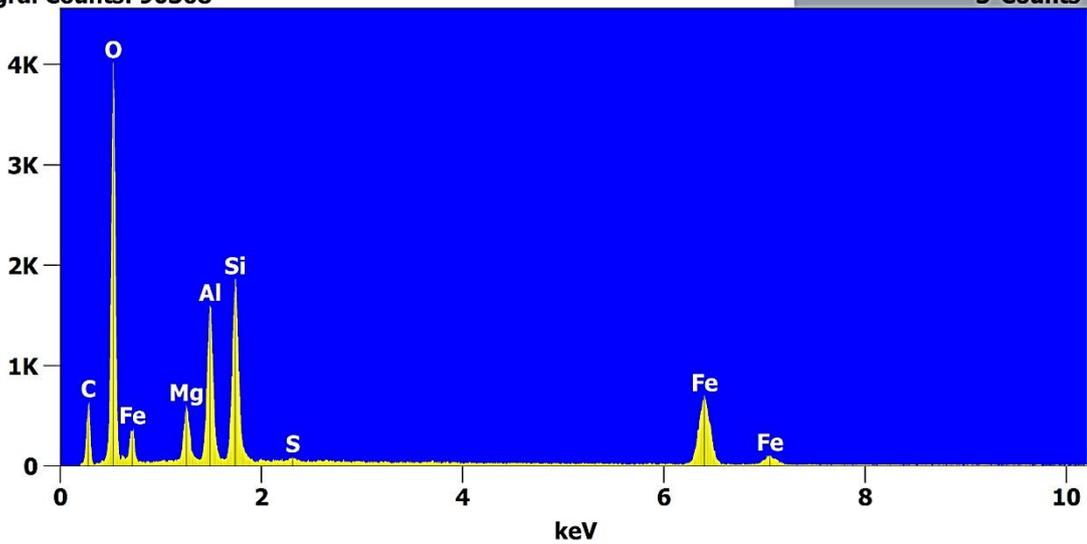


Image Name: Mineral1B
 Image Resolution: 512 by 340
 Image Pixel Size: 0.81 μm
 Acc. Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 500

Full scale counts: 4015
 Integral Counts: 90368

Mineral1B_pt3

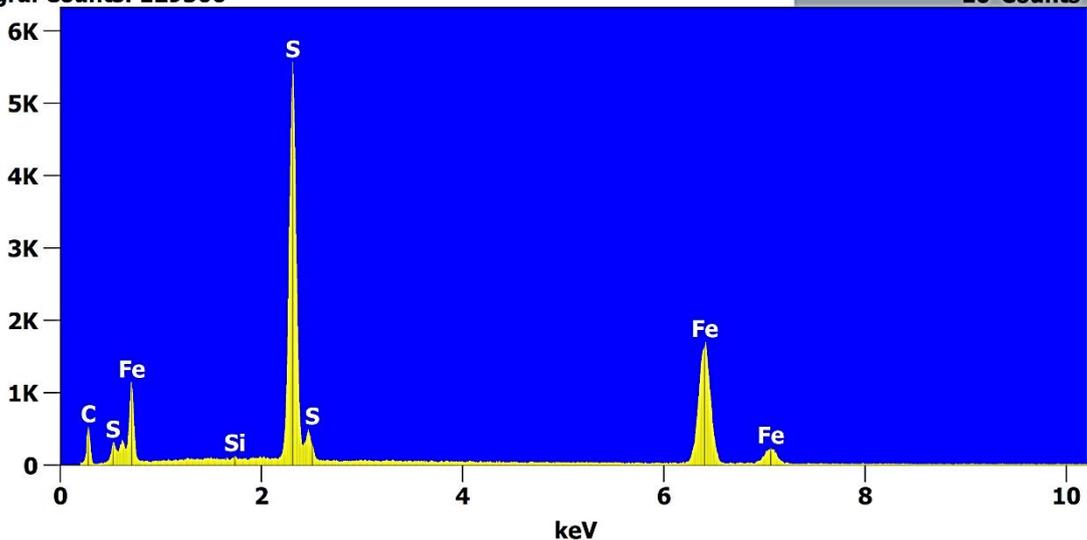
Cursor: 10.211 keV
 5 Counts



Full scale counts: 5569
 Integral Counts: 129500

Mineral1B_pt4

Cursor: 10.211 keV
 10 Counts



Project: Mineral

Net Counts

	C	O	Mg	Al	Si	S	Fe
Mineral1B_pt1	2026					60260	27244
Mineral1B_pt2	2075	8377		143		55863	12461
Mineral1B_pt3	2630	18423	3676	11177	14335	367	10166
Mineral1B_pt4	2585				120	56067	26092

Intensity

	C	O	Mg	Al	Si	S	Fe
Mineral1B_pt1	---					---	---
Mineral1B_pt2	---	---		---		---	---
Mineral1B_pt3	---	---	---	---	---	---	---
Mineral1B_pt4	---				---	---	---

Weight %

	C	O	Mg	Al	Si	S	Fe
Mineral1B_pt1	8.44					34.55	57.01
Mineral1B_pt2	9.91	23.48		0.11		35.79	30.72
Mineral1B_pt3	8.86	37.10	3.82	9.79	12.56	0.29	27.59
Mineral1B_pt4	10.77				0.08	33.02	56.13

Atom %

	C	O	Mg	Al	Si	S	Fe
Mineral1B_pt1	25.08					38.48	36.44
Mineral1B_pt2	20.81	37.03		0.10		28.17	13.88
Mineral1B_pt3	16.29	51.23	3.47	8.02	9.88	0.20	10.91
Mineral1B_pt4	30.56				0.10	35.09	34.24

Project: Mineral

Mineral1C

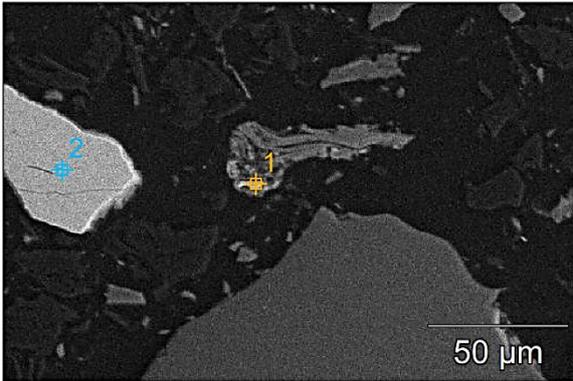
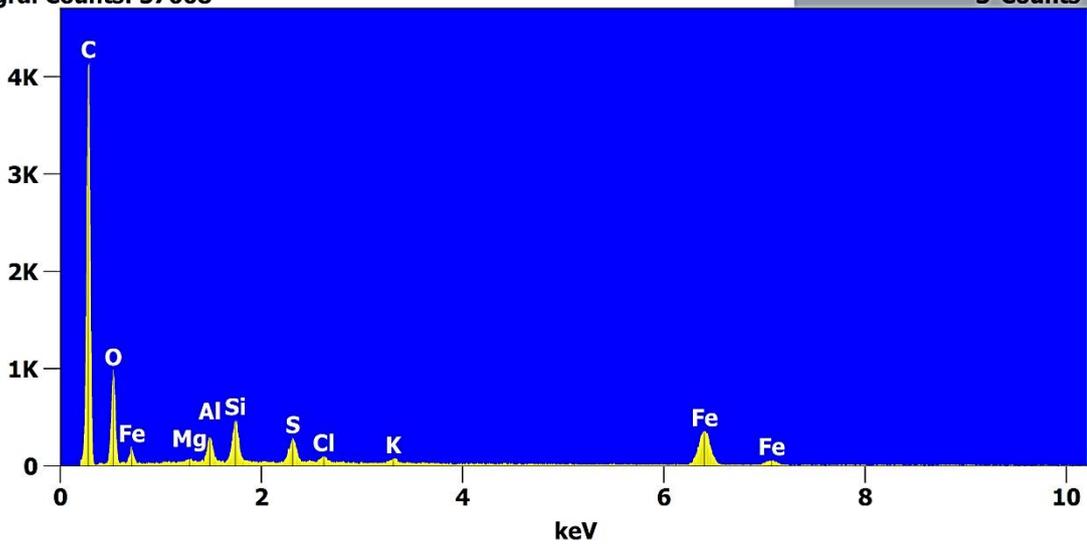


Image Name: Mineral1C
 Image Resolution: 512 by 340
 Image Pixel Size: 0.40 μm
 Acc. Voltage: 20.0 kV
 Magnification: 1000

Full scale counts: 4141
 Integral Counts: 57668

Mineral1C_pt1

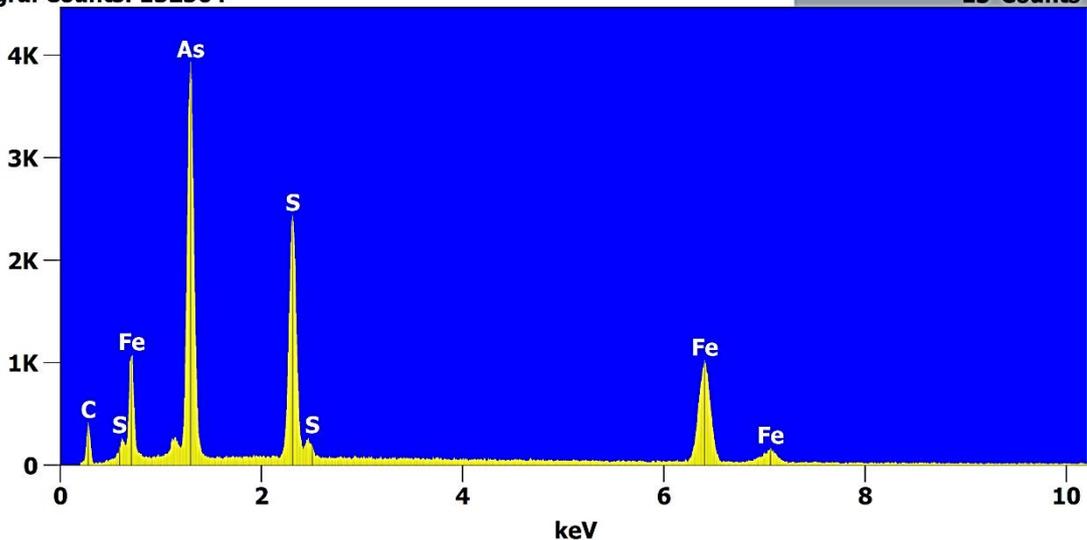
Cursor: 10.211 keV
 3 Counts



Full scale counts: 3933
 Integral Counts: 132564

Mineral1C_pt2

Cursor: 10.211 keV
 15 Counts



Project: Mineral

Net Counts

	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	As
Mineral1C_pt1	19370	4510	138	1741	3479	2790	595	464	5498	
Mineral1C_pt2	1973					25094			15141	4245

Intensity

	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	As
Mineral1C_pt1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mineral1C_pt2	---					---			---	---

Weight %

	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	As
Mineral1C_pt1	48.35	22.11	0.18	1.85	3.55	2.66	0.69	0.62	19.99	
Mineral1C_pt2	8.72					17.98			33.11	40.19

Atom %

	C	O	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Fe	As
Mineral1C_pt1	66.14	22.71	0.12	1.13	2.08	1.36	0.32	0.26	5.88	
Mineral1C_pt2	30.04					23.21			24.54	22.21

Project: Mineral

Mineral1D

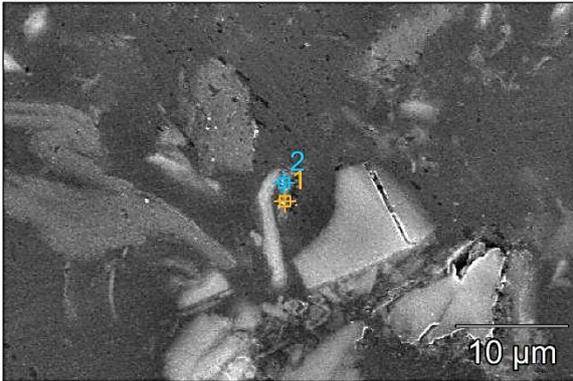
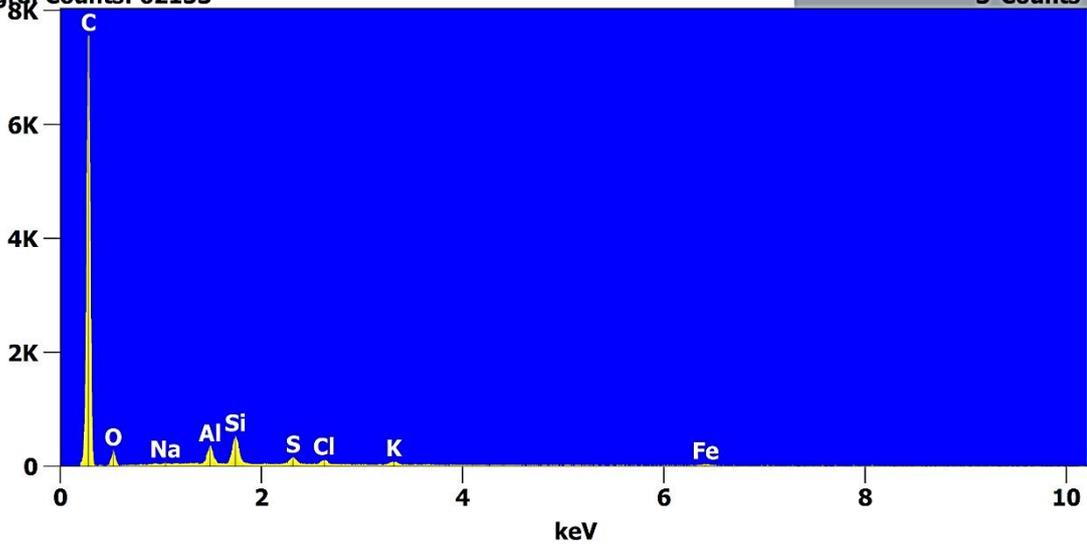


Image Name: Mineral1D
Image Resolution: 512 by 340
Image Pixel Size: 0.10 µm
Acc. Voltage: 25.2 kV
Magnification: 4000

Full scale counts: 7556
Integral Counts: 62153

Mineral1D_pt1

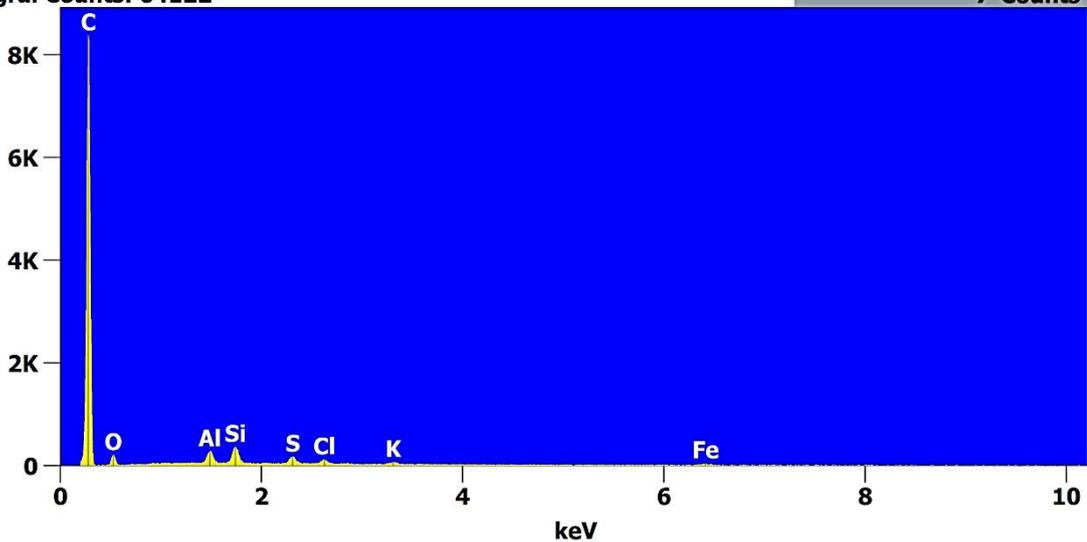
Cursor: 10.211 keV
3 Counts



Full scale counts: 8382
Integral Counts: 64122

Mineral1D_pt2

Cursor: 10.211 keV
7 Counts





Project: Mineral

Net Counts

	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Au
Mineral1D_pt1	33009	978	40	2154	4069	1312	792	617	413	8
Mineral1D_pt2	36515	710		1717	2715	1369	705	400	359	55

Intensity

	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Au
Mineral1D_pt1	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Mineral1D_pt2	---	---		---	---	---	---	---	---	---

Weight %

	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Au
Mineral1D_pt1	79.70	10.83	0.06	1.98	3.63	1.10	0.80	0.71	1.11	0.08
Mineral1D_pt2	83.23	8.54		1.64	2.52	1.20	0.74	0.48	1.01	0.64

Atom %

	C	O	Na	Al	Si	S	Cl	K	Fe	Au
Mineral1D_pt1	87.16	8.89	0.04	0.96	1.70	0.45	0.30	0.24	0.26	0.01
Mineral1D_pt2	89.93	6.93		0.79	1.16	0.48	0.27	0.16	0.23	0.04

Project: Mineral

Mineral1E

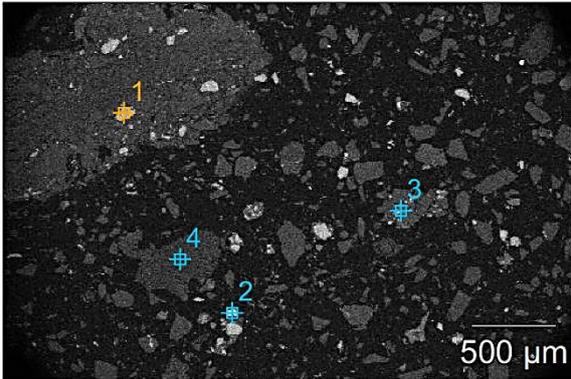
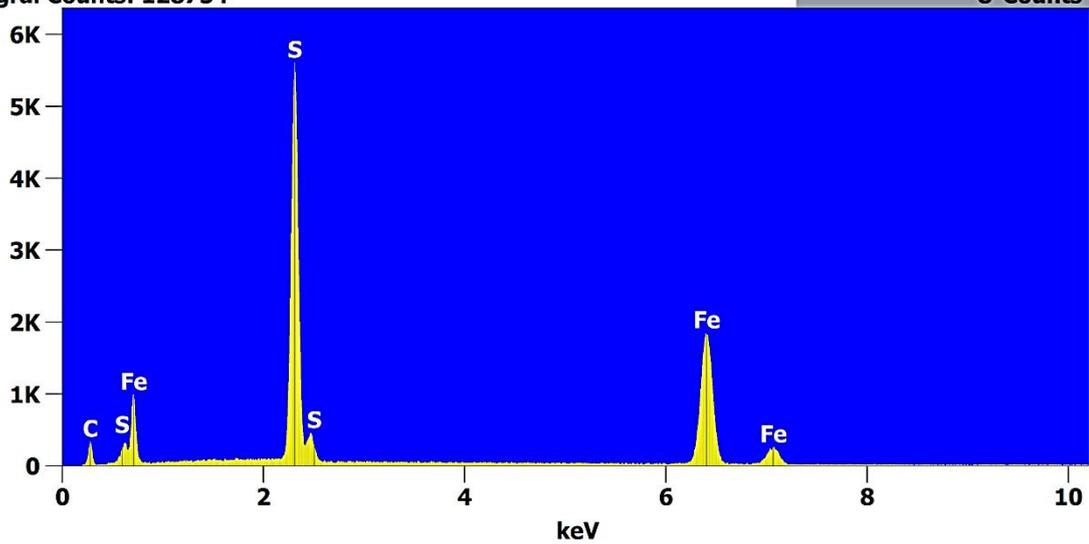


Image Name: Mineral1E
 Image Resolution: 512 by 340
 Image Pixel Size: 6.72 μm
 Acc. Voltage: 21.0 kV
 Magnification: 60

Full scale counts: 5604
 Integral Counts: 128754

Mineral1E_pt1

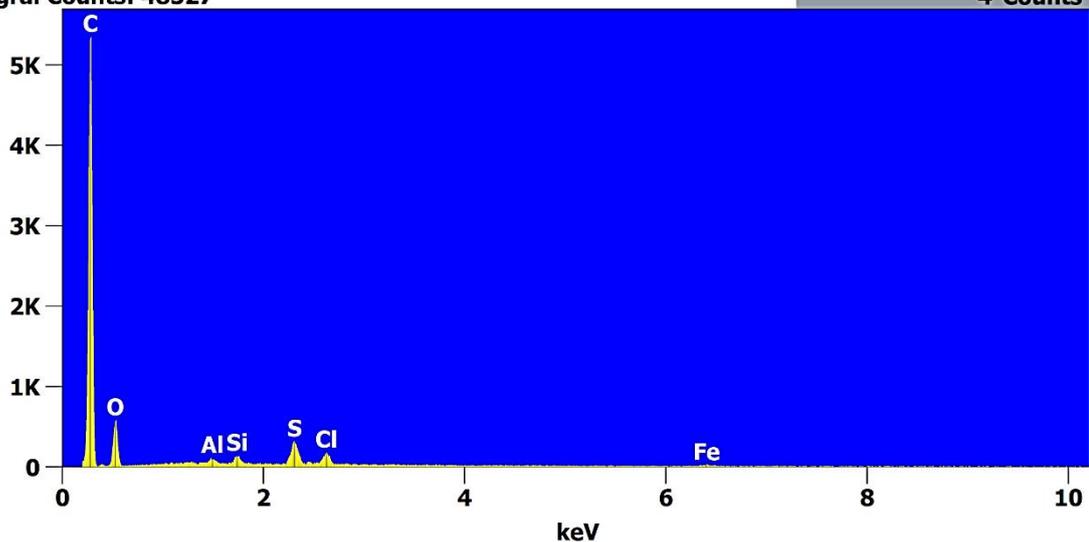
Cursor: 10.211 keV
 8 Counts



Full scale counts: 5351
 Integral Counts: 48527

Mineral1E_pt2

Cursor: 10.211 keV
 4 Counts



Project: Mineral

Mineral1E

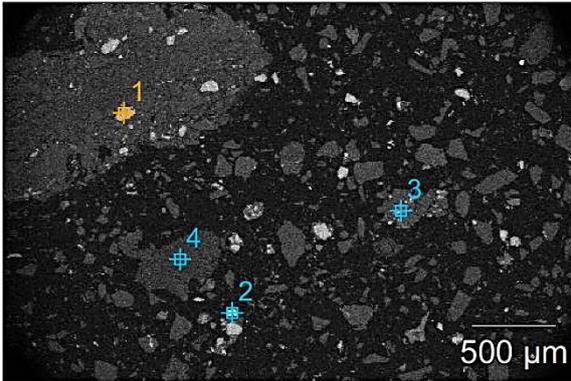
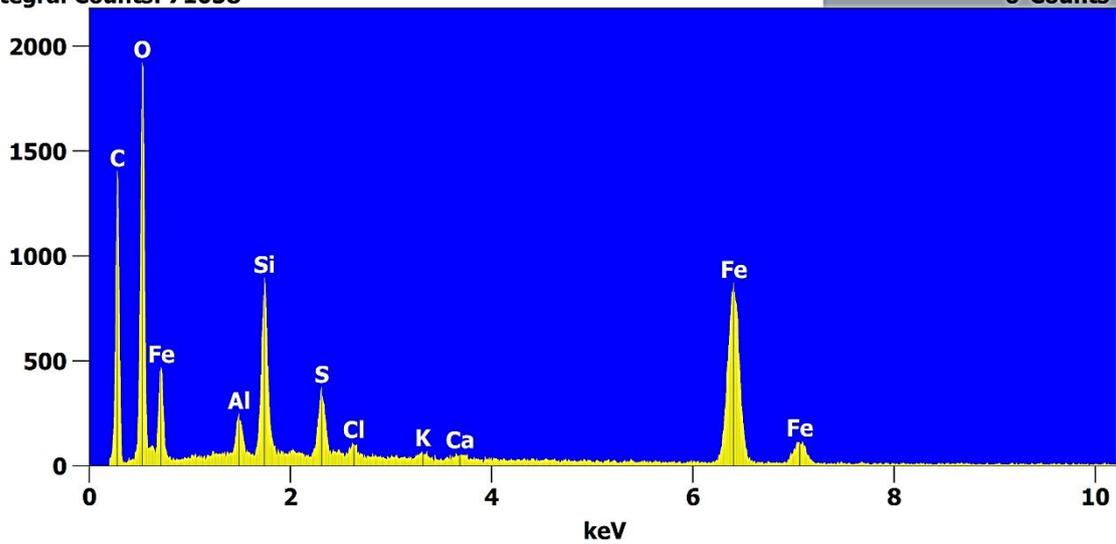


Image Name: Mineral1E
 Image Resolution: 512 by 340
 Image Pixel Size: 6.72 μm
 Acc. Voltage: 21.0 kV
 Magnification: 60

Full scale counts: 1920
 Integral Counts: 71058

Mineral1E_pt3

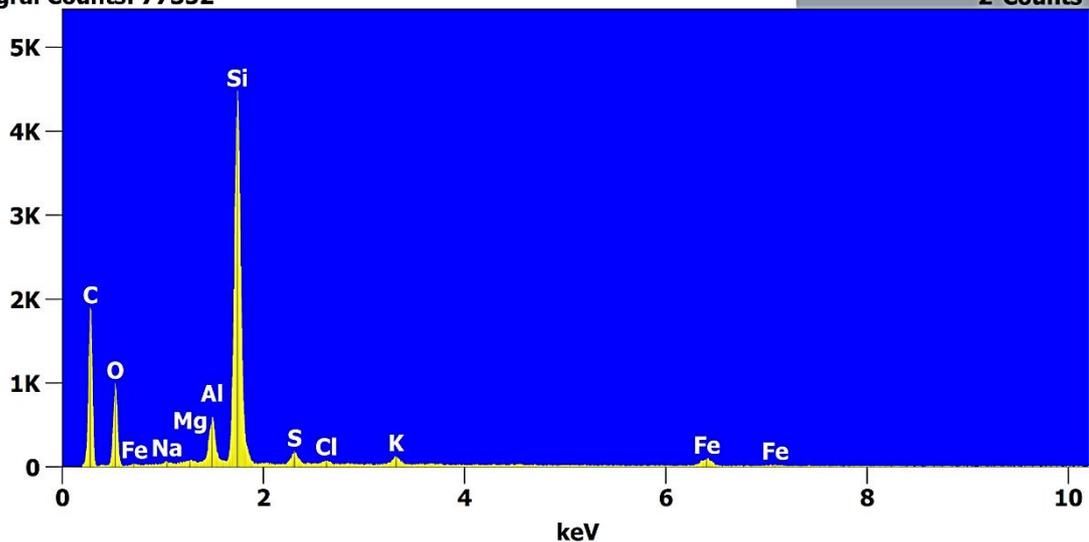
Cursor: 10.211 keV
 6 Counts



Full scale counts: 4476
 Integral Counts: 77352

Mineral1E_pt4

Cursor: 10.211 keV
 2 Counts



Project: Mineral

Net Counts

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Mineral1E_pt1	1639						57576				29068
Mineral1E_pt2	25315	2810			379	726	3047	1320			222
Mineral1E_pt3	6518	9200			1440	6793	3335	505	367	262	13408
Mineral1E_pt4	9075	4549	249	240	3810	36361	1569	450	981		1227

Intensity

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Mineral1E_pt1	---						---				---
Mineral1E_pt2	---	---			---	---	---	---			---
Mineral1E_pt3	---	---			---	---	---	---	---	---	---
Mineral1E_pt4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Weight %

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Mineral1E_pt1	7.63						33.85				58.51
Mineral1E_pt2	66.95	25.18			0.47	0.88	3.56	1.94			1.01
Mineral1E_pt3	21.06	27.96			1.54	6.61	2.87	0.52	0.42	0.32	38.71
Mineral1E_pt4	40.06	21.75	0.29	0.21	2.90	28.28	1.37	0.46	1.13		3.53

Atom %

	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe
Mineral1E_pt1	23.20						38.55				38.25
Mineral1E_pt2	75.52	21.32			0.24	0.43	1.50	0.74			0.25
Mineral1E_pt3	38.04	37.91			1.24	5.10	1.94	0.32	0.23	0.17	15.04
Mineral1E_pt4	55.79	22.74	0.21	0.15	1.80	16.84	0.72	0.22	0.48		1.06



Anexo 3. Resultados de pruebas de determinación de elementos químicos por ensayos de fuego y AA



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-22-00871

Fecha de emisión: 11/02/2022

Página 1 de 1

Clave generada : FE781BAD

Señores: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Dirección: PUNO
Atención: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Recepción: 9/02/2022
Realización: 9/02/2022
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*552 Método de ensayo a fuego para oro por reconocimiento gravimetría

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*552	
				Au	
				g/TM	oz/TC
MN22001651	M-01 LEY DE CABEZA	No proporcionado por el cliente.	Mineral pulverizado	62,37	1,8195
MN22001652	M-02 RELAVE DE CIANURACION	No proporcionado por el cliente.	Relave	18,51	0,5401
MN22001653	M-03 RELAVE LIXIVIACION	No proporcionado por el cliente.	Relave	22,27	0,6496

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"a<Valor numérico">=Limite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú (054)443294 - (054)444582.



Verificar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Río Seco C-1 Cerro Colorado – Arequipa – Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-22-00067

Fecha de emisión: 10/02/2022

Página 1 de 1
Clave generada : 2EC33BF4

Señores: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Dirección: PUNO
Atención: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Recepción: 9/02/2022
Realización: 9/02/2022
Observación El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(e) Descripción de Muestra	*901	
				Au	mg/L
SS22000208	M - 01	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	0,52	
SS22000209	M - 02	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	0,88	
SS22000210	M - 03	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1,71	
SS22000211	M - 04	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,88	
SS22000212	M - 05	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,30	
SS22000213	M - 06	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,98	
SS22000214	M - 07	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8,46	
SS22000215	M - 08	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8,68	
SS22000216	M - 09	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1,51	
SS22000217	M - 10	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1,94	
SS22000218	M - 11	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,52	
SS22000219	M - 12	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3,92	
SS22000220	M - 13	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4,90	
SS22000221	M - 14	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,00	
SS22000222	M - 15	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,08	
SS22000223	M - 16	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5,03	

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

*a<Valor numérico>=Limite de detección del método, *b<Valor Numérico>=Limite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada.

Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información.

Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>.

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú.(054)443294 - (054)444582.



Validar el informe
vía web



Laboratorios Analíticos del Sur

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Ría Seco C-1 Cerro Colorado - Arequipa - Perú
www.laboratoriosanaliticosdelsur.com

+51 (054) 443294
+51 (054) 444582
+51 958 961 254
+51 958 961 253

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-22-00029

Fecha de emisión: 21/01/2022

Página 1 de 1
Clave generada: AD17D3F7

Señores: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Dirección: PUNO
Atención: JULIO ALBERTO MAQUERA GIL
Recepción: 21/01/2022
Realización: 21/01/2022
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra.

Métodos ensayados

*4016 Método de ensayo para Hierro por absorción atómica en soluciones alcalinas lectura directa

*901 Método de ensayo para Oro por Absorción Atómica en solución Alcalina

Código Interno L.A.S	(e) Nombre de Muestra	(e) Procedencia de Muestra	(e) Descripción de Muestra	*4016 *901	
				Fe mg/L	Au mg/L
SS22000065	M-01	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	0,77
SS22000066	M-02	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	1,47
SS22000067	M-03	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	2,98
SS22000068	M-04	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	4,07
SS22000069	M-05	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	6,07
SS22000070	M-06	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	9,51
SS22000071	M-07	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	11,01
SS22000072	M-08	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	1,30
SS22000073	M-09	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	3,52
SS22000074	M-10	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	2456	4,40
SS22000075	M-11	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	6,69
SS22000076	M-12	No proporcionado por el cliente.	Solución de Tiourea	--	--

Fin del informe

Laboratorios Analíticos del Sur E.I.R.L.
Omar A. Juárez Soto
Gerente de Operaciones
M. Sc. Ingeniero Químico CIP 114426

"<Valor numérico">=Límite de detección del método, "b<Valor Numérico">=Límite de cuantificación del método

Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados presentados sólo están relacionados a la muestra ensayada. Está terminantemente prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin autorización escrita de LAS. Cualquier enmienda o corrección en el contenido del presente documento lo anula.

(c) : Datos proporcionados por el cliente. El laboratorio no se responsabiliza técnica ni legalmente por esta información. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió

Web: <https://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

Parque Ind. Río Seco C-1 C. Colorado-Arequipa-Perú(054)443294 - (054)444582





Anexo 4. Registro Fotográfico



Pruebas de lixiviación



Toma de muestra para control



Muestras de control de lixiviación con cianuro



Muestras de control de lixiviación con tiourea



Operación de separación sólido/Líquido



Control de pH



Preparación de reactivos



Preparación de reactivos



Ollachea



Operaciones Pequeña Minería - Ollachea

Anexo 5. Gráficos estadísticos

Figura 6

Promedios y desviación estándar de las concentraciones de los componentes químicos del mineral aurífero.

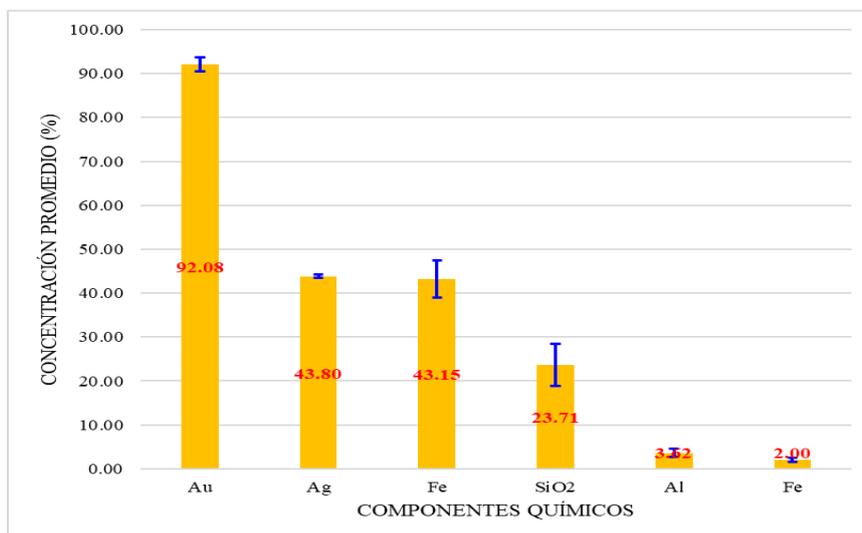


Figura 7

Promedios y desviación estándar de las concentraciones de los componentes mineralógicos del mineral aurífero.

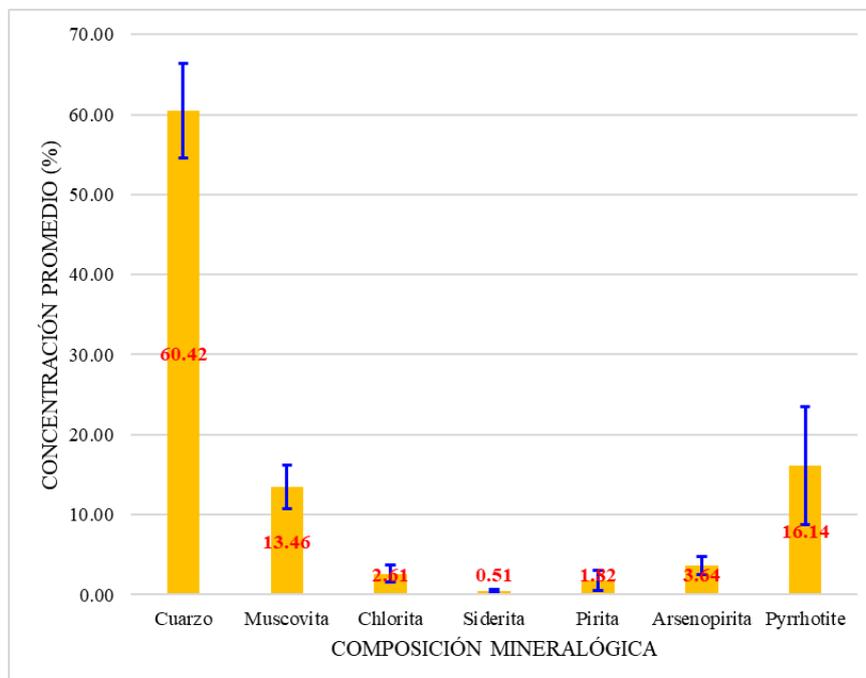
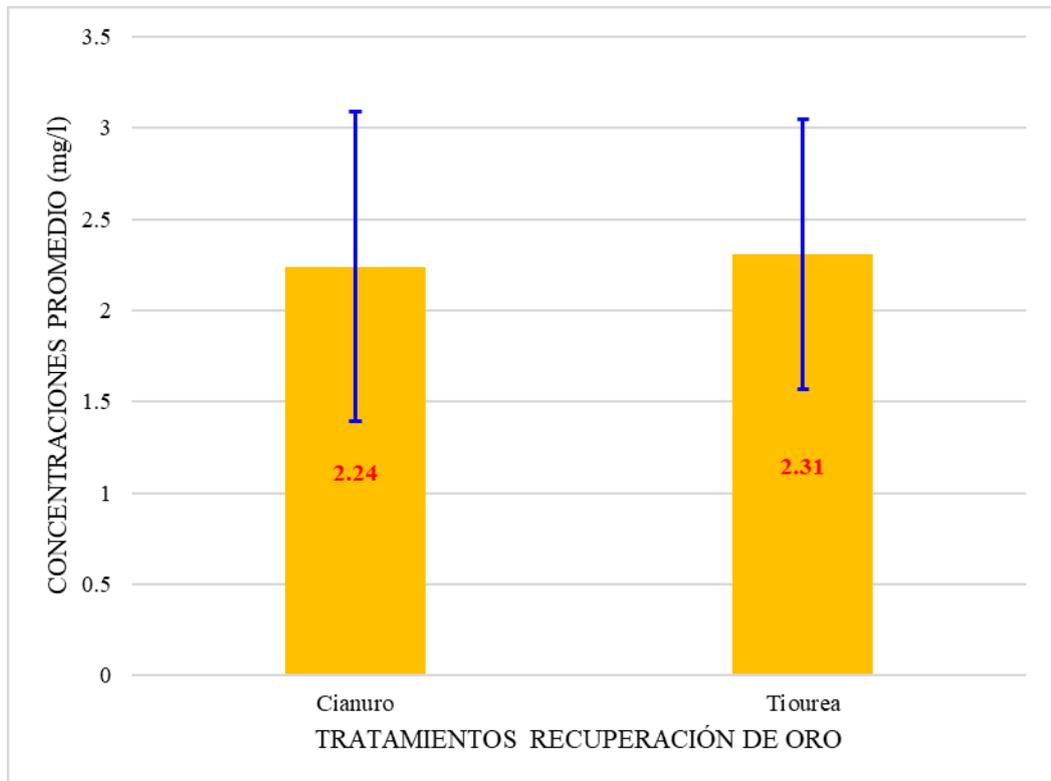


Figura 8

Promedios y desviación estándar de la recuperación de oro mediante cianuro y tiourea.





Universidad Nacional del
Altiplano Puno



Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo **JULIO ALBERTO MAQUERA GIL** identificado(a) con N° DNI: **01335456** en mi condición de egresado(a) del:

DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

con código de matrícula N° 144726, informo que he elaborado la tesis denominada:

“RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CON TIOUREA PARA MINERAL AURÍFERO EN OLLACHEA - PUNO”.

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y no existe plagio/copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 14 de Octubre del 2024.



FIRMA (Obligatorio)



Huella



Universidad Nacional del
Altiplano Puno



Vicerrectorado de
Investigación



Repositorio
Institucional

AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **JULIO ALBERTO MAQUERA GIL** identificado(a) con N° DNI: **01335456**, en mi condición de egresado(a) del Programa de Maestría o Doctorado: **DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE**, informo que he elaborado la tesis denominada:

“RECUPERACIÓN DE ORO POR EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN CON TIOUREA PARA MINERAL AURÍFERO EN OLLACHEA - PUNO”.

para la obtención de **Grado**.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexas, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 14 de Octubre del 2024.

FIRMA (Obligatorio)



Huella