UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

EXTRACCIÓN DE ORO POR CIANURACIÓN DEL YACIMIENTO ASMIASI - YANAQUIHUA, CONDESUYOS - AREQUIPA

PRESENTADO POR:

Br. EVELYN MELIZA FARFAN CARDENAS

Br. VICTOR ANTONIO QQUENAYA ESPINOZA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO

ASESOR:

ING. ABEL FRANKLIN CANAL CESPEDES

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, **Asesor** del trabajo de investigación/tesis titulada: EXTRACCIÓN DE ORO POR CIANURACIÓN DEL YACIMIENTO ASMIASI - YANAQUIHUA, CONDESUYOS - AREQUIPA

Presentado por: EVELYN MELIZA FARFÁN CÁRDENAS DNI N° 48462999

presentado por: VICTOR ANTONIO QQUENAYA ESPINOZA DNI N°: 47874529

Para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del ***Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC*** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 7 **%.**

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 04 de ABRIL de 20 25

Firma

Post firma Abel F. Canal Céspedes

Nro. de DNI 23875439

ORCID del Asesor 0000-0003-4619-7569

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: **oid:** 27259:445543393

Evelyn Meliza/Víctor Antonio FARFÁN CÁRDENAS/...

“EXTRACCIÓN DE ORO POR CIANURACIÓN DEL YACIMIENTO ASMIASI - YANAQUIHUA, CONDESUYOS - AREQUIPA” (INVE

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega
trn:oid:::27259:445543393

Fecha de entrega
3 abr 2025, 3:48 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
3 abr 2025, 5:20 p.m. GMT-5

Nombre de archivo
TESIS Farfan y Qquenaya.pdf

Tamaño de archivo
2.0 MB

100 Páginas

22.382 Palabras

114.828 Caracteres

7% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text
- Small Matches (less than 15 words)

Exclusions

- 35 Excluded Matches

Top Sources

7% Internet sources
2% Publications
2% Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

DEDICATORIA I

A Dios, por la vida, la familia y las oportunidades que se me presentan.

A mi mamá, Irene Cárdenas, por haber depositado su confianza en mí sin dudarlo. Me enseñó que el respeto, la humildad y el esfuerzo constante son fundamentales para alcanzar mis metas. Me mostró la belleza y delicadeza de ser mujer y, al mismo tiempo, la fortaleza que se puede poseer.

A mi papá, Raúl Farfán, por no haber puesto límites a mis aspiraciones y por impulsarme a ser una persona fuerte y valiente. Aunque me consintió desde pequeña, también me enseñó las lecciones necesarias para enfrentar la vida con determinación.

A mis hermanos Jonnathan, Álvaro y Renato por confiar en mí, incluso más de lo que yo misma lo hacía, por su creencia firme en mi capacidad para superar cualquier desafío e inspirarme a demostrarles que en la vida no existen límites si uno se lo propone.

A Walter y tíos Augusto y Julia quienes mostraron empatía, afecto y disposición incondicional para brindarme su apoyo, se sacrificaron incluso en momentos de escasez para asegurar mi bienestar. Vuestra ayuda en mi cuidado fue tan significativa que siempre tendré gratitud hacia ustedes.

A Rodrigo, quien representa una fuente constante de alegría, motivación y respaldo. Cada uno de sus gestos tienen un impacto significativo en mi vida.

A mis tíos, primos y sobrinos quienes alentaron mi progreso.

A mí, en reconocimiento a todo el esfuerzo que implicó alcanzar este logro, así como la valentía que demostré en cada uno de los pasos que di.

Farfán Cárdenas, Evelyn Meliza

DEDICATORIA II

A mi madre, Luzmila Espinoza Tecsi, quien ha sido el motivo principal para seguir estudiando. Su amor incondicional, sacrificio y constante apoyo me han dado la fuerza y la determinación para alcanzar este logro. Gracias, mamá, por ser mi inspiración y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es tanto tuyo como mío. A mi padre, Juan Carlos Vicente, por enseñarme el valor del trabajo duro y la integridad. Tu apoyo y consejos han sido fundamentales en este camino. Este logro también es tuyo.

A mis hermanitas Priscayda y Betzabee, compañeras de vida y de sueños, por ser mi refugio en los momentos de incertidumbre y por compartir conmigo risas, por llenar mi vida de alegría y por ser una fuente constante de motivación.

A mis abuelos Juan de Dios y Vicentina, que ahora me cuidan desde el cielo. Su amor eterno y sus enseñanzas siguen siendo una fuente de inspiración constante. Aunque ya no estén físicamente, su presencia se siente en cada paso que doy. Gracias por mostrarme la importancia de nuestras raíces y por inculcarme valores que me han guiado a lo largo de esta travesía. Su legado vive en mí y en cada logro que alcanzo.

A mis compañeros de Universidad, con quienes compartí momentos inolvidables, luchando juntos por nuestros sueños. Gracias por su amistad, por las risas y por el esfuerzo compartido en cada estudio y proyecto. Su compañía hizo de este viaje una experiencia enriquecedora y llena de aprendizajes.

Qquenaya Espinoza, Víctor Antonio

AGRADECIMIENTO

Nuestra profunda gratitud a nuestros padres y hermanos por ser nuestra red de soporte, por su amor incondicional y respaldo moral, por luchar con nosotros desde el principio y siempre tener fe en cada uno, incluso en los momentos más difíciles, ustedes fueron el pilar de este logro.

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, especialmente a la escuela profesional de ingeniería metalúrgica, por brindarnos la oportunidad de formar parte de su comunidad académica y contribuir a nuestro desarrollo profesional.

A nuestro asesor de tesis por la comprensión y experiencia profesional para encaminar este trabajo.

A la plana de docentes quienes nos transmitieron, a lo largo de estos años, múltiples conocimientos. Su constante apoyo y confianza en nuestras capacidades fueron fundamentales para la finalización de esta tesis.

A nuestros seres queridos, amigos y compañeros, quienes nos acompañaron en los momentos de estrés y alegría durante este hermoso pero desafiante trayecto.

Agradecemos a todos por contribuir con el desarrollo de nuestra investigación, ayudando a recopilar datos, revisando nuestro trabajo, dando comentarios de mejora, por las sendas conversaciones para revisar conceptos, que son la base de estas páginas. Esta tesis no sería la que es sin sus recomendaciones.

Farfán Cárdenas, Evelyn Meliza

Qquenaya Espinoza, Víctor Antonio

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA:

SEÑORES CATEDRÁTICOS MIEMBROS DEL JURADO:

En cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos para Optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra consideración la tesis intitulada:

"EXTRACCIÓN DE ORO POR CIANURACIÓN DEL YACIMIENTO ASMIASI - YANAQUIHUA, CONDESUYOS - AREQUIPA"

(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)

El presente trabajo de tesis evidencia el interés por reflejar nuestros conocimientos académicos, científicos, tecnológicos y prácticos en el marco del procesamiento de minerales.

Se desarrolló a nivel de laboratorio mediante el proceso de cianuración, con el propósito de alcanzar la extracción del oro del yacimiento aurífero ASMIASI.

Estamos seguros de que el presente trabajo será considerado como una contribución importante en la extracción de oro en Yanaquihua.

Farfán Cárdenas, Evelyn Meliza

Qquenaya Espinoza, Víctor Antonio

RESUMEN

La investigación realizada con muestra de mineral aurífero del yacimiento ASMIASI – Yanaquihua, ubicado en Condesuyos – Arequipa, tuvo como objetivo la extracción de oro a través del proceso de lixiviación utilizando cianuro. Se llevaron a cabo pruebas a nivel de laboratorio utilizando un diseño factorial 2^3 con replicas en el punto central, estableciendo las siguientes condiciones operativas para el experimento: granulometría del mineral entre 55 y 70% -200M, concentración de cianuro de 500 a 1000 ppm, tiempo de lixiviación de 20 a 30 horas, pH 11, temperatura y presión a condiciones ambientales, con densidad de pulpa de 30% de sólidos. Los resultados obtenidos muestran que las variables que más influyen en el proceso de lixiviación de oro son, en orden de importancia, la concentración de cianuro, el tiempo de lixiviación y, por último, la granulometría. Para lixiviar el mineral con ley de 20.9 g/t de oro y obtener la extracción máxima de 95.93 %, se requirieron condiciones específicas: granulometría del 62.50% -200M, concentración de cianuro de 750 ppm y tiempo de lixiviación de 25 horas. Finalmente, se formuló un modelo matemático que describe adecuadamente el proceso de lixiviación para la extracción de oro del yacimiento ASMIASI, expresado como: extracción de oro (%) = -18.2 + 1.63 granulometría del mineral (%) + 0.1095 concentración de cianuro (ppm) + 4.07 tiempo de lixiviación (h).

Palabras claves: oro, lixiviación, cianuración, extracción

ABSTRACT

The research carried out with a sample of gold-bearing ore from the ASMIASI – Yanaquihua deposit, located in Condesuyos – Arequipa, aimed at extracting gold through the leaching process using cyanide. Laboratory tests were carried out using a 2^3 factorial design with replicas at the central point, establishing the following operating conditions for the experiment: mineral granulometry between 55 and 70% -200M, cyanide concentration of 500 to 1000 ppm, leaching time of 20 to 30 hours, pH 11, temperature and pressure at ambient conditions, with a pulp density of 30% solids. The results obtained show that the variables that most influence the gold leaching process are, in order of importance, the cyanide concentration, the leaching time and, finally, the granulometry. To leach the mineral with a grade of 20.9 g/t of gold and obtain the maximum extraction of 95.93%, specific conditions were required: granulometry of 62.50% -200M, cyanide concentration of 750 ppm and leaching time of 25 hours. Finally, a mathematical model was formulated that adequately describes the leaching process for the extraction of gold from the ASMIASI deposit, expressed as: gold extraction (%) = -18.2 + 1.63 mineral particle size (%) + 0.1095 cyanide concentration (ppm) + 4.07 leaching time (h).

Keywords: gold, leaching, cyanidation, extraction

INTRODUCCIÓN

En la región Arequipa, precisamente en la zona de Yanaquihua – Condesuyos se encuentra la Asociación de Mineros Artesanos Soledad de Ispacas (ASMIASI), esta asociación se dedica a explotar y comercializar el mineral sin procesar, sometiéndose a desventajas significativas debido a la dependencia de los servicios de procesamiento de minerales, ante esta situación surge la necesidad de implementar y desarrollar el proceso de extracción del oro.

La lixiviación de oro representa el proceso hidrometalúrgico más comúnmente empleado en la extracción de oro. Este proceso implica la disolución del oro a través de soluciones que contienen cianuro. La cianuración se destaca por su capacidad para lograr elevados porcentajes de extracción de oro, además de ser un proceso relativamente sencillo y de bajo costo.

La investigación tecnológica realizada ha sido estructurada en seis capítulos fundamentales, cada uno de los cuales aborda aspectos relevantes de la investigación. Estos capítulos fueron diseñados con el objetivo de proporcionar una comprensión completa del tema abordado. El primer capítulo se centra en el planteamiento del problema, el segundo abarca el marco teórico, el tercero de las hipótesis y variables, el cuarto describe la metodología empleada, el quinto trata la parte experimental y, por último, el sexto capitulo discute los resultados obtenidos. Esta estructura organizada proporciona un enfoque completo de la investigación, permitiendo una presentación coherente y lógica de los hallazgos y sus implicaciones.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA I ..... **i**
DEDICATORIA II ..... **ii**
AGRADECIMIENTO ..... **iii**
PRESENTACIÓN ..... **iv**
RESUMEN ..... **v**
ABSTRACT ..... **vi**
INTRODUCCIÓN ..... **vii**
ÍNDICE GENERAL ..... **viii**
ÍNDICE DE TABLAS ..... **xii**
ÍNDICE DE FIGURAS ..... **xiii**
SIMBOLOGÍA ..... **xiv**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática 1
1.2. Formulación del problema 2
1.2.1. General 2
1.2.2. Específicos 2
1.3. Justificación de la investigación 2
1.3.1. Tecnológica 2
1.3.2. Económica 2
1.3.3. Ambiental 2
1.3.4. Social 3
1.4. Objetivos de la investigación 3
1.4.1. General 3
1.4.2. Específicos 3

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación 4
2.1.1. Internacionales 4
2.2. Principios básicos del oro 10
2.2.1. Propiedades físicas del oro 10
2.2.2. Propiedades químicas del oro 10

2.2.3. Ocurrencias del oro 10
2.2.4. Tipos de depósitos auríferos 11
2.3. Hidrometalurgia 11
2.4. Cianuración 12
2.5. Química de solución de cianuro 13
2.5.1. Hidrólisis del cianuro 14
2.6. Lixiviación 15
2.6.1. Tecnología de la lixiviación 16
2.6.2. Termodinámica de lixiviación 16
2.6.2.1. Energía libre de Gibbs (ΔG) 17
2.6.2.2. Diagrama de Pourbaix 18
2.6.3. Cinética de lixiviación 20
2.6.3.1. Modelo del núcleo sin reaccionar o núcleo recesivo 20
2.6.3.2. Modelo de conversión progresiva, volumétrico o de reacción generalizada. 21
2.6.4. Ecuación cinética de kelsall 22
2.6.5. Variables para el proceso de lixiviación 25
2.6.5.1. Extracción de oro 25
2.6.5.2. Granulometría del mineral 25
2.6.5.3. Concentración de cianuro 25
2.6.5.4. Tiempo de lixiviación 26
2.6.5.5. Composición del mineral. 26
2.6.6. Lixiviación por agitación 26

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis 29
3.1.1. General 29
3.1.2. Específicas 29
3.2. Variables para la lixiviación 29
3.2.1. Dependiente 29
3.2.2. Independientes 29
3.2.3. Intervinientes 29
3.3. Indicadores de la lixiviación 29

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación 30

4.2. Nivel de investigación 30
4.3. Ubicación geográfica de ASMIASI 30
4.4. Población y muestra de estudio 30
5.1. Diseño de investigación 32
5.1.1. Diseño factorial 2^k con réplica en el punto central 32
5.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos 33
5.3. Equipos, materiales y reactivos para la lixiviación 34
5.3.1. Equipos 34
5.3.2. Materiales de laboratorio 35
5.3.3. Reactivos 35
5.4. Cálculo de efectos 36
5.5. Análisis de varianza 36
5.6. Modelo matemático 37
5.6.1. Decodificación del modelo matemático a escala natural 37

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Preparación mecánica del mineral 39
5.2. Análisis de ley de cabeza del mineral 39
5.3. Molienda del mineral 39
5.4. Determinación de la gravedad específica del mineral 41
5.5. Determinación de la capacidad del reactor para la lixiviación 41
5.6. Balance de pulpa para pruebas de lixiviación 42
5.7. Variables del proceso la lixiviación 43
5.7.1. Determinación de la cantidad de cianuro 43
5.7.2. Determinación de la cantidad de cal para pH 11 44
5.8. Matriz experimental para pruebas de lixiviación 44
5.9. Descripción del proceso de lixiviación 45
5.10. Resultados del análisis químico de las pruebas 47
5.11. Balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación 48
5.11.1. Balance metalúrgico de la prueba 1 (ASM-1) 48

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis del diseño experimental 54
6.2. Efecto de las variables 55
6.3. Análisis de la varianza (ANOVA) para la extracción de oro 57

6.4. Modelo matemático que simule el proceso para la extracción 58
CONCLUSIONES 59
RECOMENDACIONES 60
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 61

ANEXOS

ANEXO 01: Ubicación de ASMIASI **..... 64**
ANEXO 02: Fotografías de la preparación mecánica del mineral **..... 65**
ANEXO 03: Fotografías del procedimiento de lixiviación **..... 66**
ANEXO 04: Resultados del análisis químico de las soluciones lixiviadas y ripios **..... 68**
ANEXO 05: Matriz de consistencia **..... 71**
ANEXO 06: Operacionalización de variables e indicadores **..... 72**

APÉNDICES

Apéndice A Cálculos de reposición de cal y cianuro de sodio para pruebas de lixiviación**. 73**
Apéndice B Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 2**... 76**
Apéndice C Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 3**... 77**
Apéndice D Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 4**... 78**
Apéndice E Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 5**... 79**
Apéndice F Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 6**... 80**
Apéndice G Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 7 **.. 81**
Apéndice H Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 8**... 82**
Apéndice I Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 9 **.. 83**
Apéndice J Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 10 **84**
Apéndice K Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 11**. 85**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz codificada de diseño factorial 2^3 con 3 réplicas en el punto central **33**
Tabla 2 Tiempo de molienda del mineral **40**
Tabla 3 Datos para obtener la gravedad específica del mineral **41**
Tabla 4 Balance de pulpa para 30% de sólidos **43**
Tabla 5 Rango de las variables de estudio **43**
Tabla 6 Matriz experimental para las pruebas de lixiviación **45**
Tabla 7 Condiciones operativas para las pruebas de lixiviación **45**
Tabla 8 Cantidad total de cal y cianuro requeridas en las pruebas de lixiviación **47**
Tabla 9 Resultados del análisis químico de las pruebas **48**
Tabla 10 Balance metalúrgico de la prueba ASM-1 ..... **49**
Tabla 11 Resumen del balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación **50**
Tabla 12 Extracción de oro (%) de las 11 pruebas obtenidas dentro de 2 a 30 horas de lixiviación **52**
Tabla 13 Resultados experimentales **54**
Tabla 14 Efectos estimados para la extracción de oro **55**
Tabla 15 Análisis de varianza **57**

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de Pourbaix **19**
Figura 2 Gráfico de la ecuación de Kelsall **24**
Figura 3 Diagrama del flujo del procedimiento experimental **31**
Figura 4 Análisis granulométrico del mineral **40**
Figura 5 Cinética de extracción para la prueba ASM-1 ..... **50**
Figura 6 Cinética de extracción de oro, de las 11 pruebas, respecto al tiempo de lixiviación **53**
Figura 7 Gráfica de efectos principales para la extracción de oro **56**

SIMBOLOGÍA

ASM : Se refiere a la codificación utilizada para las pruebas de lixiviación

LAS : Laboratorio Analítico del Sur

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Situación problemática

El Perú se caracteriza por su abundancia en minerales de toda naturaleza y entre ellos están los minerales auríferos. Existen empresas grandes, medianas y pequeñas, que se dedican a la explotación de estos yacimientos minerales. Estas empresas comercializan el mineral aurífero sin procesarlo u optan por utilizan diferentes procesos para extraer el oro de los minerales. Entre los procesos más utilizados para la extracción de oro se encuentra la amalgamación, flotación y lixiviación. El proceso de lixiviación de minerales auríferos es ampliamente conocido y presenta la ventaja de ser relativamente simple, dado que los requerimientos de inversión en equipos y maquinarias son de menor cuantía. Además, permite la extracción de oro de minerales marginales.

En el departamento de Arequipa, específicamente en la localidad de Yanaquihua – Condesuyos se encuentra la Asociación de Mineros Artesanos Soledad de Ispacas (ASMIASI), que opera varias labores mineras, denominadas socavones. En esta región, la explotación de minerales auríferos es realizada a pequeña y mediana escala, siendo estos minerales comercializados a plantas de tratamiento, donde enfrentan desventajas significativas debido a la dependencia de los servicios de procesamiento de minerales, principalmente económicos porque desvalorizan el costo del mineral.

En este contexto, el problema radica en la falta de un proceso que extraiga el oro para evitar el inadecuado aprovechamiento de los minerales auríferos, lo que genera beneficios muy limitados para la asociación. Por lo tanto, se propone extraer el oro de los minerales auríferos mediante el proceso de lixiviación con cianuro para comercializarlo con mayor valor agregado y mejorar los beneficios.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. General

- ¿Será posible la extracción del oro de los minerales auríferos por el proceso de cianuración?

1.2.2. Específicos

- ¿Cuál será la granulometría para la extracción del oro por el proceso de cianuración?
- ¿Cuál será la concentración de cianuro para la extracción del oro por el proceso de cianuración?
- ¿Cuál será el tiempo de cianuración para la extracción del oro por el proceso de cianuración?

1.3. Justificación de la investigación

1.3.1. Tecnológica

La industria metalúrgica proporciona una variedad de procesos para la extracción de oro, entre ellas se encuentra la lixiviación con cianuro. Para realizar este proceso, se dispone de los recursos necesarios, que incluyen conocimientos y los medios como maquinaria y equipos adecuados, lo que permite la viabilidad de esta investigación.

1.3.2. Económica

El mineral aurífero se lixivia con cianuro para extraer oro, permitiendo un aprovechamiento más eficiente de este recurso no renovable y escaso, de modo que, no solo incrementa los ingresos de la asociación ASMIASI, sino que también contribuye a una mayor recaudación de impuestos por parte del Estado, lo que a su vez impacta positivamente en el bienestar social de la población.

1.3.3. Ambiental

Una opción, ambientalmente, viable para la extracción de oro es la lixiviación con cianuro, debido a que este reactivo cuenta con protocolos aceptados y aprobados a nivel internacional; además, el proceso de cianuración se realiza a temperatura ambiente, lo que

previene la liberación de vapores tóxicos o permite controlar su emisión al medio ambiente; asimismo, el reactivo tiene la ventaja de poder ser reutilizado, lo que contribuye a la viabilidad de la investigación.

1.3.4. Social

La comunidad campesina de Ispacas, que rodea el yacimiento aurífero, enfrenta serias carencias en servicios esenciales como agua potable, electricidad, salud, educación, entre otros. Con la implementación del proceso de cianuración para extraer el oro, se espera que las condiciones económicas de la zona mejoren, lo que beneficiará a la población. Esto permitirá que la población experimente un desarrollo significativo, mejorando su calidad de vida y creando nuevas oportunidades de empleo, tanto directas como indirectas.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. General

Extraer por cianuración el oro de los minerales auríferos de ASMIASI.

1.4.2. Específicos

- Determinar la granulometría del mineral para la extracción del oro por el proceso de cianuración.
- Determinar la concentración de cianuro para la extracción del oro por el proceso de cianuración.
- Determinar el tiempo de lixiviación para la extracción del oro por el proceso de cianuración.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. *Internacionales*

- (Bonilla H. & Martínez A., 2022), en la tesis "*Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el periodo de abril a noviembre 2020*", Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua. Abordan el proceso de extracción de oro en el plantel Santa Isabel, ubicado en Matagalpa, Nicaragua. El trabajo se centra en dos métodos: la amalgamación con mercurio y la lixiviación en pilas con cianuro de sodio. Estas técnicas se emplean para maximizar la recuperación de oro en esta semiindustrial minera, que se enfoca en la extracción selectiva de minerales con un fin económico. El estudio también examina las causas de las pérdidas de mercurio y su toxicidad, además del tratamiento de las colas de amalgamación antes de la lixiviación con cianuro de sodio y adsorción con carbón activado, un proceso que dura entre 7 y 10 días. Se detalla el proceso de desorción y refinamiento a través de un diagrama, lo que lleva a la optimización de variables en ambas etapas. Mediante un enfoque observacional y participativo, se identificaron variables críticas, destacando la concentración de cianuro en la solución lixiviante, con concentraciones de 500-1000 ppm que requieren entre 16.86 y 33.72 libras de cianuro de sodio. Se establecieron puntos de muestreo para identificar áreas donde el mineral no fue adecuadamente recuperado, utilizando la técnica ICP-OES para obtener datos confiables en la alimentación y efluentes del analito de interés. Con el uso de ecuaciones de balance de materia, se logró una recuperación del 28% en la

etapa de amalgamación y del 57% en la etapa de lixiviación, resultados que aún no alcanzan las expectativas, lo que llevó a recomendar más análisis de las muestras.

- (Valdez C., 2021), en su tesis de maestría **"***Extracción de oro por lixiviación de los relaves de un mineral de cobre de la región de Tiquicheo - Michoacán***".** Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. Presentó como objetivo general: establecer un procedimiento de lixiviación sustentable, técnica y económicamente factible para disolver el oro contenido en los relaves de un mineral cobre previamente procesado mediante lixiviación ácida de la región de Tiquicheo. La metodología fue experimental. Se evaluó la acción de los agentes lixiviante Gold Max Y NRW Dezo. El tiempo de lixiviación fue de 30 min; aplicando una concentración de 10 y 15 % (w/w) de reactivo NRW Dezo y Gold Max se obtuvo una recuperación del 71% y 50% del oro respectivamente.
- (Dueñas Z. & Graff J., 2018), en la tesis *"Recuperación de oro y plata por medio de concentración por flotación y lixiviación con cianuro"*, Universidad de Sonora. México**.** En la investigación presentada el propósito es obtener mayor recuperación de oro y plata. La materia prima que se utilizó es mineral proveniente de mina Bacís - Durango, México; como objetivo: Estudio de la extracción de oro y plata. En donde se analizó el método de concentración por flotación y posterior lixiviación a presión de concentrados. La materia prima se obtuvo de 4 compósitos para procesarlos de manera particular cada uno. La caracterización del mineral y concentrado se realizó por medio de microscopia electrónica de barrido, difracción de rayos X, y ensayo al fuego, donde el compósito que presentó mayor ley fue el tercero, con 3.72 g/ton de Au y 488 g/ton de plata; el de menor ley es el primer compósito, con una ley de Au de 2.52 g/ton y 365 g/ton de Ag. Las principales especies identificadas son cuarzo y pirita. Posteriormente, la materia prima fue sometido al proceso de flotación selectiva utilizando el reactivo Xantato isopropílico de sodio (X-343) como colector y

Sulfato de Cobre (CuSO4) como activador. Los parámetros a estudiar fueron el porcentaje de sólidos, tamaño de partícula y tiempo de flotación. De las 4 muestras se obtuve mejor resultado del tercer compósito con ley de oro en el concentrado de 124.1 g/ton significando una recuperación de 94.82 % y ley de plata de 18,519 g/ton, con una recuperación correspondiente al 94.8%. En la última etapa de la presente investigación de este mineral, se llevó a cabo la lixiviación con cianuro de un concentrado obtenido de la planta de concentración en Bacís, el que tenía una ley de 82 g/ton de Au. Las pruebas de lixiviación a presión se llevaron a cabo en un reactor Parr de 1 litro, con controlador de temperatura Controller Parr 4848, en donde el intervalo de fue de 60 a 90°C, presiones de 340 a 540 KPa, y la concentración de cianuro fue de 5.26 hasta 10.52 g/l y teniendo como constante el porcentaje de sólidos. La prueba que obtuvo mejores resultados fue la número 8, con un 87% de extracción de Au y 89% de Ag considerando 10.52 g/l de NaCN, 65°C y 340 KPa de presión de oxígeno.

2.1.2. Nacionales

- (Bonilla H. & Martínez A., 2023), en la tesis "*Estudio de minerales auríferos por flotación y cianuración para la recuperación de oro y plata de la minera tres valles SAC*". Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Huacho, Lima. Presentan como objetivo evaluar la recuperación de oro y plata de minerales auríferos por flotación y cianuración. Se conto con minerales sulfurados y oxidados que contienen oro, plata y hierro. El proceso de flotación se llevó a cabo bajo condiciones específicas del mineral, donde se estableció granulometría del 80% -200M y densidad de pulpa con 33% de sólidos. Se aplicaron reactivos en las siguientes cantidades: 71 g/t de MX-945, 65 g/t de Z6 y 72 g/t de D250. Los resultados mostraron que se logró recuperar un 94.34% de oro y un 91.38% de plata. En cuanto a la cianuración, las condiciones incluyeron granulometría del 80%

-200M, densidad de pulpa del 30% de sólidos, 1000 ppm de NaCN, tiempo de 72 horas y pH de 11, lo que permitió recuperar del mineral sulfurado el 88.36% de oro y 46.95% de plata, con un consumo de 4.97 kg/t de NaCN y 1.15 kg/t de Cao. Mientras que, del mineral oxidado se logró recuperar un 90.22% de oro y un 54.99% de plata, utilizando 2.01 kg/t de NaCN y 3.85 kg/t de CaO. Se concluye que la flotación es más efectiva para recuperar oro y plata del mineral sulfurado, mientras que la cianuración para el mineral oxidado supera el 90% de recuperación de oro. Además, se observó que tanto el tiempo de cianuración como la concentración de cianuro de sodio tienen un impacto significativo en la recuperación de ambos metales.

- (Pérez L., 2023), en su trabajo investigación “Análisis de recuperación de oro con reactivos orgánicos y reactivos de cianuro para proceso de lixiviación Trujillo 2022”. Universidad privada del norte. Trujillo. Presenta como objetivo principal evaluar la efectividad de reactivos orgánicos en comparación con el cianuro en procesos de lixiviación para la recuperación de oro. Los resultados indicaron que el cianuro de sodio (NaCN) consiguió recuperar, en promedio, el 86.79% del oro. Por otro lado, el uso de Gold Max permitió la recuperación promedio del 85.84% de oro, mientras que, con Sandios se logró un 85.72% y la Tiourea alcanzó aproximadamente un 86.57% de recuperación de oro. La conclusión del estudio fue que, aunque los reactivos a base de cianuro de sodio demostraron ser más eficientes en términos de recuperación de oro, existe un interés en mejorar y optimizar el uso de los reactivos orgánicos debido a su capacidad para reducir significativamente el impacto ambiental.
- (Ferrer H., 2019), en su tesis “*Caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco - 2019*”. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión. Estableció como objetivo general

desarrollar un modelo de caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro. Primero, se verificó la existencia de reservas probables de oro y se analizó la formación geológica para luego desarrollar el sistema de extracción y procesamiento. La investigación, de enfoque cuantitativo y tipo aplicado, se diseñó como un experimento y se dividió en cuatro fases. Inicialmente, se realizaron sondeo para estimar el volumen total de mineralización en la concesión, revelando aproximadamente ocho hectáreas. Las muestras mostraron una cantidad significativa de oro y plata en minerales sulfurosos como galena, esfalerita y pirita, además de potenciales minerales refractarios. Con estos datos, se diseñó un sistema para la extracción, acarreo, procesamiento y cierre de operaciones. Se concluyó que la fase inicial consistiría en pruebas experimentales, seguidas de estudios más detallados y la implementación de un piloto.

2.1.3. Locales

- (Holguín A. 2023), en su tesis, "*Optimización del proceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Valetita IV de la compañía minera Tunkyro SAC*." Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco. Presenta como objetivo optimizar la extracción de oro por el proceso de cianuración por agitación de los minerales auríferos del yacimiento VALETITA IV. Se determina el tiempo de cianuración del mineral aurífero desde la etapa de molienda hasta la culminación del proceso de cianuración. En este análisis se consideraron la concentración de cianuro de sodio, tiempo de cianuración y la granulometría del mineral, con el objetivo de optimizar la recuperación de oro y desarrollar un modelo matemático que represente este proceso. Como resultado, se logró alcanzar una extracción máxima del 95.12% de oro, considerando granulometría de 90% -200M, concentración de cianuro de sodio del 0.14% y tiempo de cianuración de 72 horas.

- (Romero J., 2020). En su tesis, *"Extracción del oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo sandioss del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco - Chumbivilcas, región Cusco*" Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco; tiene como objetivo determinar el porcentaje de extracción de oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo Sandioss, aplicado a minerales de tipo placer eluvial que contiene cuarzo en mayor proporción, grava, arena y limo. Para lo cual se realizó un estudio experimental de carácter explicativo – descriptivo. Las condiciones operativas para el proceso experimental fueron el pH 12 (medio alcalino), granulometría de 65% -m200 Ty, temperatura y presión a condiciones normales, variables dependientes como tiempo de lixiviación (24 a 48 horas), concentración de reactivo (300 a 500 ppm) y % de sólidos en pulpa de (25 a 30 %), obteniendo un resultado de 98% de extracción de oro en un tiempo de 48 horas, siendo esta la variable más influyente y con más significancia en el proceso. De acuerdo a los resultados obtenidos concluyó que el reactivo lixiviante sandioss ofrece alto nivel de extracción de oro, ofreciendo una tecnología eficaz a los procesos de lixiviación en comparación de otros reactivos que cumplen la misma función.
- (Gómez J. & Morales M., 2012). En la tesis, *"Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales Au-Ag en la Compañía Minera Ares Castilla – Arequipa"* Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Cusco; donde se procesó mineral con ley de 6.0 g/t de Au y 156.0 g/t de Ag. El oro en este mineral se encuentra libre e incrustado en cuarzo y la plata se presenta en forma de minerales sulfurados (acantita). Por la naturaleza de esta mena se ha realizado pruebas de cianuración por agitación a nivel de laboratorio, para ello el mineral ha sido molido a una granulometría de 74% -m270 Ty esto con el fin de liberar un buen porcentaje de oro que se encuentra en el cuarzo. De acuerdo a las pruebas preliminares de lixiviación por agitación se ha podido establecer que las variables que tienen mayor

influencia en el proceso son: la concentración de NaCN, $Pb(N0_3)_2$ y el pH; variables que han servido para realizar las pruebas experimentales utilizando el diseño factorial 2^3. En estas condiciones, el proceso nos ha permitido obtener una extracción de 97.60% de Au y 88.63% de Ag, relativamente superiores a las condiciones actuales de extracción que es de 96% de Au y 87% de Ag, finalmente los parámetros obtenidos para mejorar el proceso de extracción fueron: Concentración dé cianuro de sodio 0.30%, Concentración de nitrato de plomo 190 g/t y pH 10.5.

2.2. Principios básicos del oro

2.2.1. Propiedades físicas del oro

El oro, elemento químico con símbolo Au y número atómico 79. Se caracteriza por su color amarillo brillante, alta densidad de 19.3 g/cm³, notables propiedades físicas de maleabilidad y ductilidad. Además, es excelente conductor de electricidad y tiene una resistencia notable a la corrosión y la oxidación.

2.2.2. Propiedades químicas del oro

El oro presenta una alta solubilidad en agua regia. Además, en presencia de compuestos orgánicos, el oro se disuelve en ácido clorhídrico. También es susceptible a la disolución por cloruros férricos y cúpricos. En una solución de carbonato de sodio al 10%, el oro muestra cierta solubilidad. Por último, es importante destacar que el oro es soluble en soluciones que contienen cianuro.

2.2.3. Ocurrencias del oro

El oro se encuentra nativo en el cuarzo de las pizarras cristalinas, en las rocas graníticas (filones o mantos), en las arenas de algunos ríos y terrenos aluviales (placeres) en forma de laminitas o granos y en masas de algunos gramos (pepitas). También se encuentra libre pero asociado con la pirita (sulfuro de hierro), galena (sulfuro de plomo) y blenda (sulfuro de zinc) y combinado con el teluro y selenio.

2.2.4. Tipos de depósitos auríferos

A continuación, se describe los tipos de depósitos donde se encuentra el oro:

- Depósitos de placer: Formados por la acumulación de partículas de oro en sedimentos transportados por corrientes de agua. Estos depósitos se encuentran típicamente en lechos de ríos y arroyos.
- Depósitos filonianos o de veta: El oro se encuentra en vetas de cuarzo dentro de rocas. Estos depósitos se forman a partir de fluidos hidrotermales que precipitan el oro en fracturas de la roca.
- Depósitos Diseminados: El oro está finamente distribuido en grandes volúmenes de roca. Este tipo de depósito es común en grandes minas de oro y requiere técnicas avanzadas de extracción.

Un aspecto importante de los minerales auríferos es la identificación de la ocurrencia del oro diseminadas en las rocas y sedimentos. La presencia de oro en tamaño microscópico o en asociación con minerales refractarios puede complicar su extracción. La identificación de estos minerales permite determinar el proceso más adecuado para su extracción.

2.3. Hidrometalurgia

La hidrometalurgia se define como la rama de la metalurgia extractiva que se desarrollan en soluciones acuosas para extraer metales a partir de minerales y concentrados, basados en los principios químicos y electroquímicos para disolver y extraer el metal deseado. En el campo de la hidrometalurgia, se abarcan procesos como la lixiviación, la extracción por solventes y la electro obtención, los cuales son fundamentales para la extracción eficaz de los metales.

La hidrometalurgia permite procesar minerales de baja ley y residuos secundarios, donde los métodos tradicionales de extracción pueden no ser viables económicamente. Además, es más respetuosa con el medio ambiente en comparación con los procesos

convencionales porque minimiza la generación de residuos sólidos y la emisión de gases tóxicos.

Un aspecto fundamental de la hidrometalurgia es la elección adecuada de reactivos químicos, que debe basarse en las características particulares del mineral a procesar. Es conveniente realizar pruebas preliminares de laboratorio para determinar los reactivos más efectivos y las condiciones óptimas de operación.

La hidrometalurgia del oro es un procedimiento que ha cobrado relevancia por su efectividad en la extracción de oro, así como por su habilidad para procesar minerales refractarios que presentan dificultades cuando se utilizan métodos tradicionales.

2.4. Cianuración

La cianuración es un proceso químico que permite la extracción de oro a partir de minerales mediante la disolución del metal en una solución de cianuro. De esta solución se recupera el oro mediante métodos como precipitación con zinc o adsorción con carbón activado.

La aplicación de la cianuración requiere un entendimiento completo de la ocurrencia y características del mineral. Cada yacimiento tiene propiedades únicas que determina la eficacia del proceso de cianuración. Por lo tanto, es importante adaptar el proceso a las características específicas del mineral para maximizar la extracción.

La cianuración es el proceso más ampliamente usado en la lixiviación de oro, presentando las siguientes ventajas:

- Tecnología conocida
- Química de reacción simple
- Bajo consumo de reactivo
- Bajos costos operacionales

Pero por otra parte presenta algunas desventajas, tales como:

- Complicaciones de tipo ambientales

- Problemas de tipo cinético
- Problemas de refractabilidad
- Presenta de materias carbonaceas

El radical cianuro es una combinación de carbono (C) y de nitrógeno (N) con una carga negativa, donde el nitrógeno funciona como trivalente, es decir comparte tres uniones con el carbono.

Para la obtención de CN- se puede usar dos sales:

- NaCN Cianuro de sodio
- KCN Cianuro de potasio

Estas sales alcalinas son solubles en agua, formando su respectivo catión metálico y iones cianuro libres, de acuerdo con las siguientes reacciones:

$$NaCN = Na^{+} + CN^{-}$$

$$KCN = K^{+} + CN^{-}$$

Una de las propiedades químicas del cianuro es su capacidad para combinarse con metales, por ejemplo, con el oro (Au). El cianuro forma mezclas con la mayoría de los principales metales para formar compuestos o complejos químicos.

El cianuro tiene dos usos principales en la minería:

- Ya que tiene una atracción natural al oro, la plata y otros metales, el cianuro es utilizado para extraer minerales de menas de baja ley utilizando procedimientos de lixiviación.
- El cianuro también es usado en la molienda y concentración de cobre, plomo, zinc, cobalto y molibdeno. Se agrega cianuro en ciertas fases de la molienda para separarlos minerales valiosos de la mena.

2.5. Química de solución de cianuro

- Ion cianuro: se refiere al anión CN^{-} en solución.

- HCN (molecular): es la molécula neutra que se denomina ácido cianhídrico o cianuro de hidrógeno. Al grupo formado por el ion cianuro y el ácido cianhídrico se le conoce como cianuro libre.
- Compuestos simples de cianuro: son compuestos iónicos que se disocian directamente en el agua liberando un catión y un ion cianuro. Por ejemplo, NaCN, KCN.
- Compuestos complejos de cianuro: son compuestos iónicos que se disocian en el agua liberando catión y un anión que contiene ion cianuro. El anión, denominado complejo, puede seguir disociándose, produciendo en última instancia un catión y varios aniones cianuro.
- Cianuro total: todos los compuestos de cianuro existentes en una solución acuosa.

2.5.1. Hidrólisis del cianuro

Uno de los problemas asociados al proceso de cianuración es la hidrolisis del cianuro en agua para formar acido cianhídrico con la correspondiente variación de pH:

$$CN^- + H_2O = HCN + OH^-$$

El ácido cianhídrico es un ácido débil que muestra una disociación incompleta:

$$HCN = H^+ + CN^- \qquad K = 6.2 \times 10^{-10}$$

2.5.2. Reacciones químicas del proceso de cianuración

La cianuración es un proceso hidrometalúrgico ampliamente utilizado para la extracción de oro y plata a partir de minerales. Este proceso se basa en la disolución de estos metales preciosos en una solución diluida de cianuro (generalmente cianuro de sodio, NaCN). A continuación, se explicó las reacciones químicas principales que ocurren durante el proceso de cianuración:

- Oxidación del oro:

El oro metálico (Au) se oxida, pasando de un estado de oxidación 0 a +1.

$$Au = Au^- + \hat{e}$$

- Formación del complejo de aurocianuro:

El ion Au^+ reacciona con dos iones CN^- para formar el complejo estable $Au(CN^-)_2$.

$$Au+ + 2CN- = Au(CN^-)_2$$

- Reducción del oxígeno:

El oxígeno (O_2) actúa como agente oxidante y se reduce a peróxido de hidrógeno (H_2O_2).

$$O_2 + 2H_2O + 2\,ê = H_2O_2 + 2OH^-$$

- Reacción global:

Combinando las semirreacciones de oxidación y reducción, se obtiene la reacción global.

$$2Au + 4CN^- + O_2 + 2H_2O = 2Au(CN^-)_2 + H_2O_2 + 2OH^-$$

La reacción que mencionas describe de manera precisa la disolución del oro en el proceso de cianuración, destacando la formación del complejo de aurocianuro y la generación de peróxido de hidrógeno como subproducto.

2.6. Lixiviación

La lixiviación es un proceso electroquímico en el cual un metal presente en el mineral se disuelve en una solución acuosa. Este proceso se centra en la disolución anódica del oro, que se presenta en forma de un complejo auro - ciano, mientras que, de manera simultánea, ocurre una reacción catódica que implica la reducción del oxígeno en el agua. Esta última reacción influye en la velocidad del proceso de lixiviación.

Este proceso puede llevarse a cabo en vertederos de minerales, pilas, tanques, a presión, in – situ, autoclave y bacteriana. La elección de la técnica depende de factores como el tipo y ley del mineral; por ejemplo, la lixiviación en pilas es adecuada para minerales de baja ley, mientras que la lixiviación en tanques se usa para minerales de mayor ley y cuando se requiere un control más preciso del proceso.

La efectividad del proceso de lixiviación está influenciada por diversos factores como la granulometría del mineral, concentración de cianuro, tiempo de lixiviación y temperatura del medio. La eficiencia del proceso puede variar significativamente dependiendo de las condiciones operativas. Ajustar esta variable hace posible la optimización de la extracción de oro.

2.6.1. Tecnología de la lixiviación

Métodos 1: percolación

- Lixiviación in situ
- Lixiviación en botaderos
- Lixiviación pilas
- Lixiviación en Vatts (bateas)

Método 2: agitación

- Tanques de agitación
- Tanques de agitación Pachuca
- Lixiviación en circulo CCD
- Lixiviación CIP y CIL

2.6.2. Termodinámica de lixiviación

La termodinámica aplicada a la lixiviación se enfoca en las interacciones químicas que ocurren durante este procedimiento, proporcionando la comprensión de cómo las condiciones termodinámicas influyen en la solubilidad de los metales. El estudio termodinámico facilita la predicción de la estabilidad de los compuestos generados y permite la optimización de las condiciones operativas para mejorar la recuperación de metales.

Un elemento fundamental en este contexto es el cálculo de la energía libre de Gibbs, que determina la espontaneidad de una reacción. La comprensión de este valor es importante para ajustar variables como el pH y la temperatura, lo que a su vez contribuye a maximizar la eficacia del proceso de lixiviación.

2.6.2.1. Energía libre de Gibbs (ΔG)

En el contexto de procesos metalúrgicos como la lixiviación de cianuración del oro, la energía libre de Gibbs depende de la entalpía (ΔH) y entropía (ΔS) para comprender y optimizar las reacciones químicas involucradas. A continuación, se explica su importancia y cómo se relacionan:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Donde:

ΔH: Entalpía, mide el cambio de energía calorífica de una reacción a presión constante.

ΔS: Entropía, mide el grado de orden o desorden de una reacción.

T: Temperatura (en Kelvin).

La siguiente reacción de cianuración del oro se relaciona termodinámicamente analizando los parámetros fundamentales que rigen este proceso

$$4\,Au + 8\,NaCN + O2 + 2\,H2O \rightarrow 4\,Na[Au(CN)2] + 4\,NaOH$$

A continuación, se explica los aspectos importantes de la reacción

- La reacción es espontanea (ΔG < 0) bajo condiciones estándar, esto se debe a:
  - Interacción química favorable: El oro forma un complejo muy estable con el cianuro $Au(CN)_2^-$ reduciendo la energía libre del sistema.
  - Disponibilidad de oxígeno: El oxígeno actúa como oxidante, facilitando la oxidación del oro desde su estado metálico a un estado ionizado que reacciona con el cianuro.
- La reacción es exotérmica (ΔH < 0), ya que:
  - Se libera energía al formarse los enlaces fuertes entre el oro y el cianuro.
  - La formación de NaOH un compuesto altamente estable, también libera energía.
- El cambio de entropía (ΔS > 0) es positivo debido a:
  - La conversión de reactivos en estado sólido (Au) y gas (O_2) a productos disueltos $[Au(CN)_2^-]$ y NaOH.

- Un aumento en el número de partículas disueltas, lo que incrementa el desorden del sistema.

Concluyendo, que:

ΔG < 0: La reacción es espontánea.

ΔG > 0: La reacción no ocurre espontáneamente.

ΔG = 0: La reacción está en equilibrio.

2.6.2.2. Diagrama de Pourbaix

Es una representación gráfica que muestra los estados de equilibrio de los metales y sus iones en función del pH y el potencial eléctrico (Eh) de una solución acuosa

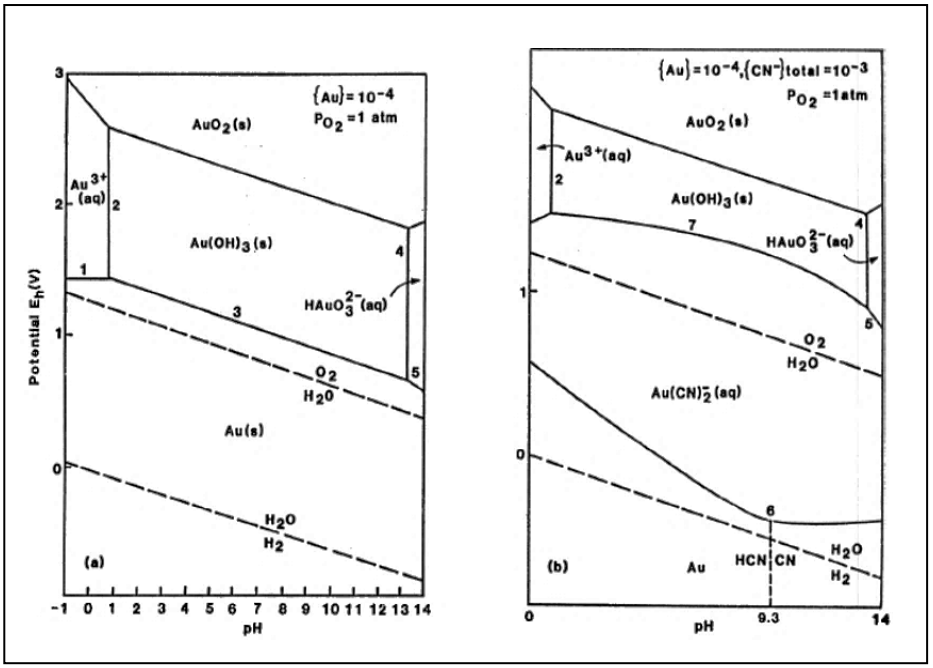
A continuación, se interpreta el diagrama de Pourbaix:

$$4\ Au + 8\ NaCN + O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 4\ Na\ [Au\ (CN)_2] + 4\ NaOH$$

- En la región de oro metálico (Au), se observa que:
  - A valores de potencial bajos (Eh) y pH neutro o ligeramente ácido, el oro permanece en su estado metálico.
  - La cianuración no es efectiva porque el oro no reacciona.
- En la región de estabilidad del complejo cianurado $Au(CN)_2^-$ se observa que:
  - A pH alcalino y potencial oxidante moderado (Eh positivo), el oro metálico se oxida y reacciona con el cianuro para formar el complejo soluble.
  - Corresponde a las condiciones óptimas para la cianuración.
- En la región de descomposición del cianuro (HCN) se observa que:
  - A pH bajo (<9), el cianuro se convierte en ácido cianhídrico (HCN), un gas tóxico que no contribuye a la formación del complejo $Au(CN)_2^-$.
  - Esta región debe evitarse en las operaciones.

Figura 1

Diagrama de Pourbaix



Nota. Adaptado de Hidrometalurgia Química e Ingeniería por Uceda D., 2016

Las condiciones óptimas, de acuerdo con el diagrama presentado en la Figura 1, para que la reacción se lleve a cabo de manera efectiva son las siguientes:

- pH: Alcalino (10−11).
- Potencial eléctrico: positivo, suficiente para que el oxígeno oxide el oro.
- Evitar condiciones reductoras: Podrían devolver el oro a su forma metálica.
- Evitar pH bajos: Previenen la formación de HCN, que es tóxico y reduce la eficiencia del proceso.

En conclusión, El diagrama de Pourbaix para esta reacción muestra que la cianuración del oro ocurre bajo condiciones de pH alcalino y potencial oxidante. Esto garantiza la oxidación del oro metálico, la formación del complejo cianurado estable, y evita problemas como la formación de HCN. Así mismo se debe controlar cuidadosamente estas variables para optimizar el proceso.

2.6.3. Cinética de lixiviación

La cinética de lixiviación se centra en la velocidad y el mecanismo de las reacciones químicas durante la lixiviación. Hernández y Sánchez (2023) explican que la cinética proporciona información sobre cómo factores como la concentración de reactivos, la temperatura y el tamaño de partícula afectan la tasa de disolución del metal, lo que es fundamental para optimizar el proceso.

La cinética de lixiviación también se ocupa de los efectos de la concentración de reactivos y la presencia de impurezas en el proceso. Hernández y Sánchez (2023) mencionan que la optimización de la concentración de reactivos puede aumentar la velocidad de lixiviación y reducir los costos operativos, mientras que las impurezas pueden afectar negativamente la eficiencia del proceso.

Existen dos modelos principales para representar el proceso de lixiviación de un mineral, donde un líquido o solución entra en contacto con un sólido. En este caso, la solución actúa como reactivo y el sólido corresponde al mineral; al mezclarse, reaccionan y generan un producto.

Es fundamental tener en cuenta que cualquier esquema que represente la evolución temporal del proceso estará descrito por una ecuación cinética. Dicha ecuación tiene la función de predecir y describir el comportamiento real de la cinética del proceso. Por esta razón, es importante seleccionar adecuadamente el modelo que se utilizará; de lo contrario, la ecuación resultante será ineficaz. Por lo tanto, una ecuación cinética debe cumplir con dos condiciones principales para ser considerado adecuado:

- Que represente de manera real el comportamiento del proceso.
- Que su expresión matemática sea simple y fácil de manejar.

2.6.3.1. Modelo del núcleo sin reaccionar o núcleo recesivo

En este modelo, el sólido mineral está constituido por partículas relativamente homogéneas que interactúan con el reactivo químico en la solución.

Durante el proceso de lixiviación se presenta las siguientes etapas:

- Difusión del reactivo hacia la superficie del sólido: El reactivo primero debe atravesar la capa de fluido que rodea a la partícula sólida.
- Difusión del reactivo a través de la capa de producto: A medida que avanza la reacción, se forma una capa de productos alrededor del núcleo sólido. El reactivo debe atravesar esta capa para alcanzar el núcleo sin reaccionar.
- Reacción química en la interfaz del núcleo: Cuando el reactivo alcanza el núcleo sin reaccionar, ocurre la reacción química, disolviendo o transformando parte del mineral.
- Retracción del núcleo sin reaccionar: A medida que la reacción progresa, el núcleo sólido sin reaccionar se reduce de tamaño, mientras la capa de producto se engrosa.

Este modelo es útil para predecir el comportamiento de procesos de lixiviación donde el material tiene una estructura granular o partículas uniformes. Sin embargo, su precisión puede verse limitada en sistemas donde:

- El mineral presenta alta porosidad.
- Las partículas tienen formas irregulares o una distribución de tamaños significativa.
- Existen reacciones secundarias o complejidades adicionales, como formación de precipitados.

2.6.3.2. Modelo de conversión progresiva, volumétrico o de reacción generalizada.

En este modelo, la reacción química se distribuye progresivamente por todo el sólido, reduciendo su masa y densidad de manera uniforme. El reactivo penetra en la partícula y reacciona de forma simultánea en múltiples puntos internos, de manera que el sólido se va transformando gradualmente en el producto.

Durante el proceso de lixiviación se presenta las siguientes etapas:

- Transporte del reactivo hacia la superficie de la partícula: Similar al modelo del núcleo sin reaccionar, el reactivo debe atravesar la capa de fluido que rodea la partícula sólida.
- Difusión del reactivo dentro del sólido: A diferencia del modelo del núcleo recesivo, aquí el reactivo penetra en el interior de la partícula, distribuyéndose a lo largo de su volumen.
- Reacción química distribuida: La reacción ocurre simultáneamente en todas las regiones donde el reactivo ha llegado, transformando gradualmente la partícula de manera uniforme.
- Disolución completa del sólido: El sólido se consume completamente conforme avanza el proceso, sin que quede un núcleo definido de material sin reaccionar.

Este modelo de conversión progresiva describe procesos en los que la reacción ocurre uniformemente en todo el volumen del sólido, lo que lo hace ideal para materiales porosos o con estructuras que permiten una buena difusión del reactivo al interior.

2.6.4. Ecuación cinética de kelsall

Es una ecuación matemática que modela el avance de la lixiviación, considerando la cinética del proceso químico que ocurre cuando un sólido reacciona con una solución líquida (generalmente un reactivo químico). Su importancia radica en que permite describir cómo avanza la disolución del sólido y predecir la velocidad y el grado de conversión en función del tiempo.

La ecuación 1 toma en cuenta los mecanismos de control de la lixiviación, es decir, los factores que limitan la velocidad del proceso. Esto puede depender de:

- Control por reacción química: El proceso está limitado por la velocidad de la reacción química entre el sólido y el reactivo en la interfaz.
- Control por difusión: La velocidad está determinada por el transporte del reactivo hacia el sólido o del producto desde el sólido hacia la solución.

Forma general de la ecuación de Kelsall:

$$X = e^{-KT} \qquad (1)$$

Donde:

X: Fracción de conversión del sólido (proporción del sólido que ha reaccionado en un tiempo dado, entre 0 y 1).

k: Constante cinética de la reacción (min^{-1}).

t: Tiempo de lixiviación (minutos).

Construcción de gráfico:

- Determinar la constante cinética (k): La constante k depende de las condiciones del proceso, como la concentración de cianuro, la temperatura, la presencia de oxígeno, etc. Este valor puede obtenerse experimentalmente o a partir de datos de los libros.

Por ejemplo, supongamos que k = 0.01 min^{-1}.

- Calcular la fracción de extracción (X) para cada tiempo (t): Usando la ecuación de Kelsall, se calcula X para cada valor de t (50, 100, 150, 200, 250, 300 minutos).

Por ejemplo:

  - Para t = 50 min: $X = 1 - e^{-0.01*50} = 1 - 0.6065 = 0.3935$
  - Para t = 100 min: $X = 1 - e^{-0.01*100} = 1 - 0.3679 = 0.6321$
  - Para t = 150 min: $X = 1 - e^{-0.01*150} = 1 - 0.2231 = 0.7769$
  - Para t = 200 min: $X = 1 - e^{-0.01*200} = 1 - 0.1353 = 0.8647$
  - Para t = 300 min: $X = 1 - e^{-0.01*300} = 1 - 0.0498 = 0.9502$

- Gráfico de fracción de extracción (X) vs tiempo(t):
  - Se grafican los puntos de la tabla y se traza una curva que los una.

La Figura 2, presenta el gráfico basado en la ecuación de Kelsall, Este gráfico muestra la extracción de oro (X) en función del tiempo (t), asumiendo que el proceso está controlado por la reacción química en la superficie del sólido (según la ecuación de Kelsall).

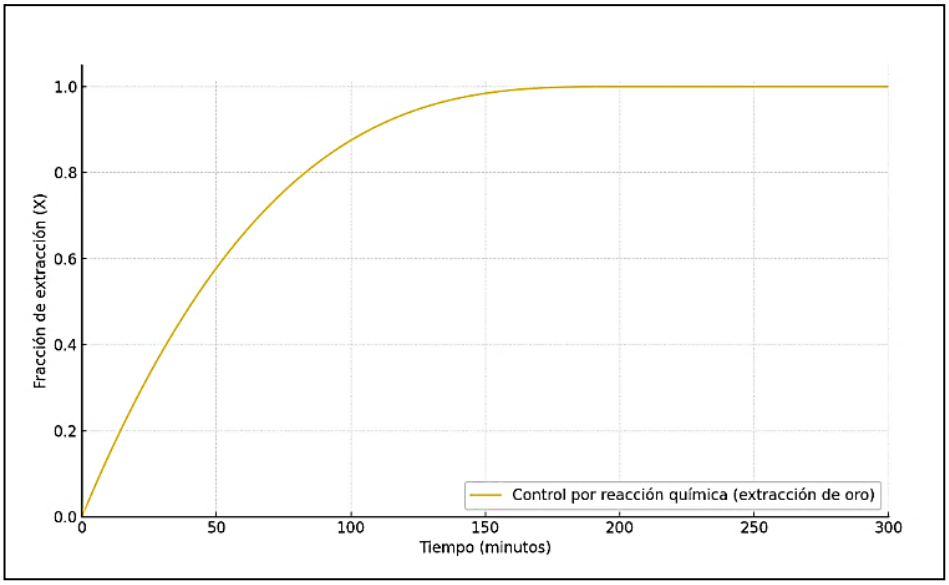
A continuación, se explica el gráfico:

- Eje X (tiempo en minutos): Representa el tiempo transcurrido durante el proceso de lixiviación.
- Eje Y (fracción de extracción): Indica la proporción de oro extraído respecto al total disponible, variando de 0 (0% de extracción) a 1 (100% extraído).
- Curva: Muestra cómo aumenta progresivamente la cantidad de oro extraído con el tiempo, de forma acelerada al principio, ya que las condiciones iniciales favorecen la reacción química.

Este modelo es útil para predecir el tiempo necesario para alcanzar una conversión o extracción específica de oro, optimizando los parámetros del proceso como la concentración del reactivo o la temperatura.

Figura 2

Gráfico de la ecuación de Kelsall



Nota. Adaptado de Hidrometalurgia Química e Ingeniería por Uceda D., 2016

2.6.5. Variables para el proceso de lixiviación

Es importante ajustar las variables para lograr un nivel óptimo de extracción de oro

2.6.5.1. Extracción de oro. La extracción de oro es un indicador importante de la eficacia del proceso de la lixiviación. La mejora de los factores involucrados puede incrementar notablemente la extracción.

2.6.5.2. Granulometría del mineral. La granulometría del mineral es un factor crítico que influye en la eficiencia del proceso de lixiviación. La granulometría afecta la superficie de contacto entre el mineral y la solución de cianuro. Minerales con una granulometría más fina tienen una mayor superficie disponible para la reacción, lo que puede mejorar la extracción del oro. La molienda del mineral para alcanzar una granulometría adecuada es fundamental para asegurar una disolución efectiva del oro. Además, la granulometría no solo afecta la tasa de disolución, sino también el consumo de cianuro. Por lo tanto, es necesario encontrar un equilibrio entre una granulometría que maximice la recuperación del oro y minimice el consumo de reactivos. El ajuste de la granulometría también puede influir en la cinética del proceso de cianuración. Ritcey (2005) señala que "la velocidad de disolución del oro está correlacionada con la granulometría del mineral. Minerales más finos tienden a disolverse más rápidamente, pero requieren una molienda adicional que puede aumentar los costos operativos. La granulometría óptima debe ser determinada en función de las características específicas del mineral y las condiciones operativas.

2.6.5.3. Concentración de cianuro. Ritcey (2005) explica que "la concentración de cianuro debe ser adaptada a las condiciones específicas del mineral y del proceso para maximizar la recuperación del oro y minimizar el consumo de reactivos”. La optimización de la concentración de cianuro puede mejorar significativamente la eficiencia del proceso.

La concentración de cianuro debe ser determinada y ajustada en función de las pruebas de laboratorio y el análisis del mineral, adicional a ello, el monitoreo continuo de la concentración de cianuro y el ajuste del proceso son necesarios para asegurar una extracción óptima del oro.

2.6.5.4. Tiempo de lixiviación. El tiempo de lixiviación es otro aspecto esencial que influye en la extracción del oro durante el proceso de cianuración. El tiempo de lixiviación afecta la cantidad de oro que puede ser disuelto y recuperado. Un tiempo de lixiviación insuficiente puede llevar a una extracción incompleta, mientras que un tiempo excesivo puede no mejorar significativamente la extracción. El tiempo de lixiviación debe ser ajustado en función de factores como la granulometría del mineral, la concentración de cianuro, y la temperatura del medio. El tiempo de lixiviación debe ser cuidadosamente equilibrado con estos factores para asegurar una extracción óptima del oro y minimizar el consumo de reactivos.

2.6.5.5. Composición del mineral. La composición del mineral es un factor crucial en el proceso de cianuración, ya que influye en la eficacia de la disolución del oro. La composición del mineral puede afectar la solubilidad del oro y su capacidad para formar un complejo con el cianuro. Minerales con alta presencia de sulfuros o carbonatos pueden complicar el proceso de cianuración, ya que estos minerales pueden consumir cianuro o formar compuestos que dificultan la recuperación del oro.

2.6.6. Lixiviación por agitación

El proceso de lixiviación por agitación es una técnica hidrometalúrgica utilizada principalmente para extraer metales preciosos, como el oro y la plata, a partir de minerales finamente molidos. Este método es altamente eficiente y se emplea cuando el mineral tiene una granulometría fina que permite un contacto íntimo entre el sólido y la solución lixiviante.

El objetivo principal de la lixiviación por agitación es disolver los metales de interés

(oro y plata) en una solución acuosa, generalmente utilizando cianuro como agente lixiviante, para luego recuperarlos mediante procesos como la adsorción en carbón activado o la precipitación con zinc.

2.6.6.1. Etapas del proceso de lixiviación por agitación.

- Conminación de minerales: El mineral se tritura y muele hasta alcanzar una granulometría fina (generalmente menos de 200 micrones). Esto aumenta el área superficial del mineral, facilitando el contacto con la solución lixiviante.
- Formación de la pulpa: El mineral molido se mezcla con agua para formar una pulpa, que es una suspensión de partículas sólidas en agua. La pulpa se ajusta a una densidad adecuada (generalmente entre 40% y 50% de sólidos).
- Agitación y lixiviación: La pulpa se coloca en tanques de agitación, donde se mezcla constantemente con la solución lixiviante (cianuro de sodio, NaCN, en concentraciones típicas de 0.01% a 0.05%). La agitación asegura un contacto uniforme entre el mineral y la solución, optimizando la extracción de los metales.
- Reacciones químicas: Durante la agitación, el oro y la plata se disuelven en la solución de cianuro, formando complejos solubles. El proceso se realiza en un medio alcalino (pH ~10-11) para evitar la formación de ácido cianhídrico (HCN), que es tóxico.

$$2Au + 4CN^- + O_2 + 2H_2O = 2Au(CN^-)_2 + H_2O_2 + 2OH^-$$

- Separación de solido - liquido: Después de la lixiviación, la pulpa se somete a un proceso de separación sólido-líquido, generalmente mediante filtros o espesadores. El líquido (solución rica en oro y plata) se envía a la etapa de recuperación, mientras que los sólidos (relaves) se descartan o se tratan para su disposición final.
- Recuperación de metales: La solución rica en oro y plata se procesa mediante:
  - Adsorción en carbón activado: El oro y la plata se adsorben en el carbón

activado, del cual luego son liberados para su recuperación.

- Precipitación con zinc (proceso Merrill-Crowe): Se añade zinc metálico para precipitar el oro y la plata de la solución.
- Electrólisis: En algunos casos, se utiliza corriente eléctrica para recuperar los metales.

2.6.6.2. Ventajas del proceso de lixiviación por agitación

- Alta eficiencia: Permite una recuperación de oro y plata superior al 90%.
- Control preciso: Se puede ajustar la concentración de cianuro, el pH, el tiempo de residencia y la agitación para optimizar el proceso.
- Aplicación en minerales refractarios: Es útil para minerales que no responden bien a otros métodos de lixiviación, como la lixiviación en pilas.

2.6.6.3. Desventajas del proceso de lixiviación por agitación

- Manejo de relaves: Los relaves generados deben ser tratados adecuadamente para evitar la contaminación ambiental.
- Toxicidad del cianuro: Requiere medidas de seguridad estrictas para manejar el cianuro y evitar riesgos para la salud y el medio ambiente.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. General

Por el proceso de cianuración se extrae el oro del mineral aurífero de ASMIASI

3.1.2. Específicas

- La granulometría del mineral tiene influencia en el proceso de cianuración para la extracción del oro
- La concentración de cianuro tiene influencia en el proceso de cianuración para la extracción del oro
- El tiempo del proceso de cianuración influye en la extracción del oro

3.2. Variables para la lixiviación

3.2.1. Dependiente

- Extracción de oro

3.2.2. Independientes

- Granulometría del mineral
- Concentración de cianuro
- Tiempo de lixiviación

3.2.3. Intervinientes

- Composición del mineral

3.3. Indicadores de la lixiviación

- Extracción de oro (%)
- Tiempo de lixiviación (h)
- Concentración de cianuro (ppm)

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA

4.1. Tipo de investigación

Tecnológico - experimental: posibilita obtener y calcular datos cuantitativos para poder observar, analizar e interpretar.

4.2. Nivel de investigación

Descriptivo - explicativo: Se interpreta la relación de las variables independientes y dependiente para describir y detallar el comportamiento de los sucesos que son materia de estudio.

4.3. Ubicación geográfica de ASMIASI

Las minas subterráneas de ASMIASI se localizan en la comunidad campesina de Ispacas, que se ubica en 15°44'48" latitud sur, 72°57'00" longitud oeste, en el distrito de Yanaquihua, provincia de Condesuyos en el departamento de Arequipa, Perú. Ver Anexo 01

Para acceder a las minas subterráneas, se inicia el trayecto desde la ciudad de Arequipa, tomando la carretera Panamericana Sur en dirección al distrito de Ocoña. Desde allí, se continua por una vía no pavimentada que sigue la orilla izquierda del río Ocoña hasta llegar a Ispacas, completando un recorrido total de 297 kilómetros.

4.4. Población y muestra de estudio

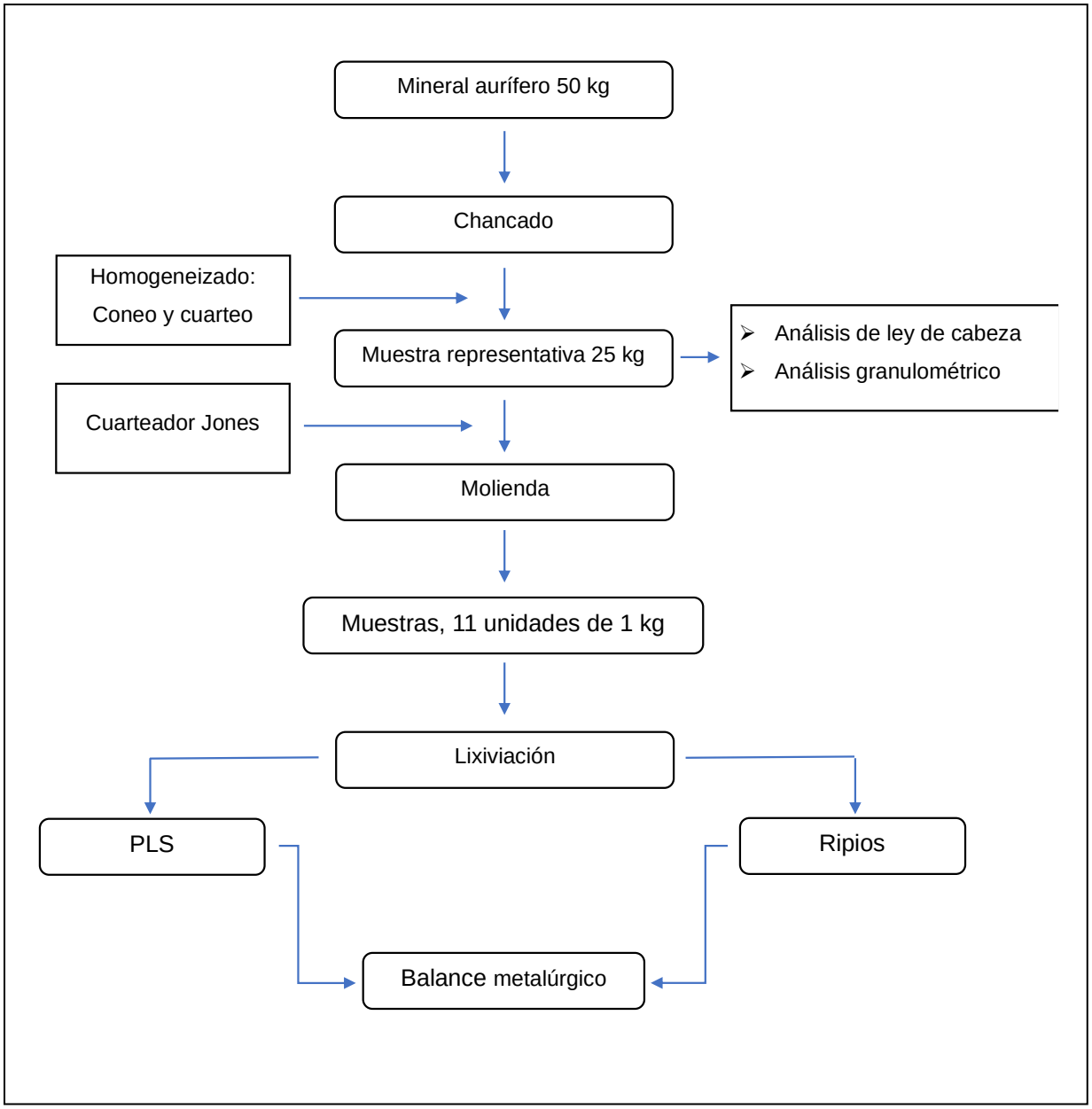
- Población: El material que se utilizó para realizar las pruebas experimentales se obtuvo de ASMIASI, ubicado en Yanaquihua, provincia de Condesuyos en el departamento de Arequipa, Perú.
- Muestra: 50 kg de mineral aurífero de ASMIASI. La toma de la muestra de mineral aurífero se realizó, de mineral ya extraído, por el método de puntos que garantiza una máxima representatividad.

4.5. Método de investigación

El procedimiento experimental se llevó a cabo mediante una secuencia de etapas mostradas en las Figura 3.

Figura 3

Diagrama del flujo del procedimiento experimental



5.1. Diseño de investigación

Explicativo – cuantitativo: El estudio se fundamenta en la modificación planificada de variables independientes bajo condiciones controladas, con la finalidad de analizar cómo estas variables afectan a la variable dependiente en el proceso.

En función al propósito de la investigación actual, se optó por utilizar un diseño factorial, dado que resulta el más apropiado para llevar a cabo experimentos que involucren dos o más variables. Este tipo de diseño permite investigar todas las combinaciones posibles entre los diferentes niveles de las variables en estudio, entendiendo por niveles los valores que pueden asumir las variables.

5.1.1. Diseño factorial 2^k con réplica en el punto central

El diseño factorial 2^k se refiere a un método que sirve para hacer el desarrollo de las pruebas experimentales donde k es la cantidad de variables, cada una de estas variables puede tomar únicamente dos niveles distintos (superior e inferior). Permitiendo evaluar cómo los efectos individuales de las variables y sus interacciones afectan una respuesta específica.

En situaciones donde el diseño factorial 2^k permite un nivel intermedio de prueba, es recomendable incluir un tratamiento adicional que represente el nivel intermedio o medio de todas las variables, denominada como punto central.

Como hemos mencionado, en este tipo de diseño, se generan todas las combinaciones posibles de las variables. Para ello, se organiza una matriz de diseño, codificada, utilizando –1, +1 y 0 para representar el nivel inferior, nivel superior y punto central de cada variable, respectivamente.

En esta investigación se consideran tres variables, resultando ocho pruebas. A estas pruebas se añaden tres replicas en el punto central, dando un total de 11 pruebas, como se detalla en la Tabla 2, donde las variables independientes están representadas por A, B y C.

Tabla 1

Matriz codificada de diseño factorial 2^3 con 3 réplicas en el punto central

N° de prueba	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0

5.2. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

A continuación, se especifica las técnicas e instrumentos de recolección de información y datos:

- Recopilación de la información bibliográfica
- Observación de campo
- Toma de datos
- Pruebas experimentales de laboratorio
- Excel
- Minitab 19: Este programa de análisis estadístico es una herramienta precisa, accesible e ideal para estudios estadísticos, facilitando el control para optimizar los resultados en diversos procesos.

5.3. Equipos, materiales y reactivos para la lixiviación

5.3.1. Equipos

- Chancadora de quijadas: JAW CRUSHER, se le conoce como chancadora de mandíbula por tener una mandíbula móvil que se desliza hacia arriba y hacia abajo sobre una superficie fija, lo que permite triturar el material, con un tamaño de alimentación de 12”x 7” y una salida de 12”x1.5”, lo que permite obtener productos con un tamaño promedio que varía entre ½” y 3/8”.
- Chancadora cónica: La chancadora cónica o giratoria GR-ROLL CRUSHER, se emplea para reducir el tamaño del mineral que proviene de la descarga de la chancadora de quijada, logrando tamaños promedio de ¼”. Este equipo cuenta con una abertura de alimentación y una de salida de ½” y ¼”, respectivamente, y opera a una velocidad de 55 revoluciones por minuto. Este equipo cuenta con una abertura de alimentación de ½” y de salida de ¼”. Opera a una velocidad de 55 rpm.
- Molino de bolas: El molino de bolas utilizado para la generación de los finos cuenta con medidas de 13” x 8” (longitud x diámetro interno) con una velocidad de operación operativa de 20.26 rpm.
- Tamices: WS Tyler, denominado como tamices de malla, fabricados según lo estándares ASTM, y son empleados en el análisis granulométrico de minerales con propósitos de investigación.
- Cuarteador: Jones, conocido como cuarteador de rifles es utilizado para dividir una cantidad de muestra en partes iguales, asegurando que cada una de estas porciones conserve la representatividad de la muestra original
- Mesa de rodillos: Equipo que tiene mecanismo de agitación. Permite que el reactor gire de forma continua.

- Reactor: Botella de vidrio que permiten preparar y controlar reacciones químicas en condiciones específicas para lograr resultados deseados.
- EPPs: Los elementos de protección personal son equipos, componentes o dispositivos diseñados para prevenir el contacto directo de una persona con los peligros presentes en entornos riesgosos. Son fundamentales, ya que estos riesgos pueden dar lugar a lesiones y enfermedades.

5.3.2. Materiales de laboratorio

- Balanza analítica
- Bureta
- Embudo de vidrio
- Fiola
- Matraz de Erlenmeyer
- Matraz de fondo redondo
- Papel indicador de pH
- Papel filtro
- Pipeta
- Probeta
- Varilla de vidrio
- Vaso precipitado

5.3.3. Reactivos

- Nitrato de plata ($AgNO_3$)
- Yoduro de potasio (IK)
- Cianuro de sodio (NaCN)
- Cal (CaO)
- Agua destilada

5.4. Cálculo de efectos

Este proceso permitirá determinar cuánto efecto o influencia que las variables tienen sobre la respuesta. Esto se define como la diferencia entre los valores promedio de las respuestas cuando la variable se encuentra en su nivel más bajo y en su nivel más alto durante las pruebas.

Definido por:

$$E_{xi} = \frac{\sum Y_+ + \sum Y_-}{(\frac{N}{2})(r)}$$

Donde:

$\sum Y_+$: Sumatoria de respuestas correspondientes al nivel superior del factor de análisis.

$\sum Y_-$ *:* Sumatoria las respuestas correspondientes al nivel inferior del factor de análisis.

N: Número de pruebas experimentales.

r: Número de réplicas en el diseño.

5.5. Análisis de varianza

El análisis de varianza es el procedimiento adecuado para evaluar la significancia de los efectos y es una herramienta fundamental en la inferencia estadística. En esta sección, no se busca realizar un estudio detallado del análisis de varianza, sino más bien proporcionar un resumen de los conceptos para una aplicación rápida en el análisis de los datos de los diseños experimentales estudiados.

La ecuación descompone la variabilidad total de los datos en sus componentes individuales, donde:

$$SS_{Total} = SS_{Efectos} + SS_{Error}$$

SS_{Total} = Suma total de cuadrados

$SS_{Efectos}$ = Suma de cuadrados debido a los efectos o tratamientos

SS_{Error} = Suma de cuadrados debido al error

La suma de cuadros de los efectos e interacciones está definida por la siguiente relación:

$$SS_{efectos} = \frac{(\sum_{i=1}^{N} X_{ij} Y_i)^2}{(\mathrm{N})(\mathrm{r})} = \frac{([X^T][\mathrm{Y}])^2}{(N)(r)}$$

X_i = Valor de la variable a escala codificada.

Y_i = Valor de la respuesta.

La suma de cuadros de para el error está definida por la siguiente relación:

$$SS_{error} = \sum_{i=1}^{n_0} (Y_i^0 - Y^0)^2$$

Y_i^0: Replicas en el punto central del diseño

n_0 : Numero de réplicas en el centro del diseño

Y^0 : Promedio de todas las réplicas

5.6. Modelo matemático

Una vez que se han determinado los efectos significativos, el siguiente paso consiste en obtener un modelo matemático que represente el proceso investigado. En el caso del diseño factorial a dos niveles, se utiliza un modelo matemático a escala codificada lineal.

$$\bar{Y} = b_0 + \sum_{j=1}^{k} b_j X_J + \sum_{u=j=1}^{k} b_{Uj} X_u X_j \qquad U \neq j$$

Para estimar los coeficientes b_j, b_{Uj} se hace uso de la formula matricial utilizada para la estimación del coeficiente del modelo.

$$[B] = ([X]^T . [X])^{-1} . ([X]^T . [Y])$$

5.6.1. Decodificación del modelo matemático a escala natural

Para avanzar a la siguiente etapa de optimización, es necesario decodificar el modelo matemático a escala natural. Esto implica transformar el modelo codificado en su forma original para poder realizar su representación gráfica y continuar con el proceso de optimización.

Se ha deducido fórmulas para la decodificación que son las siguientes:

- Para el termino independiente

$$a_0 = b_0 - \sum_{j=1}^{k} b_j \in_J + \sum_{ij=1}^{k} b_{ij} X_u \in_{ij} \qquad i \neq j$$

- Para el termino lineal

$$a_j Z_J = \frac{b_j}{\Delta Z_j} - \sum_{j,i=1}^{k-1} \frac{b_j}{\Delta Z_J} \qquad i \neq j$$

- Para el termino de interacción

$$a_{ij} Z_j Z_i = \frac{b_{ij}}{\Delta Z_J \Delta Z_i}$$

Donde:

Z_j^0 : Centro del diseño para la variable j ($Z^{max} + Z^{min}$) /2

ΔZ_j : Radio del diseño para la variable j ($Z^{max} – Z^{min}$) /2

ε: Resultado de la división Z_j^0 entre ΔZ_j

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Preparación mecánica del mineral

Se tomó 50 kg de muestra del mineral aurífero procedente de ASMIASI.

- En la primera etapa de la preparación mecánica, el mineral se redujo de tamaño por chancado primaria, secundario y terciario, obteniendo granulometría de 100% -10M. Posteriormente, se procedió al homogeneizado para obtener 25 kg de muestra representativa, utilizando el método de coneo y cuarteo. De esta muestra se dispuso mineral para análisis de ley de cabeza y análisis granulométrico.
- Se realizó una molienda preliminar para el análisis granulométrico. Tras obtener los resultados de este análisis, se procedió a dividir el mineral, utilizando el cuarteador Jones. Esto con el propósito de someter el mineral al proceso de molienda en seco y así obtener muestras que cumplieran con las granulometrías necesarias para las pruebas de lixiviación.
- Finalmente, el mineral con la granulometría necesaria se homogenizó, obteniendo 11 muestras representativas de 500 g cada una, para el proceso de lixiviación. Ver Anexo 02.

5.2. Análisis de ley de cabeza del mineral

La muestra representativa fue enviada al laboratorio LAS, donde se realizó el análisis de oro mediante el método de ensayo a fuego. El resultado indica una ley de 20.9 g/t de oro.

5.3. Molienda del mineral

Se realizó la molienda con el objetivo de determinar el tiempo necesario para alcanzar granulometrías de 55% -200M, 62.5% -200M y 70% -200M, requeridas para las pruebas de lixiviación. Para ello, se utilizó 7 kg de mineral, cada kilogramo fue molido durante diferentes tiempos entre 15 y 31 minutos. Posteriormente, se tamizaron a -200M para determinar la

granulometría resultante. La Tabla 3 muestra los tiempos correspondientes a las siete pruebas de molienda, y en base a los resultados del análisis granulométrico se elaboró la Figura 4.

Tabla 2

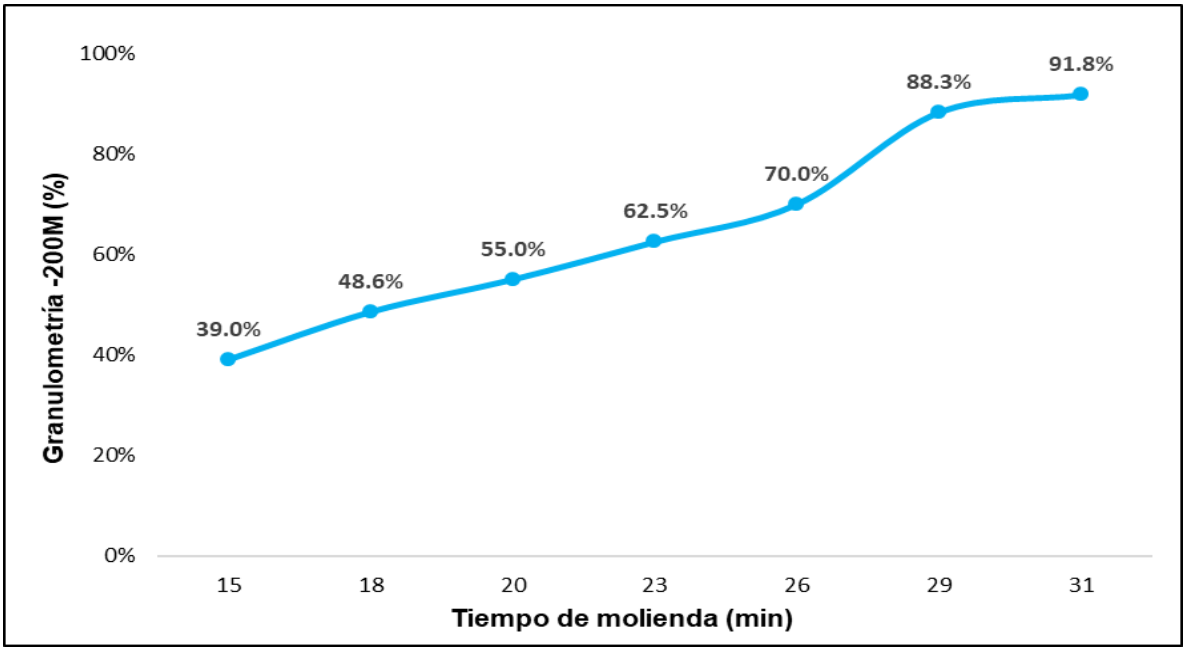
Tiempo de molienda del mineral

Tiempo de molienda (min)	Mineral pasante (g)	Granulometría -200M (%)
15	390.3	39.00
18	485.5	48.60
20	550	55.00
23	625	62.50
26	700	70.00
29	883.2	88.30
31	918	91.80

Según la información presentada de la tabla 2 el tiempo requerido para obtener granulometrías antes indicadas es de 20, 23 y 26 minutos, respectivamente.

Figura 4

Análisis granulométrico del mineral



5.4. Determinación de la gravedad específica del mineral

Para determinar la gravedad específica, se empleó el método de la fiola. Se realizaron cinco pruebas bajo las mismas condiciones con el fin de obtener un resultado más preciso. Para cada prueba se utilizó 5 g del mineral preparado, fiola de 100 mL de volumen y agua destilada. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4, elaborada a partir de la ecuación 2.

$$G.E. = \frac{W_m}{W_m + W_1 - W_2} \qquad (2)$$

Donde:

W_m: Peso del mineral

W_1: Peso de la fiola más agua

W_2: Peso de la fiola más agua más mineral

Tabla 3

Datos para obtener la gravedad específica del mineral

N° de prueba	W_m	W_1	W_2	G. E
1	5	99.12	102.38	2.87
2	5	99.16	102.44	2.91
3	5	99.21	102.42	2.79
4	5	99.28	102.52	2.84
5	5	99.32	102.56	2.84
			Promedio	2.85

Se determina que la gravedad específica del mineral 2.85.

5.5. Determinación de la capacidad del reactor para la lixiviación

Se utilizó un envase de vidrio de 4 litros de capacidad como reactor. Para determinar la capacidad del reactor, se procedió a llenar el envase con agua. Posteriormente, se colocó el envase en posición horizontales para medir el volumen de agua que se retuvo, resultando un

volumen de 1337.50 mL. Con el objetivo de evitar derrames durante las pruebas de lixiviación, se utilizó el reactor al 80% de su capacidad en esta posición.

$$\text{Capacidad del reactor} = \frac{1337.50\ \text{mL} * 80\%}{100\%} = 1070\ \text{mL}$$

Se determina que el volumen de trabajo del reactor para las pruebas de lixiviación es de 1070 mL.

5.6. Balance de pulpa para pruebas de lixiviación

El balance de pulpa para 30% de sólidos se desarrolló inicialmente con cálculos basados en un volumen de 100 mL. Con esta referencia, se realizaron cálculos para 1070 mL, correspondiente al volumen del reactor.

- 30% de solidos de 100 mL es 30 g y se divide por la G.E. del mineral:

$$\frac{30}{2.85} = 10.53$$

- 70% de H_2O de 100 mL es 70 g y se divide por la G.E. del agua:

$$\frac{70}{1} = 70$$

La sumatoria de 10.53 + 70 = 80.53

$$\frac{1070*100}{80.53} = 1328.70$$

- Por relación, se calcula la cantidad de mineral y H_2O requerida para 30% de solidos

$$\frac{1328.70*30}{100} = 398.61\ \text{g}$$

$$\frac{1328.70*70}{100} = 930.09\ \text{mL}$$

Este análisis permitió determinar que se requirió 398.61 g de mineral y 930.09 mL de agua para realizar las pruebas de lixiviación, información que se muestra en la Tabla 5.

Tabla 4

Balance de pulpa para 30% de sólidos

	%	100 mL		1070 mL	
		Peso g	Volumen mL	Peso g	Volumen mL
Mineral	30	30	10.53	398.61	139.91
H_2O	70	70	70.00	930.09	930.09
Pulpa	100	100	80.53	1328.70	1070

5.7. Variables del proceso la lixiviación

En la Tabla 6 se presenta la codificación y el rango de las variables a analizar. El rango de las variables se ha establecido con base en la revisión bibliográfica para este tipo de procedimientos experimentales.

Tabla 5

Rango de las variables de estudio

Variable	Unidad de medida	Codificación de la variable	Nivel inferior	Punto central	Nivel superior
Granulometría del mineral	%	A	55	62.5	70
Concentración de cianuro	ppm	B	500	750	1000
Tiempo de lixiviación	h	C	20	25	30

5.7.1. Determinación de la cantidad de cianuro

Para establecer la cantidad de cianuro de sodio requerida para las pruebas de lixiviación, comenzamos realizando un cálculo basado en 100 mL de agua. Considerando que el volumen de agua requerida para las pruebas está definido en el balance de pulpa, procedemos a calcular la cantidad de cianuro de sodio necesaria mediante una relación proporcional.

- Para concentraciones de 500 ppm:

$$\text{Peso de cianuro} = \frac{0.05 \text{ g NaCN} * 930.09 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 0.47 \text{ g de NaCN}$$

- Para concentraciones de 1000 ppm:

$$\text{Peso de cianuro} = \frac{0.10 \text{ g NaCN} * 930.09 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 0.93 \text{ g de NaCN}$$

- Para concentraciones de 750 ppm:

$$\text{Peso de cianuro} = \frac{0.075 \text{ g NaCN} * 930.09 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} = 0.7 \text{ g de NaCN}$$

5.7.2. Determinación de la cantidad de cal para pH 11

Para este cálculo, se consideró que 50 g de mineral representa el 30% de sólidos, se determinó el volumen de agua correspondiendo al 70%. Resultando 116.6 mL de agua.

En un vaso de precipitado se vertió 116.6 mL de agua destilada y 50 g de mineral, agitando constantemente por 5 minutos, para medir el pH, resultando pH neutro. Luego, se añadió cal de forma gradual hasta alcanzar pH 11, siendo necesario 1.2 g. Con estos datos y considerando el peso de mineral requerido para las pruebas, especificado en el balance de pulpa, se determinó la cantidad inicial de cal requerida para las pruebas de lixiviación.

$$\text{Peso de cal inicial} = \frac{1.2 \text{ g de cal} * 398.61 \text{ g de mineral}}{50 \text{ g de mineral}}$$

$$\text{Peso de cal inicial} = 9.57 \text{ g de cal}$$

5.8. Matriz experimental para pruebas de lixiviación

La Tabla 7 se elaboró en función a la matriz codificada de diseño factorial 2^3, que incluye 3 réplicas en el punto central, reemplazando los valores de las variables.

Tabla 6

Matriz experimental para las pruebas de lixiviación

N° de prueba	Codificación de prueba	Granulometría (% de pasante)	NaCN (ppm)	Tiempo (h)
1	ASM-1	55	500	20
2	ASM-2	70	500	20
3	ASM-3	55	1000	20
4	ASM-4	70	1000	20
5	ASM-5	55	500	30
6	ASM-6	70	500	30
7	ASM-7	55	1000	30
8	ASM-8	70	1000	30
9	ASM-9	62.5	750	25
10	ASM-10	62.5	750	25
11	ASM-11	62.5	750	25

5.9. Descripción del proceso de lixiviación

A continuación, se describe el procedimiento realizado para las 11 pruebas de lixiviación, considerando las condiciones operativas presentadas en la Tabla 8.

Tabla 7

Condiciones operativas para las pruebas de lixiviación

Condiciones operativas	
Volumen H2O	930.09 mL
Peso del mineral	398.61 g
Granulometría	55, 62.5 y 70% -200M
Cal	9.57 g
Concentración de cianuro	500, 750 y 1000 ppm
Tiempo de lixiviación	20, 25 y 30 h

1. Verter 930.09 mL de H_2O y 398.61 g de mineral al reactor.
2. Añadir 9.57 g de cal.
3. Añadir cianuro de sodio, considerando que, para concentración de 500, 750 y 1000 ppm de NaCN se requiere 0.47, 0.7 y 0.93 gramos de NaCN, respectivamente.
4. Colocar los reactores en la mesa de rodillos para agitar la pulpa.
5. Realizar el muestro de la solución lixiviante a las 2, 4, 8, 14, 20, 25 y 30 horas, con el objetivo de monitorear el pH y consumo de cianuro de sodio.
6. Ajustar el pH si es inferior a 11. Se realiza los cálculos necesarios para reponer cal para que el pH se mantenga en 11.
7. Filtrar la solución lixiviante, del paso 5, con el fin de medir la concentración de cianuro por titulación.

   Para titular:

   - Tomar 10 mL de solución lixiviante filtrada en el matraz Erlenmeyer.
   - Añadir 3 gotas de yoduro de potasio.
   - Homogeneizar la solución con agitación constante.
   - Añadir gotas de nitrato de plata hasta que la solución adquiera el color amarillo opalescente. Registrar la cantidad de cm^3 de nitrato de plata consumido.
   - Determinar el consumo de cianuro de sodio y la reposición correspondiente. Con la finalidad de mantener constante la concentración de cianuro de sodio durante el proceso.

En el Apéndice A se detalla el control de proceso relacionado con la reposición de cal y cianuro de sodio para las 11 pruebas de lixiviación.

La Tabla 9 muestra la cantidad total de cal y cianuro de sodio requeridos para cada una de las pruebas de lixiviación.

Tabla 8

Cantidad total de cal y cianuro requeridas en las pruebas de lixiviación

N° de prueba	Codificación de prueba	Cal			Cianuro de sodio		
		Inicial (g)	Reposición (g)	Total (g)	Inicial (g)	Reposición (g)	Total (g)
1	ASM-1	9.57	0.43	10.01	0.47	0.07	0.54
2	ASM-2	9.57	0.52	10.09	0.47	0.02	0.49
3	ASM-3	9.57	0.43	10.01	0.93	0.21	1.14
4	ASM-4	9.57	0.35	9.92	0.93	0.21	1.14
5	ASM-5	9.57	0.52	10.09	0.47	0.37	0.84
6	ASM-6	9.57	0.61	10.18	0.47	0.30	0.77
7	ASM-7	9.57	0.70	10.27	0.93	0.51	1.44
8	ASM-8	9.57	0.52	10.09	0.93	0.28	1.21
9	ASM-9	9.57	0.43	10.01	0.70	0.19	0.89
10	ASM-10	9.57	0.35	9.92	0.70	0.12	0.82
11	ASM-11	9.57	0.43	10.01	0.70	0.37	1.07

8. Sedimentar las soluciones en el reactor.
9. Extraer la solución lixiviada y disponerlo en un recipiente hermético para el análisis químico.
10. Lavar tres veces los ripios para eliminar los restos de lixiviante.
11. Secar los ripios para preparar las muestras para el análisis químico.
12. Realizar el balance metalúrgico del proceso de lixiviación.

El procedimiento anterior se muestra en imágenes en el Anexo 03.

5.10. Resultados del análisis químico de las pruebas

En la Tabla 10 se presenta los resultados del análisis químico de la solución lixiviada y ripios de las pruebas efectuadas, que corresponden a sus tiempos máximos de lixiviación. En el Anexo 04 podemos ver los reportes del análisis químico de las 11 pruebas.

Tabla 9

Resultados del análisis químico de las pruebas

N° de prueba	Codificación de prueba	Tiempo (h)	Ley de oro	
			Solución lixiviante mg/L	Ripio g/t
1	ASM-1	20	7.20	2.92
2	ASM-2	20	8.49	2.97
3	ASM-3	20	6.93	1.93
4	ASM-4	20	6.37	2.03
5	ASM-5	30	8.15	2.30
6	ASM-6	30	6.87	2.54
7	ASM-7	30	8.79	1.65
8	ASM-8	30	9.19	1.95
9	ASM-9	25	8.38	0.83
10	ASM-10	25	8.23	1.42
11	ASM-11	25	8.47	1.26

5.11. Balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación

Para realizar el balance metalúrgico, consideramos la información obtenida del análisis químico de ley de cabeza del mineral, así como de las soluciones lixiviadas y los ripios.

5.11.1. Balance metalúrgico de la prueba 1 (ASM-1)

Se procedió de la siguiente manera:

- ***Cálculo del contenido metálico***

$$\text{Cabeza ensayada} = 398.61\ \text{g} * 20.9\frac{\text{g}}{\text{t}} * \frac{1\ \text{t}}{10^6\text{g}} * \frac{10^3\text{mg}}{1\ \text{g}} = 8.33\ \text{mg}$$

$$\text{Solución} = 930.09\ \text{mL} * \frac{7.2\ \text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\ \text{L}}{10^3\ \text{mL}} = 6.70\ \text{mg}$$

$$\text{Ripio} = 398.61\ \text{g} * \frac{1.950\ \text{g}}{\text{t}} * \frac{1\ \text{t}}{10^6\text{g}} * \frac{10^3\text{mg}}{1\ \text{g}} = 1.16\ \text{mg}$$

$$\text{Cabeza calculada} = 6.70\ \text{mg} + 1.16\ \text{mg} = 7.86\ \text{mg}$$

- ***Cálculo del porcentaje de extracción de oro***

$$\text{Extracción de oro} = \frac{6.70\ \text{mg}}{7.86\ \text{mg}} * 100\% = \mathbf{85.19\ \%}$$

La Tabla 11 muestra el balance metalúrgico correspondiente a la prueba ASM-1, evidenciando que se logró una extracción de oro del 85.19%.

Con base en la información proporcionada en esta Tabla 11, se elaboró la Figura 5, que ilustra la cinética de extracción de oro, donde se observa el porcentaje de extracción de oro en función al tiempo de lixiviación.

Se realiza el mismo procedimiento para las 11 pruebas de lixiviación. En los Apéndice B a K, se observa a detalle el balance metalúrgico y cinética de extracción.

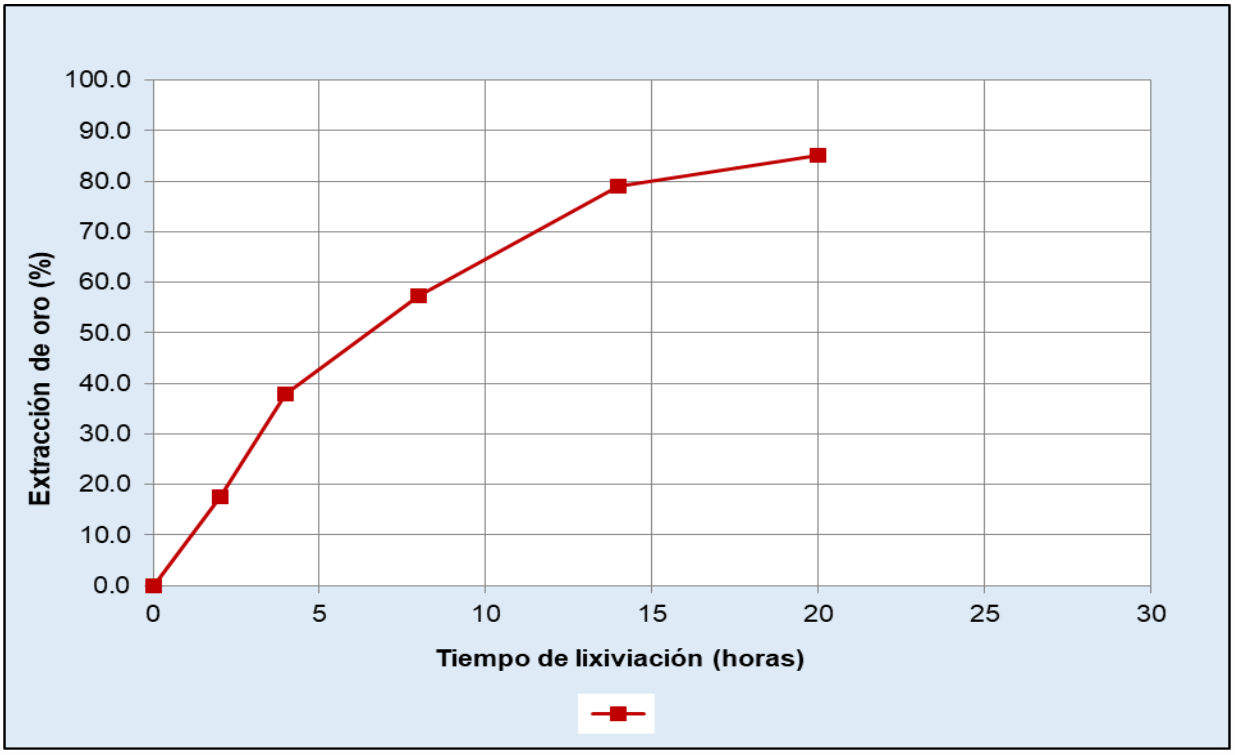
Tabla 10

Balance metalúrgico de la prueba ASM-1

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	1.48	1.38	17.51
4	0.9300	3.20	2.98	37.86
8	0.9300	4.85	4.51	57.39
14	0.9300	6.68	6.21	79.04
20	0.9300	7.20	6.70	85.19
Ripio	398.6 g	2.92 g/t	1.16 mg	14.81 %
Cabeza calculada	398.6 g	19.72 g/t	7.86 mg	100.00 %
Cabeza ensayada		20.90 g/t		

Figura 5

Cinética de extracción para la prueba ASM-1



La Tabla 12 muestra el balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación, información utilizada para determinar el porcentaje de extracción de oro

Tabla 11

Resumen del balance metalúrgico de las pruebas de lixiviación

Muestra	Tiempo (h)	Solución lixiviante		Ripio		Cabeza calculada (mg)	Extracción de oro (%)
		Ley de Au (mg/L)	Contenido metálico (mg)	Ley de Au (g/t)	Contenido metálico (mg)		
ASM-1	20	7.20	6.70	2.92	1.16	7.86	85.19
ASM-2	20	8.49	7.90	2.97	1.18	9.08	86.96
ASM-3	20	6.93	6.45	1.93	0.77	7.21	89.34
ASM-4	20	6.37	5.92	2.03	0.81	6.73	87.98

Muestra	Tiempo (h)	Solución lixiviante		Ripio		Cabeza calculada (mg)	Extracción de oro (%)
		Ley de Au (mg/L)	Contenido metálico (mg)	Ley de Au (g/t)	Contenido metálico (mg)		
ASM-5	30	8.15	7.58	2.30	0.92	8.50	89.21
ASM-6	30	6.87	6.39	2.54	1.01	7.40	86.32
ASM-7	30	8.79	8.18	1.65	0.66	8.83	92.55
ASM-8	30	9.19	8.55	1.95	0.78	9.32	91.66
ASM-9	25	8.38	7.79	0.83	0.33	8.13	95.93
ASM-10	25	8.23	7.65	1.42	0.57	8.22	93.11
ASM-11	25	8.47	7.88	1.26	0.50	8.38	94.01

En la Tabla 13 se presenta el resumen del porcentaje de extracción de oro obtenido en las diversas pruebas realizadas para los tiempos en los que se llevaron los controles.

A partir de los datos contenidos en la Tabla 13, se elaboró el gráfico de la cinética de extracción de oro, tal como se muestra en la Figura 6. Donde se observa que las pruebas 9, 10 y 11 alcanzaron los porcentajes más altos de extracción de oro.

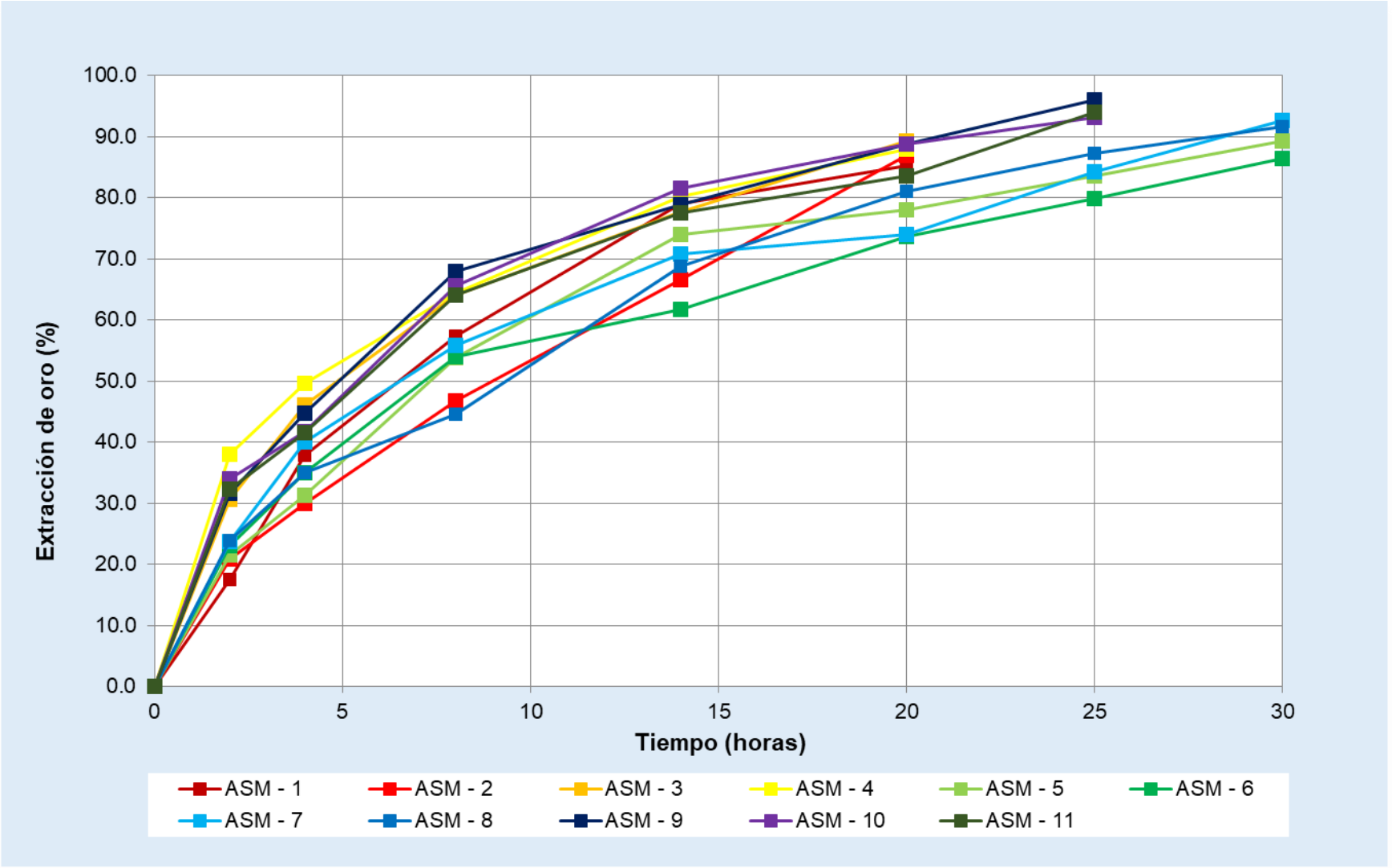
Tabla 12

Extracción de oro (%) de las 11 pruebas obtenidas dentro de 2 a 30 horas de lixiviación

Tiempo (h)	Extracción de Au (%)										
	ASM - 1	ASM - 2	ASM - 3	ASM - 4	ASM - 5	ASM - 6	ASM - 7	ASM - 8	ASM - 9	ASM - 10	ASM - 11
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	17.51	20.79	30.55	37.98	21.56	23.12	23.69	23.84	31.59	33.94	32.30
4	37.86	29.91	46.15	49.59	31.31	34.93	40.01	35.01	44.64	41.64	41.51
8	57.39	46.71	64.07	64.36	53.74	54.03	55.81	44.55	67.88	65.62	64.04
14	79.04	66.58	77.61	80.11	73.89	61.69	70.77	68.82	78.87	81.57	77.47
20	85.19	86.96	89.34	87.98	78.04	73.63	74.02	80.99	88.83	88.81	83.46
25					83.52	79.79	84.24	87.27	95.93	93.11	94.01
30					89.21	86.32	92.55	91.66			

Figura 6

Cinética de extracción de oro, de las 11 pruebas, respecto al tiempo de lixiviación



CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Análisis del diseño experimental

Para analizar los resultados que se obtuvo de las pruebas, se evaluó la interacción de las variables independientes que influyen en la extracción de oro. La tabla 14 muestra los resultados experimentales de extracción de oro (%) en diferentes condiciones.

Tabla 13

Resultados experimentales

N° de prueba	Variables Independientes						Variable Dependiente
	A		B		C		Y
1	-1	55	-1	500	-1	20	85.19
2	1	70	-1	500	-1	20	86.96
3	-1	55	1	1000	-1	20	89.34
4	1	70	1	1000	-1	20	87.98
5	-1	55	-1	500	1	30	89.21
6	1	70	-1	500	1	30	86.32
7	-1	55	1	1000	1	30	92.55
8	1	70	1	1000	1	30	91.66
9	0	62.5	0	750	0	25	95.93
10	0	62.5	0	750	0	25	93.11
11	0	62.5	0	750	0	25	94.01

En la Tabla 13 se observan tres escenarios sobresalientes:

Primero, la granulometría al 62.5 % -200 M obtuvo el mayor porcentaje de extracción de oro en un rango del 94.01% al 95.93%, seguido por la granulometría al 70% -200M con un porcentaje de extracción de oro del 86.96% al 91.66%, y por último la granulometría al 55% -200M obtuvo un porcentaje de extracción por debajo del 92.55%. De donde se desprende que la mejor performance para la extracción de oro es granulometría 62.5% -200M.

Segundo, utilizando una concentración de cianuro de sodio de 750 ppm se obtuvo superior extracción de oro en comparación a 500 y 1000 ppm, por lo que concentraciones por debajo de 500 ppm no es óptima para extracción de oro. Por otro lado, la concentración por encima de 1000 ppm genera consumo innecesario de reactivo.

Tercero, se observa que la lixiviación durante 20 horas permitió alcanza un máximo de 89.34% de extracción de oro, mientras que con 25 horas se alcanzó extracciones superiores al 93%. Al extender el tiempo a 30 horas, las extracciones oscilaron entre el 86.32% y el 92.55%.

Se concluye que la prueba N° 9 presenta las condiciones más adecuadas para la extracción de oro. Con esta prueba se alcanzó 95.93 % de extracción, empleando granulometría al 62.5% -200M, concentración de cianuro de sodio de 750 ppm y 25 h de lixiviación.

6.2. Efecto de las variables

Con el objetivo de determinar de manera cuantitativa el impacto de las variables independientes sobre la variable respuesta, se analiza los efectos que determinan la variación en el porcentaje de extracción de oro. Los datos presentados en la Tabla 14 se generan mediante el uso del software Minitab 19.

Tabla 14

Efectos estimados para la extracción de oro

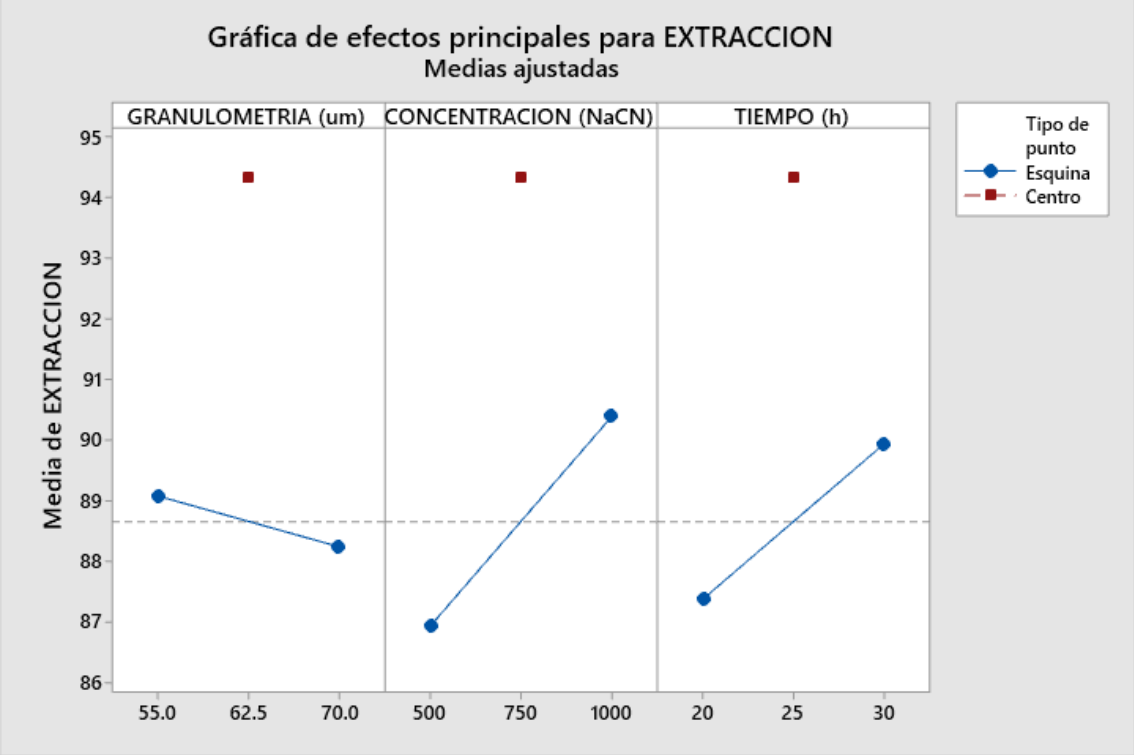
Variables codificadas	Efecto
Constante	88.65
A	-0.84
B	3.46
C	2.57
AB	-0.28
AC	-1.05
BC	0.88
ABC	1.28

A partir de la Tabla 14 se concluye que la granulometría del mineral y las interacciones entre las variables de granulometría y la concentración de NaCN, así como la interacción entre la concentración de NaCN y el tiempo de lixiviación, no tienen un impacto significativo en el proceso.

Con el objetivo de tener una visión más clara de los efectos, la Figura 7 ilustra el comportamiento de las variables independientes en relación con la extracción de oro.

Figura 7

Gráfica de efectos principales para la extracción de oro



Nota: Software estadístico Minitab 19

De los efectos principales se observa que:

La granulometría del mineral se presenta como la variable que no tiene significancia en el proceso de extracción de oro. Se puede notar que muestra una pendiente descendiente desde 89% de extracción, cuando se trabaja a 55% -200M, hasta 88% de extracción con 70% -200M, lo que indica que no es necesario reducir el tamaño del mineral a más de 65% -200M.

La concentración de NaCN es el efecto con más significancia en el proceso de extracción de oro. Se observa que presenta tendencia ascendente, partiendo de 86.91% de extracción con concentraciones de 500 ppm y alcanzando 90.37% con concentraciones de 1000 ppm, lo que sugiere que su efecto es beneficioso cuando aumenta la concentración.

El tiempo se considera la segunda variable más significativa, ya que su impacto es favorable cuando se incrementa el tiempo de lixiviación, ascendiendo desde 87.36% de extracción con 20 horas de lixiviación hasta 89.93% con 30 horas.

6.3. Análisis de la varianza (ANOVA) para la extracción de oro

Los resultados del ANOVA del modelo de regresión, se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15

Análisis de varianza

Término	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Razón - F	Valor - P
Modelo	8	116.58	14.5724	7.05	0.13
Lineal	3	38.594	12.8648	6.22	0.142
A - Granulometría (%)	1	1.413	1.413	0.68	0.495
B - Concentración de NaCN (ppm)	1	23.983	23.9833	11.6	0.076
C - Tiempo (h)	1	13.198	13.198	6.38	0.127
Interacciones de 2 términos	3	3.906	1.3021	0.63	0.661
AB	1	0.158	0.1581	0.08	0.808
AC	1	2.199	2.1988	1.06	0.411
BC	1	1.549	1.5493	0.75	0.478
Interacciones de 3 términos	1	3.279	3.2788	1.59	0.335
ABC	1	3.279	3.2788	1.59	0.335
Curvatura	1	70.8	70.8001	34.25	0.028
Error	2	4.134	2.0672		
Total	10	120.714			

Nota: Software estadístico Minitab 19

En este análisis, la prueba de ANOVA se utiliza para evaluar el valor – P de las variables y sus interaccione. El valor-p es un indicador que establece el nivel de significancia de las variables en un modelo. En este contexto, la variable correspondiente a la concentración de NaCN se destaca como la más relevante, dado que su valor-p es el más cercano a (α = 0.05). En contraste, los demás valores-p son superiores a (α), lo que implica que no tienen un impacto significativo en el modelo.

Con el programa Minitab 19, se obtiene el resumen del modelo:

S = 1.43777

R – cuadrado = 96.58%

R – cuadrado (ajustado) = 82.88%

En el ámbito de la estadística, el R-cuadrado indica que el modelo ajustado puede explicar el 96.58% de la variabilidad del en el porcentaje de extracción de oro. Por otro lado, el R-cuadrado ajustado es más adecuado para comparar modelos con distintas cantidades de variables independientes, muestra que el modelo propuesto explica el 82.88% de la variabilidad. Asimismo, la estimación del error estándar indica una desviación normal del modelo de 1.43777.

6.4. Modelo matemático que simule el proceso para la extracción

El modelo matemático derivado es de naturaleza lineal, lo que permite una representación lógica y cualitativa del proceso de lixiviación. La ecuación asociada a este modelo refleja los resultados obtenidos. En la formulación de este modelo, se han excluido las variables e interacciones que no tienen relevancia en el proceso.

Ecuación del modelo matemático a escala codificada:

$$\mathbf{Y =} -18.2 + 1.63\,A + 0.1095\,B + 4.07\,C$$

Ecuación del modelo matemático a escala no codificada:

Extracción de oro (%) = -18.2 + 1.63 granulometría del mineral + 0.1095 concentración de NaCN + 4.07 tiempo de lixiviación

CONCLUSIONES

Al finalizar la presente investigación del proceso de cianuración de minerales auríferos, permitió llegar a las siguientes conclusiones como se muestra a continuación:

- Se extrae el 95.93% del oro del mineral aurífero de ASMIASI mediante el proceso de cianuración.
- Se determina que 62.5% -200M es la granulometría más favorable para la extracción del oro del mineral aurífero de ASMIASI. Esta granulometría optimiza la superficie de contacto entre el mineral aurífero y el reactivo, mejorando así la efectividad del proceso de cianuración.
- Se determina que 750 ppm es la concentración de cianuro de sodio más adecuada para extraer el oro por el proceso de cianuración.
- Se determina que el tiempo óptimo de lixiviación para la extracción del oro es 25 horas.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la comunidad metalurgista:

- Implementar equipos y mejorar el laboratorio de hidrometalurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, para realizar con mayor precisión este tipo de investigación tecnológica.
- Estudiar el proceso de lixiviación por agitación con cianuro y su respectivo comportamiento cinético a diferentes concentraciones de cianuro.
- Realizar una comparación de extracción del oro del mineral aurífero de ASMIASI frente a otros procesos de extracción del oro.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ballester A. (2000). “Metalúrgica Extractiva I” Madrid, España: Síntesis.

Carrasco, S. (2019). “Metodología de la investigación científica. Pautas metodológicas para diseñar y elaborar el proyecto de investigación”. Lima: Editorial San Marcos E.I.R.L. Ltda.

Currie J. (1984). “Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales”

Dana, H. (1965). Manual de Mineralogía (Segunda ed.). Barcelona, España: Reverte S.A.

Domic M., E. (2001). Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones. Santiago, Chile: Andros Impresores Ltda.

Hernández, R. (2019). “Metodología de la Investigación. Las rutas cuantitativas, cualitativas y mixta”. Ediciones McGRAW-HILL LIMA: Internacional Editores.

Linares, N. (2014). Procesamiento de minerales - Mineralurgia II. Perú

Misari, C, F. (2010). Metalúrgica del oro. Lima, Perú: San Marcos E.I.R.L.

Skoog, D. A., West, D. M., Holler, J. F., & Crouch, S. R. (2008). Fundamentos de Quimica Analitica. Thomson. Smith, J. M. (1991). Chemical ingeneering kinetics (sexta ed.). Tlalplan: Continental.

Uceda D. (2016). “Hidrometalurgia Química e Ingeniería”

Vargas G., J. (1990). “Metalurgia del Oro y la Plata. Lima: San Marcos E.I.R.L.”

Referencias de páginas web

Gama Perú (s.f.) concentración gravimétrica. Consultado el 18 de junio de 2024. http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-4-2.htm

Universidad Politécnica De Madrid (2014) Los riesgos para la salud de la minería artesanal del oro. Consultado el 16 de junio de 2024. https://www.iagua.es/noticias/upm/14/11/11/riesgos-salud-mineria-artesanal-oro

Referencia de tesis:

Bonilla, A., & Martínez, J. (2022). *Estudio de minerales auríferos por flotación y cianuración para la recuperación de oro y plata de la minera Tres Valles SAC*. [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/7624

Bonilla, A., & Martínez, J. (2022). *Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua*. [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. https://repositorio.unan.edu.ni/17166/1/17166.pdf

Dueñas Z. & Graff J. (2018). *Recuperación de oro y plata por medio de concentración por flotación y lixiviación con cianuro.* [Universidad de Sonora]. https://1library.co/document/zke2l48z-recuperacion-oro-plata-medio-concentracion-flotacion-lixiviacion-cianuro.html

Ferrer H. (2019). *Caracterización y tratamiento por cianuración de sulfuros para la recuperación de oro en Quío – Ambo – Huánuco – 2019*. [Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1559/1/T026_70747926_T.pdf

Gómez J. & Morales M. (2012). *Evaluación del proceso de lixiviación por agitación de minerales Au-Ag en la Compañía Minera Ares Castilla – Arequipa.* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/875/253T20120070.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Holguín A. (2023). *Optimización del proceso de cianuración de los minerales auríferos del yacimiento Valetita IV de la compañía minera Tunkyro SAC*. [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco].

http://200.48.82.27/handle/20.500.12918/8254

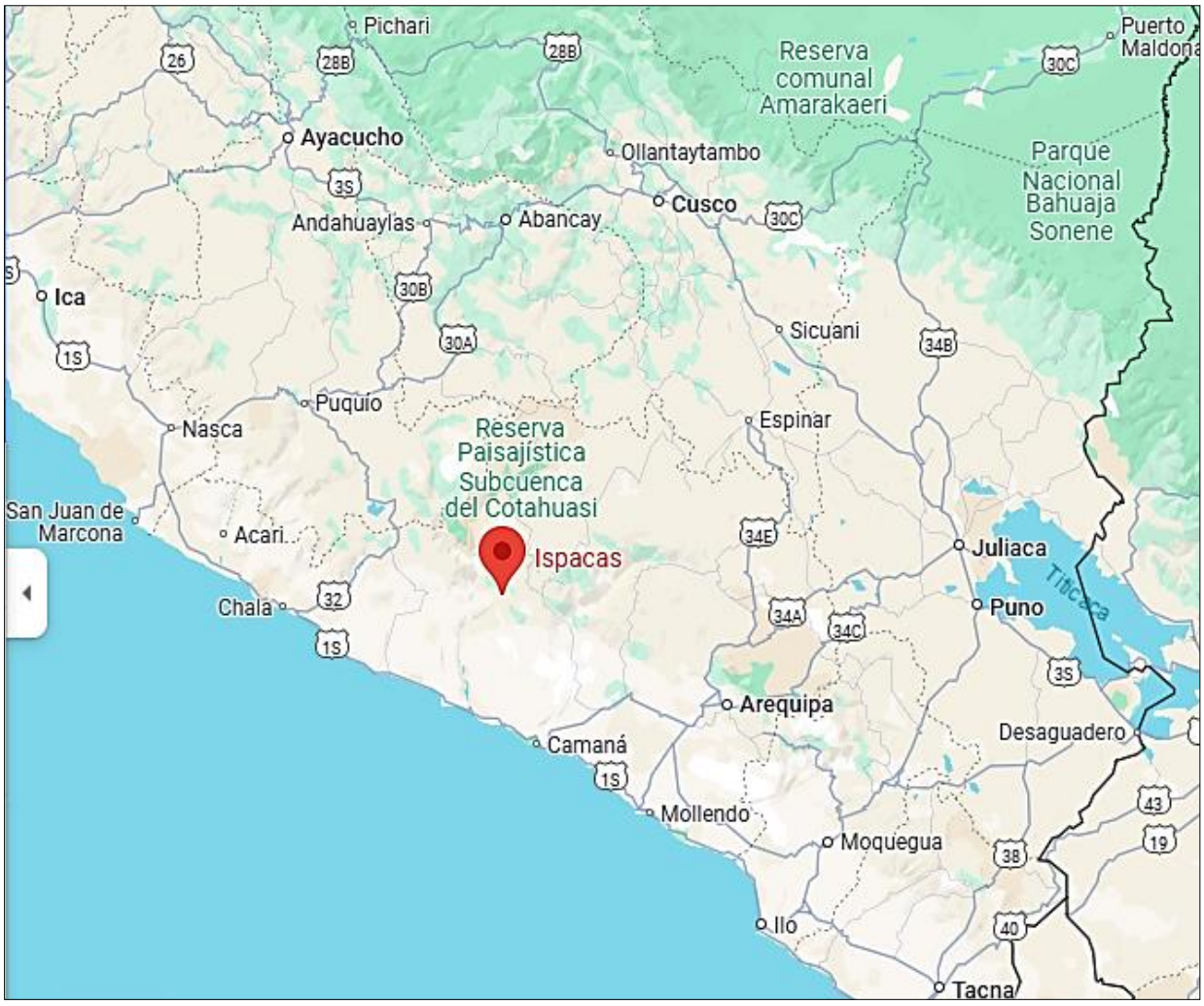
Pérez, L. (2023). *Análisis de recuperación de oro con reactivos orgánicos y reactivos de cianuro para proceso de lixiviación Trujillo 2022.* [Universidad privada del Norte]. https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/34750/Perez%20Valqui%2C%20Luis%20David.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Romero J. (2020). *Extracción del oro mediante el proceso de lixiviación con el reactivo sandioss del yacimiento minero Chocrocoña, Llusco—Chumbivilcas, Región Cusco* [Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco]. https://repositorio.unsaac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12918/6146/253T20200406_TC.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Valdez C. (2021). *Extracción de oro por lixiviación de los relaves de un mineral de cobre de la región de Tiquicheo, Michoacán.* [Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo]. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/bitstream/handle/DGB_UMICH/5354/IIMM-M-2021-0898.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXOS

ANEXO 01: Ubicación de ASMIASI



https://www.google.com/maps/place/Ispacas+04730/@-15.7688316,-72.9286678,7z/data=!4m15!1m8!3m7!1s0x916a9ca3d1ae0fb9:0x3e44070fd1036a7d!2sIspacas+04730!3b1!8m2!3d-15.7583943!4d-72.9189516!16s%2Fg%2F11sgx82v6z!3m5!1s0x916a9ca3d1ae0fb9:0x3e44070fd1036a7d!8m2!3d-15.7583943!4d-72.9189516!16s%2Fg%2F11sgx82v6z!5m1!1e4?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI1MDMyNS4xIKXMDSoJLDEwMjExNDU1SAFQAw%3D%3D

ANEXO 02: Fotografías de la preparación mecánica del mineral

50 kg del mineral de ASMIASI

Chancado primario, secundario y terciario

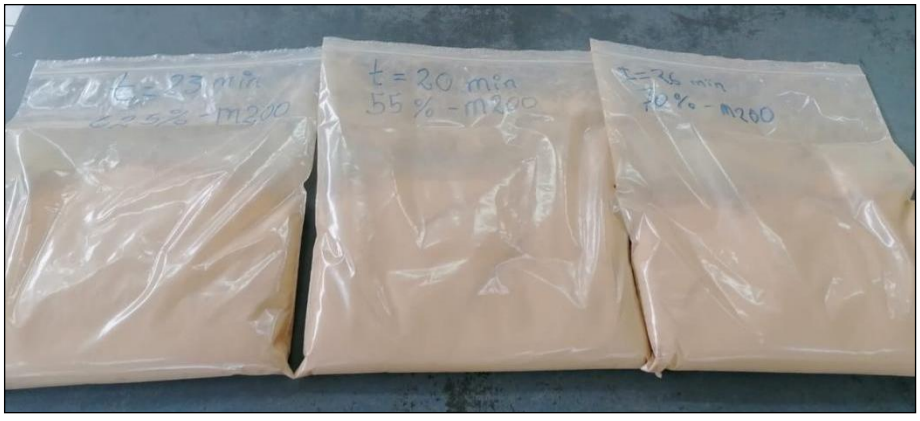
Homogenizado: método de coneo y cuarteo

Proceso de molienda

Tamizado

Homogeneizado

Muestras representativas con granulometrías de 50, 62.5 y 70 % -200M



ANEXO 03: Fotografías del procedimiento de lixiviación

Rotulado de los reactores

Pesado del mineral

Pesado de cal

Pesado de cianuro

Vertido de agua al reactor

Añadiendo cal y cianuro

Agitación de la pulpa

Monitoreos

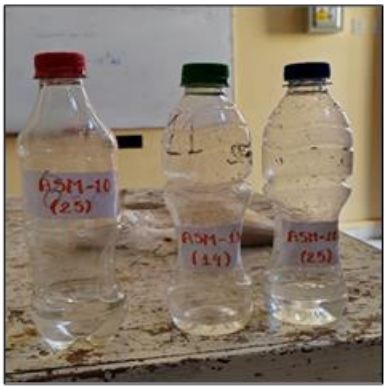
Medición de pH

Filtrado de solución

Titulación

Sedimentación de las soluciones lixiviadas

Soluciones lixiviadas para análisis químico



Lavado de ripio

Secado de ripio

Muestra de ripio para análisis químico

ANEXO 04: Resultados del análisis químico de las soluciones lixiviadas y ripios

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 862DE5E4

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-23-00232

Fecha de emisión: 20/6/2023 **Página 1 de 2**

Señores: EVELYN MELIZA FARFÁN CÁRDENAS
Dirección: CUSCO
Atención: EVELYN MELIZA FARFÁN CÁRDENAS
Recepción: 20/6/2023
Realización: 20/6/2023
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	(c) Descripción de Muestra	*901 Au mg/L
SS23000724	ASM-1 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1.48
SS23000725	ASM-1 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.20
SS23000726	ASM-1 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.85
SS23000727	ASM-1 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.68
SS23000728	ASM-1 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.20
SS23000729	ASM-2 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.03
SS23000730	ASM-2 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.92
SS23000731	ASM-2 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.56
SS23000732	ASM-2 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.50
SS23000733	ASM-2 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.49
SS23000734	ASM-3 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.37
SS23000735	ASM-3 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.58
SS23000736	ASM-3 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.97
SS23000737	ASM-3 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.02
SS23000738	ASM-3 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.93
SS23000739	ASM-4 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.75
SS23000740	ASM-4 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.59
SS23000741	ASM-4 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.66
SS23000742	ASM-4 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.80
SS23000743	ASM-4 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.37
SS23000744	ASM-5 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1.97
SS23000745	ASM-5 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.86
SS23000746	ASM-5 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.91
SS23000747	ASM-5 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.75
SS23000748	ASM-5 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.13
SS23000749	ASM-5 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.63
SS23000750	ASM-5 (30)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.15
SS23000751	ASM-6 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	1.84
SS23000752	ASM-6 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.78
SS23000753	ASM-6 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.30
SS23000754	ASM-6 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.91
SS23000755	ASM-6 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.86

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico"=Límite 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 cómo se recibió

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMA.PE. 20/6/2023 12:52:26

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada: 862DE5E4

INFORME DE ENSAYO LAS01-SS-23-00232

Fecha de emisión: 20/6/2023

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*901 Au mg/L
SS23000756	ASM-6 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.35
SS23000757	ASM-6 (30)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.87
SS23000758	ASM-7 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.25
SS23000759	ASM-7 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.80
SS23000760	ASM-7 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.30
SS23000761	ASM-7 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.72
SS23000762	ASM-7 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.03
SS23000763	ASM-7 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.00
SS23000764	ASM-7 (30)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.79
SS23000765	ASM-8 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.39
SS23000766	ASM-8 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.51
SS23000767	ASM-8 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	4.47
SS23000768	ASM-8 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.90
SS23000769	ASM-8 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.12
SS23000770	ASM-8 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.75
SS23000771	ASM-8 (30)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	9.19
SS23000772	ASM-9 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.76
SS23000773	ASM-9 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.90
SS23000774	ASM-9 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.93
SS23000775	ASM-9 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.89
SS23000776	ASM-9 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.76
SS23000777	ASM-9 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.38
SS23000778	ASM-10 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.00
SS23000779	ASM-10 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.68
SS23000780	ASM-10 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.80
SS23000781	ASM-10 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.21
SS23000782	ASM-10 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.85
SS23000783	ASM-10 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.23
SS23000784	ASM-11 (2)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	2.91
SS23000785	ASM-11 (4)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	3.74
SS23000786	ASM-11 (8)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	5.77
SS23000787	ASM-11 (14)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	6.98
SS23000788	ASM-11 (20)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	7.52
SS23000789	ASM-11 (25)	No proporcionado por el cliente.	Solución de cianuro	8.47

---------- Fin del informe ----------

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

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"a<Valor numérico"=Límite 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 cómo se recibió

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426, Emisor de certificado: LLAMA.PE, 20/6/2023 12:52:26

Laboratorios Analíticos del Sur

Parque Industrial Rio Seco C-1 Cerro Colorado
Arequipa Perú

Clave generada : 654FCD21

INFORME DE ENSAYO LAS01-MN-23-05671

Fecha de emisión: 21/06/2023 **Página 1 de 1**

Señores: EVELYN MELIZA FARFÁN CÁRDENAS
Dirección: CUSCO
Atención: EVELYN MELIZA FARFÁN CÁRDENAS
Recepción: 20/6/2023
Realización: 20/6/2023
Observación: El Laboratorio no realiza la toma de muestra

Métodos ensayados

*551 Método de ensayo a fuego para oro por reconocimiento absorción atómica

Código Interno L.A.S.	(c) Nombre de Muestra	(c) Procedencia de Muestra	(c) Descripción de Muestra	*551 Au	
				g/TM	oz/TC
MN23010617	ASM-1 (20)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	2.92	0.09344
MN23010618	ASM-2 (20)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	2.97	0.09504
MN23010619	ASM-3 (20)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	1.93	0.06176
MN23010620	ASM-4 (20)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	2.03	0.06496
MN23010621	ASM-5 (30)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	2.3	0.07360
MN23010622	ASM-6 (30)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	2.54	0.08128
MN23010623	ASM-7 (30)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	1.65	0.05280
MN23010624	ASM-8 (30)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	1.95	0.06240
MN23010625	ASM-9 (25)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	0.83	0.02656
MN23010626	ASM-10 (25)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	1.42	0.04544
MN23010627	ASM-11 (25)	No proporcionado por el cliente.	Ripio	1.26	0.04032

---------- Fin del informe ----------

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

Firmado por: JUAREZ SOTO OMAR ALFREDO, GERENTE DE OPERACIONES M.Sc. Ingeniero Químico CIP 114426. Emisor de certificado: LLAMA.PE. 23/05/2023 02:52:45 p.m.

(*) Los métodos indicados no han sido acreditados por el INACAL-DA.

"[a]<Valor numérico"=Límite 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 cómo se recibió

ANEXO 05: Matriz de consistencia

EXTRACCIÓN DE ORO POR CIANURACIÓN DEL YACIMIENTO ASMIASI - YANAQUIHUA, CONDESUYOS - AREQUIPA

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	**GENERAL**	**GENERAL**	**DEPENDIENTE**	**TIPO DE INVESTIGACIÓN**
¿Será posible la extracción del oro de los minerales auríferos por el proceso de cianuración?	Extraer por cianuración el oro de los minerales auríferos de ASMIASI	Por el proceso de cianuración se extrae el oro del mineral aurífero de ASMIASI	Extracción de oro	Tecnológico – Experimental
ESPECÍFICOS	**ESPECÍFICOS**	**ESPECÍFICOS**	**INDEPENDIENTES**	**NIVEL DE INVESTIGACIÓN**
PE1: ¿Cuál será la granulometría para la extracción del oro por el proceso de cianuración?	**OE1:** Determinar la granulometría del mineral para la extracción del oro por el proceso de cianuración	**HE1:** La granulometría del mineral tiene influencia en el proceso de cianuración para la extracción de oro	Granulometría del mineral Concentración de cianuro Tiempo de lixiviación	Descriptivo – Explicativo
PE2: ¿Cuál será la concentración de cianuro para la extracción del oro por el proceso de cianuración?	**OE2:** Determinar la concentración de cianuro para la extracción del oro por el proceso de cianuración	**HE2:** La concentración de cianuro tiene influencia en el proceso de cianuración para la extracción del oro		
PE3: ¿Cuál será el tiempo de cianuración para la extracción del oro por el proceso de cianuración?	**OE3:** Determinar el tiempo de lixiviación para la extracción del oro por el proceso de cianuración	**HE3:** El tiempo del proceso de cianuración influye en la extracción del oro		

ANEXO 06: Operacionalización de variables e indicadores

VARIABLE NOMINAL	DEFINICIÓN DE LA VARIABLE	UNIDAD DE MEDIDA	INDICADOR	RANGO	TÉCNICA E INSTRUMENTO DE MEDICIÓN
VARIABLE DEPENDIENTE					
Extracción de oro	Cantidad de oro extraído a partir del mineral aurífero, mediante el proceso de cianuración.	%	Porcentaje	80 - 90	➢ Cálculos matemáticos ➢ Excel (hoja de cálculo)
VARIABLES INDEPENDIENTES					
VI 1: Tiempo de lixiviación	Tiempo de contacto adecuado para lograr la disolución del oro en contacto con solución cianurante	h	Horas	20 – 30	Control del tiempo de extracción de oro
VI 2: Concentración de cianuro	Cantidad de cianuro que se encuentra diluido en una cantidad dada de solución	ppm	Concentración	500 – 1000	Titulación
VI 3: Granulometría	Reducción de tamaño utilizando juego de tamices ASTM.	%	Porcentaje	55 – 70	Malla Tyler

APÉNDICES

Apéndice A

Cálculos de reposición de cal y cianuro de sodio para pruebas de lixiviación

PRUEBA - ASM 1

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	2.60	-0.14
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	3.00	-0.23
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	1.90	0.02
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	1.80	0.05
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
Total				0.43 g			0.07 g

PRUEBA - ASM 2

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	2.90	-0.21
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	3.10	-0.26
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	1.90	0.02
14	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	2.00	0.00
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
Total				0.52 g			0.02 g

PRUEBA - ASM 3

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.20	0.19
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.90	0.02
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.10	4.10	-0.02
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	4.10	-0.02
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
Total				0.43 g			0.21 g

PRUEBA - ASM 4

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.40	0.14
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.70	0.07
8	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	4.80	-0.19
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	5.30	-0.30
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00

Total				0.35 g			0.21 g

PRUEBA - ASM 5

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	2.50	-0.12
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	2.20	-0.05
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	2.10	-0.02
14	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	1.80	0.05
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	1.40	0.14
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	1.20	0.19
30	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
Total				0.52 g			0.37 g

PRUEBA - ASM 6

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	1.90	0.02
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.05	2.05	-0.01
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	1.90	0.02
14	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	2.20	-0.05
20	930.09	9.57	10.9	0.09	0.05	1.60	0.09
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	1.30	0.16
30	930.09	9.57	11.0	0.00	0.05	0.00	0.00
Total				0.61 g			0.30 g

PRUEBA - ASM 7

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	1.80	0.51
4	930.09	9.57	10.9	0.09	0.10	4.00	0.00
8	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.70	0.07
14	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	4.10	-0.02
20	930.09	9.57	10.9	0.09	0.10	4.50	-0.12
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	3.80	0.05
30	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
Total				0.70 g			0.51 g

PRUEBA - ASM 8

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.90	0.02
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.10	3.40	0.14
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.10	4.60	-0.14
14	930.09	9.57	10.9	0.09	0.10	4.30	-0.07
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	3.80	0.05

25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	3.70	0.07
30	930.09	9.57	11.0	0.00	0.10	0.00	0.00
Total				0.52 g			0.28g

PRUEBA - ASM 9

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.8	0.17	0.075	2.20	0.19
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.075	3.20	-0.05
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.075	3.40	-0.09
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	3.50	-0.12
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	3.70	-0.16
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
Total				0.43 g			0.19 g

PRUEBA - ASM 10

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.9	0.09	0.075	2.50	0.12
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.075	3.20	-0.05
8	930.09	9.57	10.9	0.09	0.075	3.10	-0.02
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	3.50	-0.12
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	3.80	-0.19
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
Total				0.35 g			0.12 g

PRUEBA - ASM 11

Tiempo (h)	Volumen de solución (mL)	Peso inicial de cal (g)	pH	Reposición de cal (g)	Concentración de NaCN (%)	Gasto de AGN03 (mL)	Reposición de NaCN (g)
0	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
2	930.09	9.57	10.9	0.09	0.075	1.90	0.26
4	930.09	9.57	10.8	0.17	0.075	2.50	0.12
8	930.09	9.57	10.8	0.17	0.075	3.90	-0.21
14	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	5.40	-0.56
20	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	5.70	-0.63
25	930.09	9.57	11.0	0.00	0.075	0.00	0.00
Total				0.43 g			0.37 g

Apéndice B

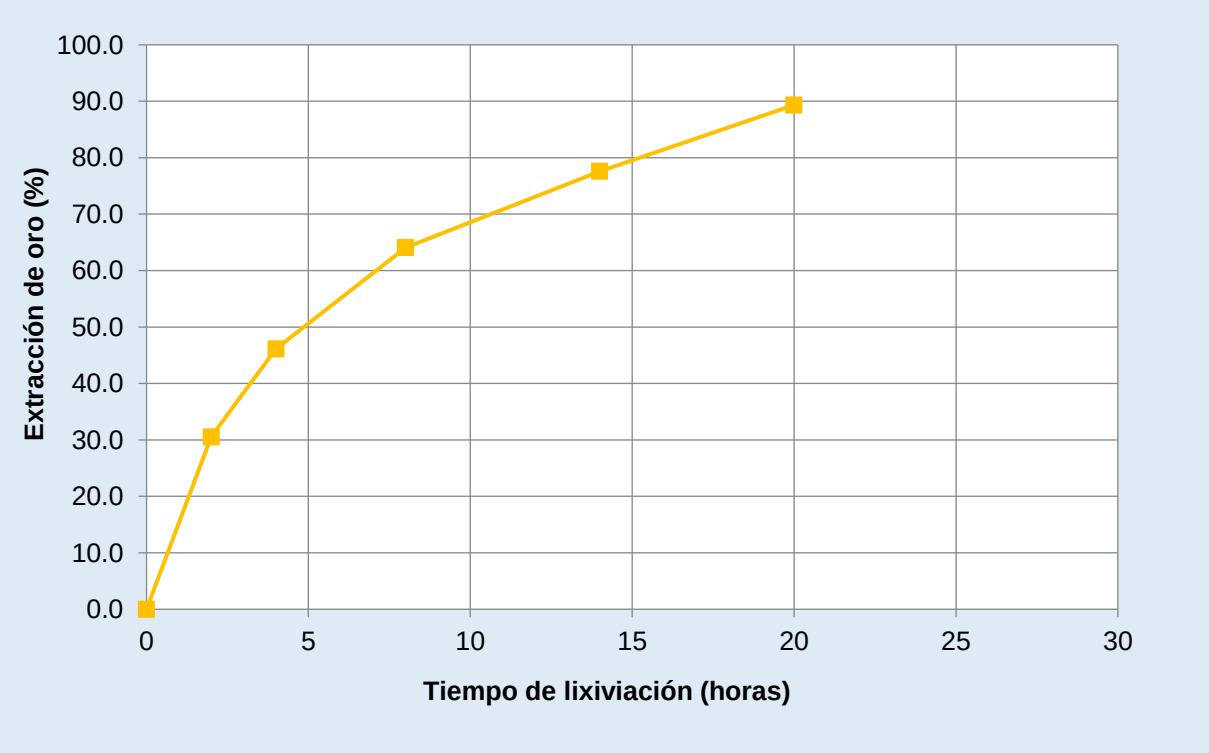
Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 2

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.03	1.89	20.79
4	0.9300	2.92	2.72	29.91
8	0.9300	4.56	4.24	46.71
14	0.9300	6.50	6.05	66.58
20	0.9300	8.49	7.90	86.96
Ripio	398.6 g	2.97 g/t	1.18 mg	13.04 %
Cab. Calculada	398.6 g	22.78 g/t	9.08 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		

Apéndice C

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 3

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.37	2.20	30.55
4	0.9300	3.58	3.33	46.15
8	0.9300	4.97	4.62	64.07
14	0.9300	6.02	5.60	77.61
20	0.9300	6.93	6.44	89.34
Ripio	398.6 g	1.93 g/t	0.77 mg	10.66 %
Cab. Calculada	398.6 g	18.10 g/t	7.21 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



Apéndice D

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 4

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.75	2.56	37.98
4	0.9300	3.59	3.34	49.59
8	0.9300	4.66	4.33	64.36
14	0.9300	5.80	5.39	80.11
20	0.9300	6.37	5.92	87.98
Ripio	398.6 g	2.03 g/t	0.81 mg	12.02 %
Cab. Calculada	398.6 g	16.89 g/t	6.73 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		

Apéndice E

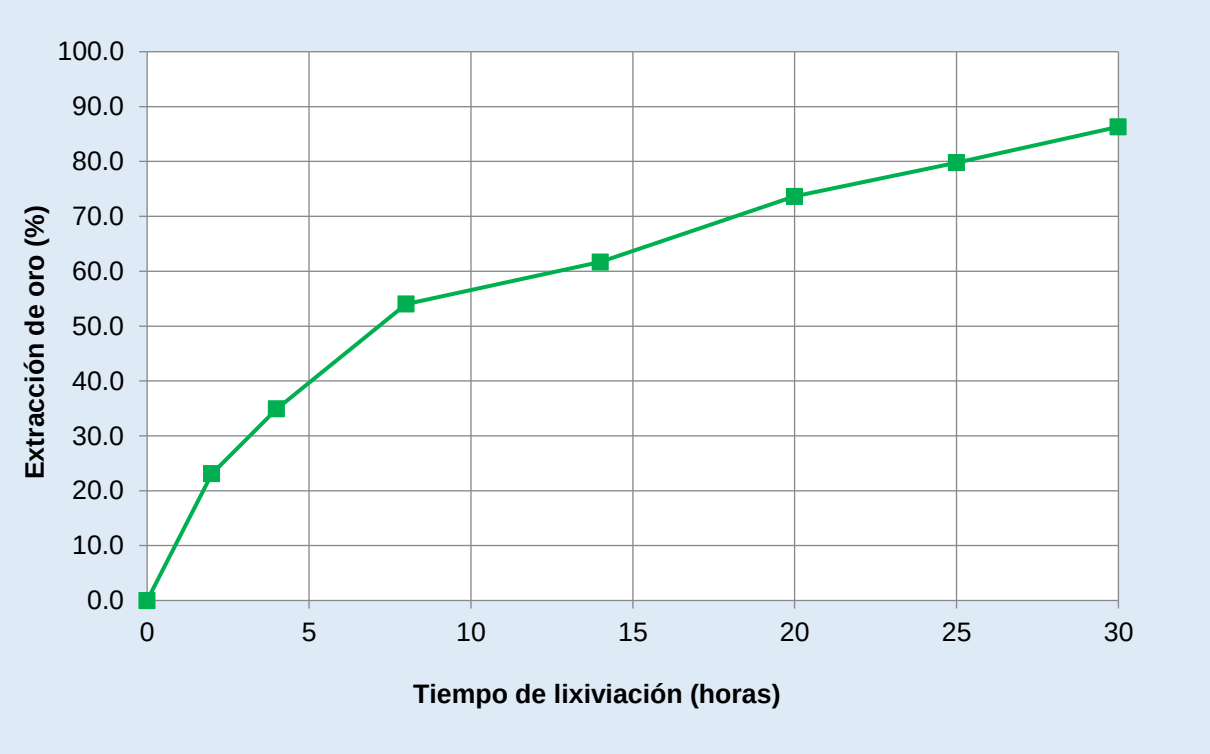
Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 5

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	1.97	1.83	21.56
4	0.9300	2.86	2.66	31.31
8	0.9300	4.91	4.57	53.74
14	0.9300	6.75	6.28	73.89
20	0.9300	7.13	6.63	78.04
25	0.9300	7.63	7.10	83.52
30	0.9300	8.15	7.58	89.21
Ripio	398.6 g	2.30 g/t	0.92 mg	10.79 %
Cab. Calculada	398.6 g	21.31 g/t	8.50 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		

Apéndice F

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 6

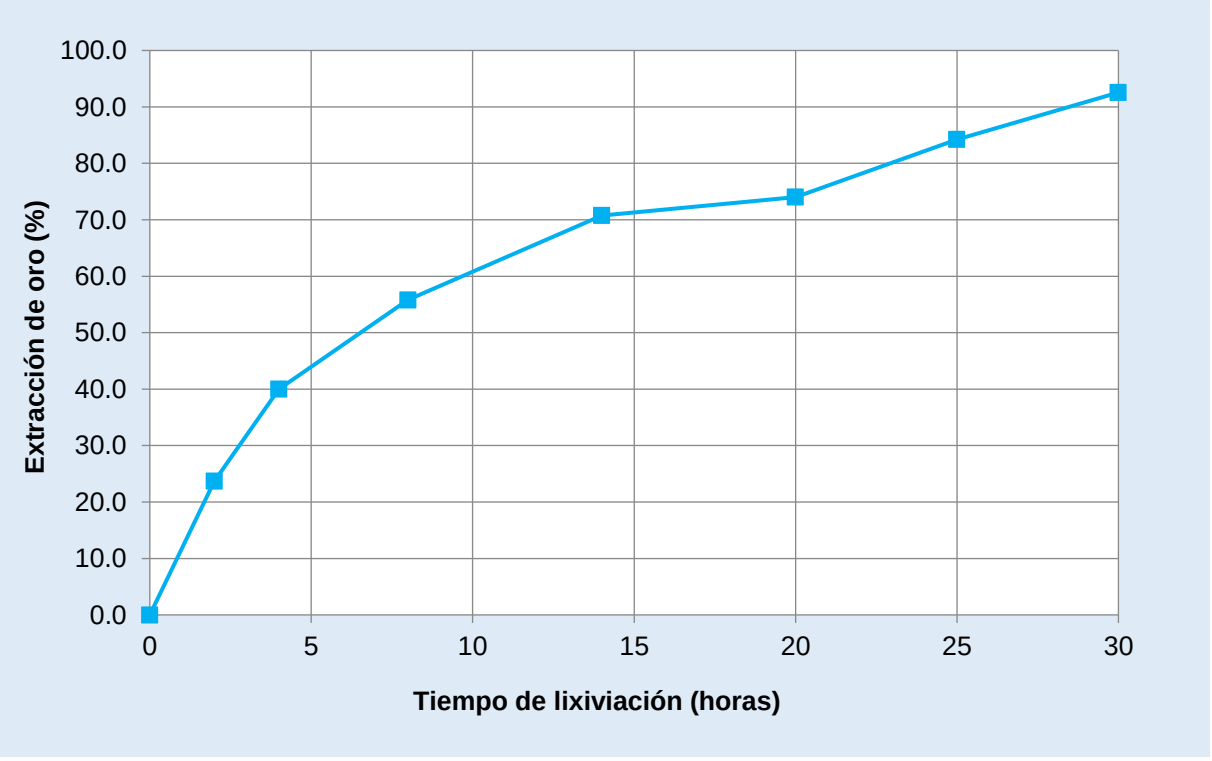
Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	1.84	1.71	23.12
4	0.9300	2.78	2.59	34.93
8	0.9300	4.30	4.00	54.03
14	0.9300	4.91	4.57	61.69
20	0.9300	5.86	5.45	73.63
25	0.9300	6.35	5.91	79.79
30	0.9300	6.87	6.39	86.32
Ripio	398.6 g	2.54 g/t	1.01 mg	13.68 %
Cab. Calculada	398.6 g	18.57 g/t	7.40 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



Apéndice G

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 7

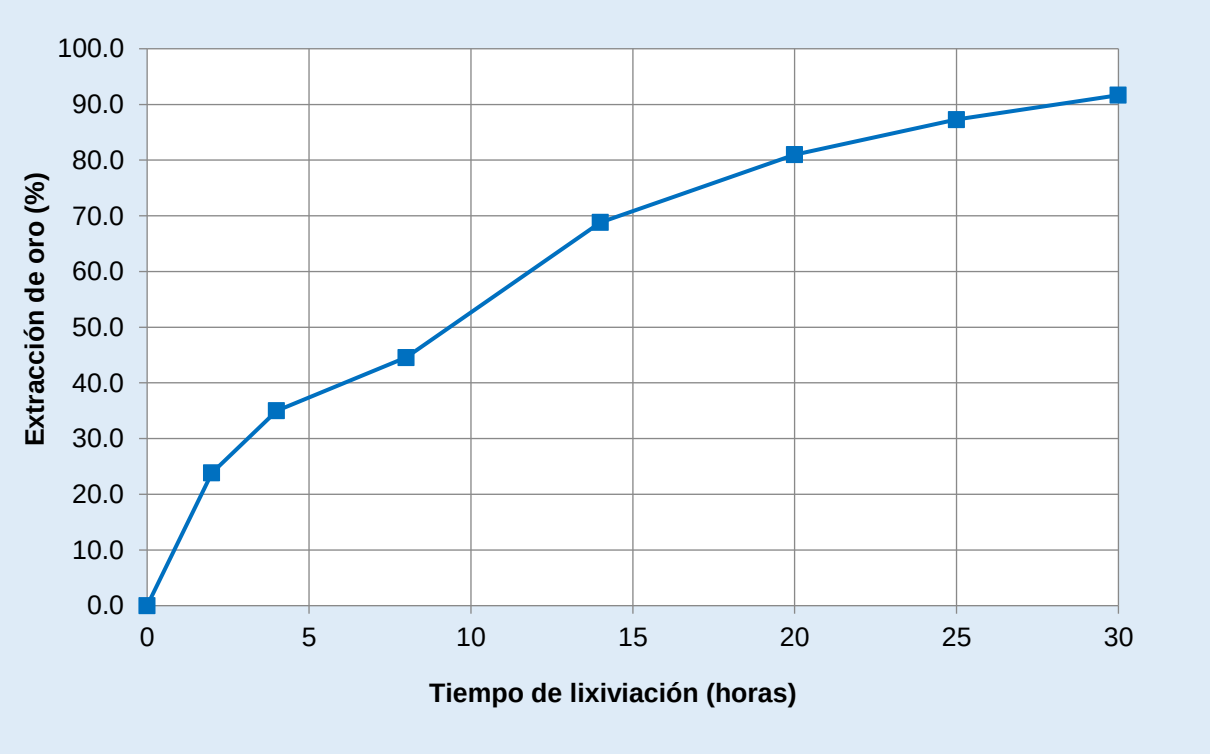
Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.25	2.09	23.69
4	0.9300	3.80	3.53	40.01
8	0.9300	5.30	4.93	55.81
14	0.9300	6.72	6.25	70.77
20	0.9300	7.03	6.54	74.02
25	0.9300	8.00	7.44	84.24
30	0.9300	8.79	8.17	92.55
Ripio	398.6 g	1.65 g/t	0.66 mg	7.45 %
Cab. Calculada	398.6 g	22.16 g/t	8.83 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



Apéndice H

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 8

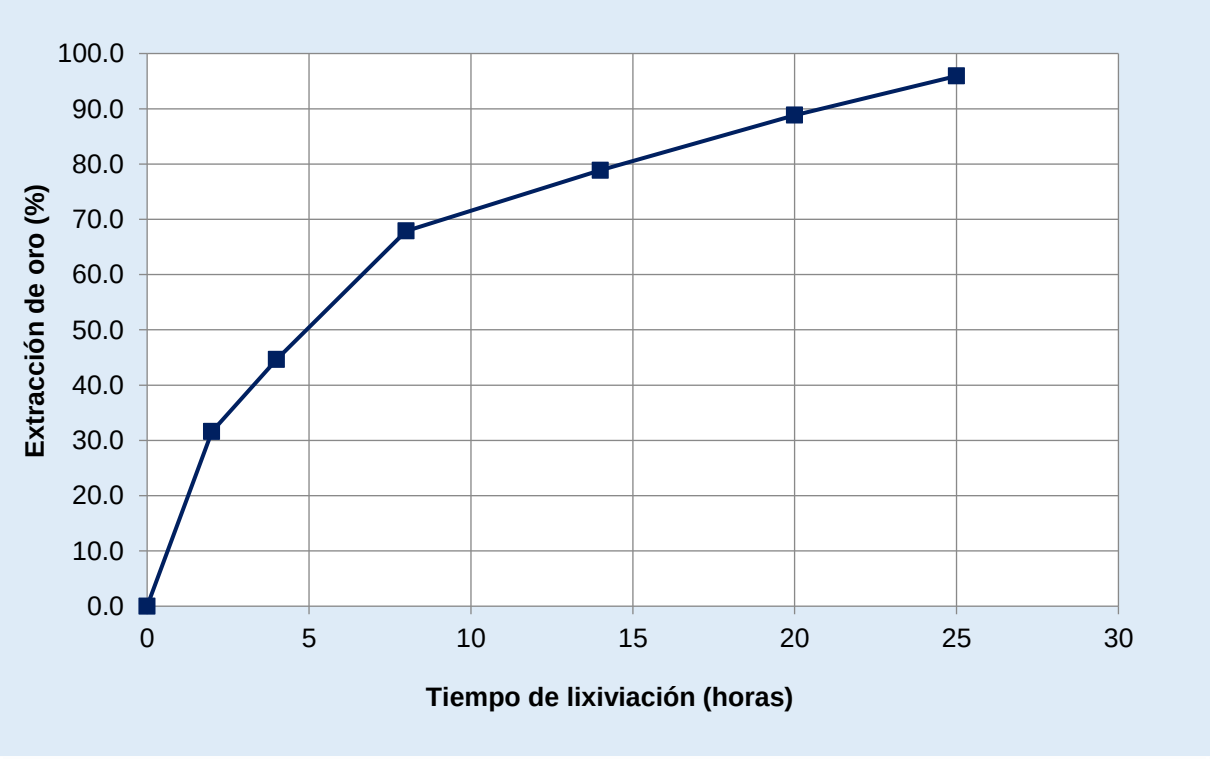
Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.39	2.22	23.84
4	0.9300	3.51	3.26	35.01
8	0.9300	4.47	4.15	44.55
14	0.9300	6.90	6.42	68.82
20	0.9300	8.12	7.55	80.99
25	0.9300	8.75	8.14	87.27
30	0.9300	9.19	8.55	91.66
Ripio	398.6 g	1.95 g/t	0.78 mg	8.34 %
Cab. Calculada	398.6 g	23.39 g/t	9.32 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



Apéndice I

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 9

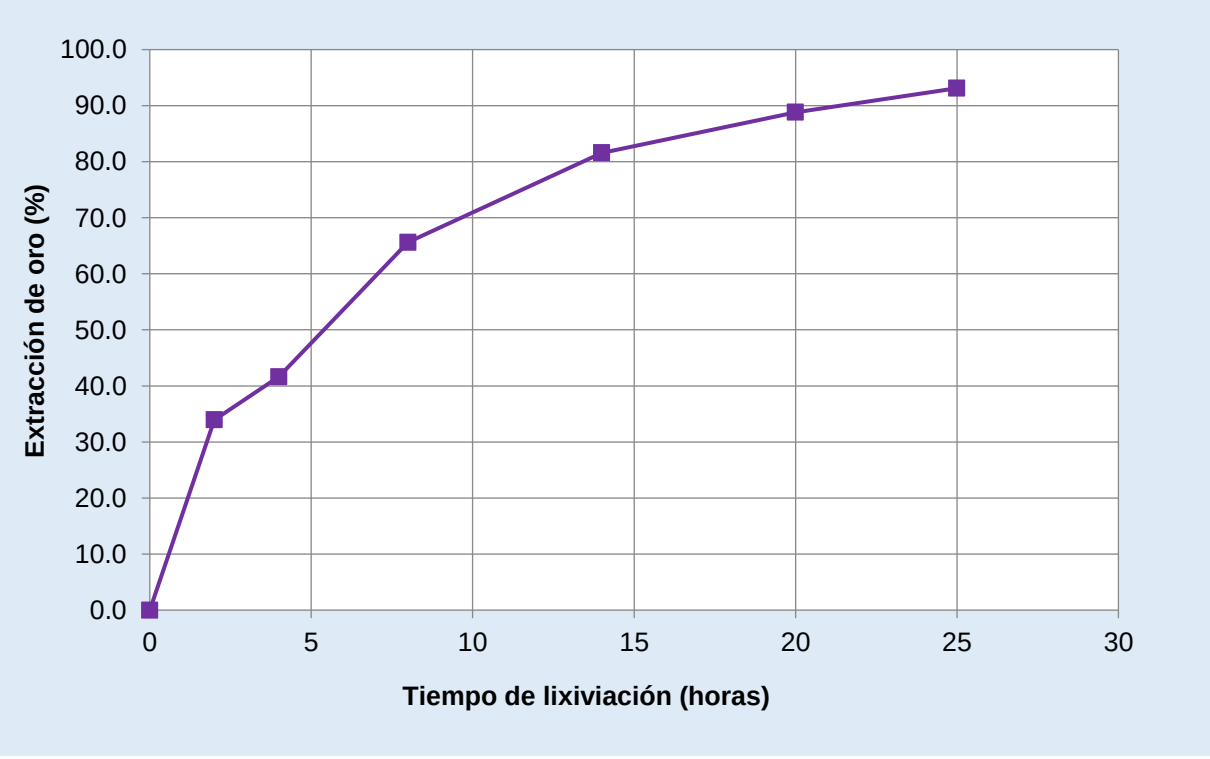
Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.76	2.57	31.59
4	0.9300	3.90	3.63	44.64
8	0.9300	5.93	5.51	67.88
14	0.9300	6.89	6.41	78.87
20	0.9300	7.76	7.22	88.83
25	0.9300	8.38	7.79	95.93
Ripio	398.6 g	0.83 g/t	0.33 mg	4.07 %
Cab. Calculada	398.6 g	20.38 g/t	8.12 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



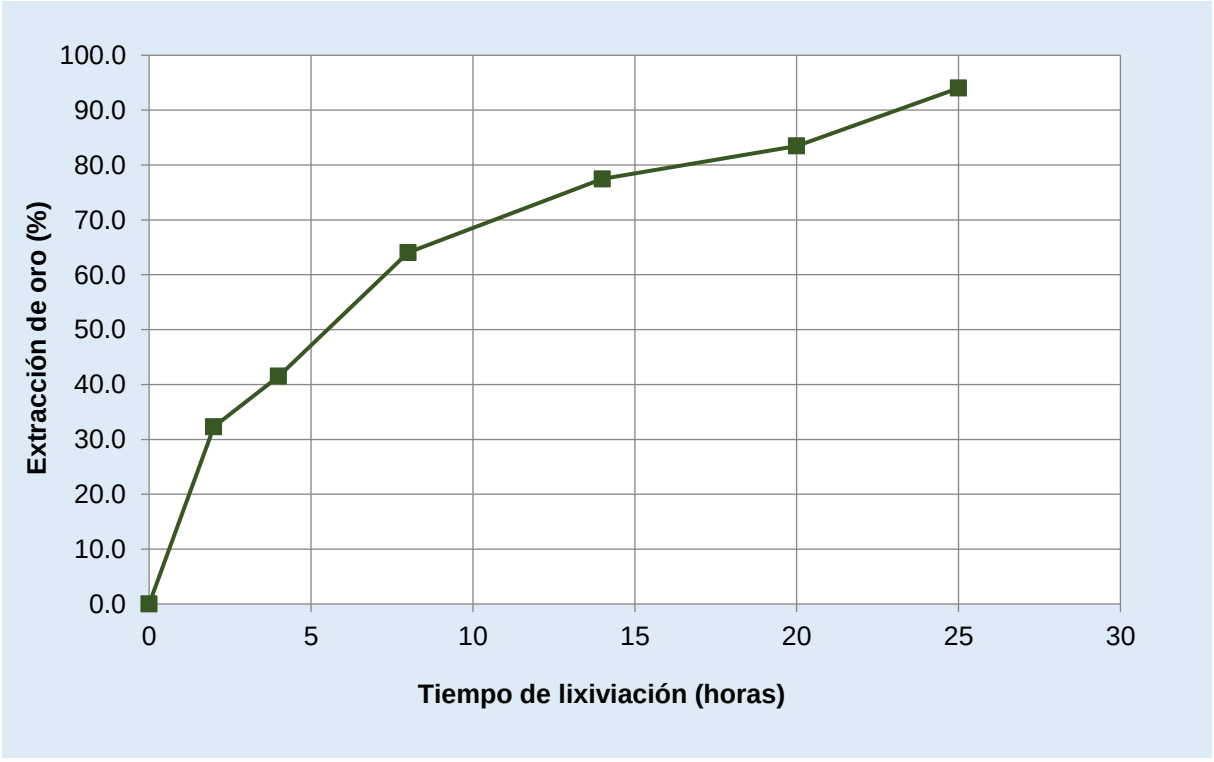
Apéndice J

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 10

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	3.00	2.79	33.94
4	0.9300	3.68	3.42	41.64
8	0.9300	5.80	5.39	65.62
14	0.9300	7.21	6.71	81.57
20	0.9300	7.85	7.30	88.81
25	0.9300	8.23	7.65	93.11
Ripio	398.6 g	1.42 g/t	0.57 mg	6.89 %
Cab. Calculada	398.6 g	20.62 g/t	8.22 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t		



Apéndice K

Balance metalúrgico y cinética de extracción de Au de la muestra ASM - 11

Tiempo (h)	Volumen de solución (L)	Ley de Au (g/L)	Contenido metálico de Au (mg)	Extracción de Au (%)
0	0.9300	0.00	0.00	0.00
2	0.9300	2.91	2.71	32.30
4	0.9300	3.74	3.48	41.51
8	0.9300	5.77	5.37	64.04
14	0.9300	6.98	6.49	77.47
20	0.9300	7.52	6.99	83.46
25	0.9300	8.47	7.88	94.01
Ripio	398.6 g	1.26 g/t	0.50 mg	5.99 %
Cab. Calculada	398.6 g	21.02 g/t	8.38 mg	100.00 %
Cab. Ensayada		20.90 g/t