

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**MEJORAMIENTO DE LA PERCOLABILIDAD CON EL
USO DEL KOLLASOL STG LF Y LA RECUPERACIÓN
DE ORO EN LA UNIDAD MINERA PUCAMARCA-
MINSUR - TACNA**

TESIS

Presentado por:

Bach. Ivan Anderson Quiliche Damian

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2022

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

MEJORAMIENTO DE LA PERCOLABILIDAD CON EL USO DEL KOLLASOL STG LF Y LA RECUPERACIÓN DE ORO EN LA UNIDAD MINERA PUCAMARCA- MINSUR - TACNA

Tesis sustentada y aprobada el día 13 de abril de 2022, estando integrado el Jurado Calificador por:

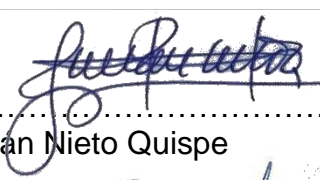
PRESIDENTE

: 
.....
Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

SECRETARIO

: 
.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

VOCAL

: 
.....
Ing. Julián Nieto Quispe

ASESOR

: 
.....
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

DEDICATORIA

A Dios, por darme las fuerzas necesarias para afrontar las dificultades, proteger a mi familia y a los que amo.

A mis padres, Ana María y Julio por su amor y apoyo incondicional en este largo camino, en especial a mi madre por ser mi motivo y fuerza para alcanzar mis metas.

A mis hermanas, por ser mi fuente de inspiración a seguir mejorando y nunca rendirme.

A mi pareja Verónica, por su apoyo incondicional, comprensión y por confiar en mí en todo momento.

AGRADECIMIENTO

A mi prestigiosa casa de estudios, UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, su personal docente, por ser guías, amigos y mentores en mi formación profesional.

A la UNIDAD MINERA PUCAMARCA-MINSUR, por las facilidades para el desarrollo de la presente tesis, un agradecimiento especial al Ingeniero Marcos Quispe Pérez, Supervisor de la empresa EMC2 CONSULTING SAC por la confianza y por haber compartido conmigo sus conocimientos.

A mi asesor Dr. NATANIEL MARIO LINARES GUTIÉRREZ por compartir su valioso conocimiento, por brindarme su asesoría profesional y guiarme en la realización desde el inicio hasta el final, de este trabajo de investigación.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.1.1. Antecedentes del problema	3
1.2. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.3.1. Formulación de los problemas secundarios	7
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	7
1.4.1. Justificación académica	7
1.4.2. Justificación técnica	8
1.4.3. Justificación económica	8
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	9
1.6. OBJETIVOS.....	9

1.6.1. Objetivo general.....	9
1.6.2. Objetivos específicos	10
1.7. HIPÓTESIS.....	10
1.7.1. Hipótesis general	10
1.7.2. Hipótesis específicas.....	10
CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO.....	12
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	12
2.1.1. Nivel internacional	12
2.1.2. Nivel nacional	14
2.2. BASES TEÓRICAS.....	16
2.2.1. Lixiviación.....	16
2.2.4. Uso del cianuro en la producción de oro.....	21
2.2.8. Tensioactivo	29
2.2.10. Ensayos de biodegradabilidad.....	35
2.2.11. Kollasol STG LF.....	36
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS	37
CAPÍTULO III	39
MARCO METODOLÓGICO	39

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	39
3.1.1. Tipo de investigación	39
3.1.2. Nivel de la investigación.....	40
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO.....	40
3.2.1. Población.....	40
3.2.2. Muestra	41
3.2.3. Operacionalización de variables	41
3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	42
3.3.1. Técnica de recolección de datos.....	42
3.3.2. Técnica de análisis de datos.....	42
3.3.3. Materiales y equipos.....	43
3.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS	44
3.4.1. Muestreo	44
3.4.3. Granulometría de la muestra	48
3.4.4. Caracterización microscópica del mineral sílica granulada ...	49
3.4.5. Pruebas de cianuración en columnas	51
3.4.7. Prueba de cianuración en columna 7 con Kollasol STG LF ..	56
CAPÍTULO IV.....	64
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64

4.1. RESULTADOS	64
4.1.1. Determinación de la concentración óptima de Kollasol STG LF	65
4.2. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTES EXPERIMENTALES EN LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ESTÁNDAR.....	66
4.2.1. Determinación del porcentaje de humedad	66
4.2.2. Determinación de la densidad de riego	66
4.2.3. Determinación del área de la columna	66
4.2.4. Determinación del volumen de riego	66
4.2.5. Determinación de la cantidad de NaCN a añadir.....	67
4.2.6. Determinación del porcentaje de compactación	67
4.2.7. Determinar flujo de riego.....	67
4.3. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTES EXPERIMENTALES EN LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN APLICANDO KOLLASOL STG LF.....	67
4.3.1. Determinación del porcentaje de humedad	67
4.3.2. Determinación de la densidad de riego	68
4.3.3. Determinación del área de la columna	68
4.3.4. Determinación del volumen de riego	68
4.3.5. Determinación de la cantidad de NaCN a añadir.....	68
4.3.6. Determinación del porcentaje de compactación	68
4.3.7. Determinar flujo de riego.....	69

4.3.8. Determinar gramos de kollasol STG LF a añadir.....	69
4.4. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNA.....	69
4.5. DISCUSIÓN.....	75
4.6. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
ANEXOS	89
ANEXO 1.....	90
ANEXO 2.....	91
Tabla 3.....	98
<i>Evaluación cinética de extracción de oro con surfactante Kollasol STG LF</i>	98
Anexo 3	99
Anexo 4	100
Anexo 5	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de compuestos de cianuros simples	27
Tabla 2 Operacionalización de variables.	41
Tabla 3 Tipos de alteraciones.....	47
Tabla 4 Datos del análisis granulométrico para la malla valorada	48
Tabla 5 Comparación de las pruebas con kollasol y estándar	70
Tabla 6 Comparación de resultados de la prueba con kollasol y sin kollasol.	70
Tabla 7 Data de la prueba de lixiviación estándar en columna	91
Tabla 8 Data de la prueba de lixiviación en columna aplicando el tensoactivo Kollasol STG LF.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Propiedades fisicoquímicas de los tensoactivos.....	13
Figura 2 Esquema de una pila de lixiviación	18
Figura 3 Representación esquemática del comportamiento del flujo de fluidos entre y dentro de las partículas.....	19
Figura 4 Efecto de la temperatura y presión.....	28
Figura 5 Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata	29
Figura 6 Humectación de superficies sólidas	33
Figura 7 Acción de un tensioactivo en una columna de mineral	34
Figura 8 Muestreo de mineral sílice granular	45
Figura 9 Muestreo en calicatas	46
Figura 10 Curva GGS de la muestra experimental.....	49
Figura 11 Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada....	50
Figura 12 Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada....	50
Figura 13 Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada....	51
Figura 14 Homogenizado del mineral con cal.	52
Figura 15 Llenado y carguío del mineral en sacos.	53
Figura 16 Circuito de bombeo de la solución lixivante.....	53
Figura 17 Primera solución lixiviada.....	54
Figura 18 Mineral descargado de la columna, después de la lixiviación.....	56
Figura 19 Pesado del kollasol STG LF	57
Figura 20 Prueba de lixiviación en columna.	57

Figura 21 Tensiómetro.....	58
Figura 22 Muestras tomadas de la solución lixiviada	59
Figura 23 Medición de la fuerza cianuro	59
Figura 24 Drenaje de la solución.....	60
Figura 25 Comportamiento de la tensión superficial empleando kollasol.....	65
Figura 26 Extracción de Au en relación al tiempo	71
Figura 27 Porcentaje de extracción en relación con la ratio de lixiviación	72
Figura 28 Porcentaje de extracción en relación con el ratio de NaCN.....	73
Figura29 Comparación del análisis de ley de cabeza y ripio de la malla valorada para la prueba estándar.....	74
Figura 30 Análisis de ley de cabeza y ripio por malla valorada con Kollasol STG LF.....	75
Figura31 Esquema de aplicación de pruebas para escalamiento.....	76
Figura32 Relación entre los valores experimentales y los predichos de extracción de oro.	77
Figura 33 Modelo del proceso cinético con el uso de kollasol.	78
Figura 34 Recuperación acumulada vs días de lixiviación con Kollasol STG.	79
Figura 35 Diagrama de flujo de los procesos que se realiza en la U.M Pucamarca.	90
Figura 36 Hoja de datos de seguridad de la cal hidratada.....	99
Figura 37 Hoja de datos de seguridad del cianuro de sodio.....	100
Figura 38 Hoja de datos de seguridad del Kollasol STG-LF.....	101

RESUMEN

El objetivo del presente estudio es mejorar la percolabilidad (permeabilidad) del lixiviante con el uso del Kollasol STG LF para la mejora de extracción de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR, de utilidad para procesar mineral de sílice granular alterada. Se desarrolló una investigación de enfoque cuantitativo, aplicada y transversal de diseño explicativa experimental para muestras obtenidas por cuarteo sucesivo de 100 kg. Para medir su efectividad se consideró el consumo de surfactante, el consumo de cianuro y el porcentaje de extracción de oro. Las pruebas se realizaron haciendo un comparativo entre las pruebas en columna estándar y pruebas en columna con el tensioactivo kollasol STG LF. Los resultados de las pruebas del laboratorio realizado en columnas, muestran que con la adición de 32 ppm del tensioactivo Kollasol STG LF alcanza un incremento de 7,80 % de extracción de oro mayor a la prueba convencional, concluyéndose que el uso del KOLLASOL TG LF se logra incrementar la extracción de oro y reducir el tiempo de lixiviación al incrementar la cinética de lixiviación realizada a nivel de Laboratorio Metalúrgico.

Palabras clave: Cianuración, lixiviación en columna, tensioactivo, tensión superficial.

ABSTRACT

The objective of this study is to improve the percolability (permeability) of the lixiviant with the use of Kollasol STG LF for the improvement of gold extraction in the Pucamarca-MINSUR mining unit, useful for processing altered granular silica ore. A quantitative, applied and transversal research of experimental explanatory design was developed for samples obtained by successive quartering of 100 kg. To measure its effectiveness, surfactant consumption, cyanide consumption and gold extraction percentage were considered. The tests were carried out making a comparison between standard column tests and column tests with Kollasol STG LF surfactant. The results of the laboratory tests carried out in columns show that with the addition of 32 ppm of Kollasol STG LF surfactant, an increase of 7,80 % of gold extraction was achieved, higher than in the conventional test, concluding that the use of KOLLASOL TG LF increases the gold extraction and reduces the leaching time by increasing the leaching kinetics at the Metallurgical Laboratory level.

Keywords: Cyanidation, column leaching, surfactant, surface tension.

INTRODUCCIÓN

La lixiviación en pila es un proceso de recuperación hidrometalúrgica de metales preciosos, como el cobre, el oro, el zinc, el uranio, etc. en el que el mineral roto de características apropiadas se apila sobre un revestimiento de ingeniería, y luego la superficie de la pila se riega con un lixivante como el cianuro de sodio disuelto en agua. La solución de lixiviación viaja a través del mineral en condiciones de flujo de fluido no saturado, contactando y lixivando el metal o mineral de interés.

El comportamiento adverso del flujo dentro de la pila es a menudo responsable de la baja eficacia de la lixiviación. Los sistemas de riego, las tasas de aplicación, la migración de finos, los materiales heterogéneos y la compactación pueden contribuir a crear condiciones de insaturación complejas. Las variaciones estacionales, como las precipitaciones y las altas y bajas temperaturas, también pueden influir en el comportamiento del flujo. Los eventos de lluvia significativos pueden conducir a regiones saturadas dentro de la pila, a la dilución del reactivo y a vías preferenciales que arrastran la solución de lixiviación, evitando cualquier reacción con el cuerpo mineral. Kunkel (2008) afirma que la recuperación del metal del mineral está más influenciada por las características del flujo del lixivante

que por el material; a su vez, las características del flujo no saturado en las pilas están más influenciadas por el material que por los fluidos.

En ese sentido, se presenta un trabajo de investigación que resuelva este problema, con el uso de tensioactivos como el Kollasol STG LF que cubre una serie de propiedades, como la ionicidad, la solubilidad en agua, los efectos de emulsión, el peso molecular y la no formación de espuma.

En el capítulo 1 se presenta la descripción del problema que se debe mejorar, planteando objetivo e hipótesis.

En el capítulo 2 se presenta lo referente al marco teórico del proceso de lixiviación, las variables que intervienen en la cianuración y a las propiedades y mecanismos del tensioactivo Kollasol STG LF.

En el capítulo 3 se trata sobre los procedimientos y técnicas empleadas para poder desarrollar nuestras pruebas de lixiviación con la adición del tensoactivo.

En el capítulo 4 se detallan los trabajos realizados para la mejora de recuperación de oro, mejora de la cinética de lixiviación, menor consumo de cianuro, mostrando los resultados favorables obtenidos en las pruebas.

Finalmente, se anotan las conclusiones, las recomendaciones, bibliografía y anexos.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Al desarrollar las pruebas en el laboratorio metalúrgico de la Unidad Minera Pucamarca-Minsur se pudo observar que el mineral presenta una baja percolabilidad, generando una deficiencia en el proceso de lixiviación, esto genera que haya menor porcentaje de recuperación de oro, menor grado de humectación del mineral, cinética de lixiviación lenta provocando así mayor consumo de reactivos, por lo cual, se propuso emplear un tensoactivo llamado Kollasol STG LF con la principal función de bajar la tensión superficial de la solución lixivante provocando una humectación completa del mineral dando paso a una mejor percolabilidad, mejorando así la cinética de lixiviación y a su vez acortar el tiempo de lixiviación y como principal objetivo obtener un mayor porcentaje de recuperación de oro en lixiviación.

1.1.1. Antecedentes del problema

La Unidad Minera Pucamarca es una mina de oro explotada a tajo abierto, se encuentra ubicado en el distrito de Palca, a 52 kilómetros de la

ciudad de Tacna, a más de 4 500 msnm. La empresa EMC2 CONSULTING S.A.C, brinda servicio Integral de Pruebas Metalúrgicas a la empresa MINSUR S.A, para que esta se encargue bajo entera responsabilidad de tercerización del “Servicio integral para la ejecución de las pruebas metalúrgicas que se desarrollará desde la preparación de muestras hasta la obtención de los resultados, incluyendo un sistema de calidad y programas de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos.

En la actualidad, existen distintos métodos para aumentar el porcentaje de recuperación en distintos procesos metalúrgicos, pero, varios, se realizan a altos costos operacionales o traen como consecuencia un deterioro ambiental y también económico. Diversos estudios indican que para realizar un proceso de lixiviación aurífera empleando una solución lixivante preparada con NaCN, es necesario, que se encuentre en un intervalo de pH de 10,5 a 12, es decir, una solución alcalina y no ácida o neutra, con la finalidad de prevenir la formación y emanación de HCN que es letal para el ser humano, al mismo tiempo, que causa un impacto ambiental severo, por eso, es necesario que la solución sea preparada dentro de ese rango, ya que si se trabaja a pH superior a 12 puede causar una sobresaturación, afectar a la cinética de reacción y un gasto innecesario de cal o NaOH.

Otra variable muy importante es la tensión superficial de la solución lixivante, esta tensión es alta oscilando entre 70 y 76 mN/m a temperatura ambiente, esto ocasiona que el porcentaje de recuperación sea bajo, ya que, reduce el contacto de la solución lixivante con las partículas del mineral provocando una menor disolución. Para mejorar el proceso, se propone el uso del tensoactivo Kollasol STG LF con el propósito de reducir su tensión superficial hasta 36 mN/m aproximadamente, brindándole así un poder humectante y reduciendo el consumo de NaCN.

Existen pruebas realizadas con un surfactante denominado Lupromin-110 con dosis de 5 ppm, con el cual, la recuperación mejoró en un promedio entre 5 a 8 % y disminuyó su tensión superficial; pero, el descenso no fue significativo, ya que, lo ideal fue llegar hasta 36 mN/m, realizaron pruebas incrementando la concentración hasta 45 ppm, pero, el descenso de la tensión superficial fue de 52-53 mN/m.

Según Sanchez (2014) el incremento de dosis a más de 40 ppm causa serios inconvenientes durante la precipitación Merrill-Crowe, principalmente en la formación de espumas, donde el flujo de la solución es turbulenta, abundante y consistente, esto dificulta realizar un buen vacío en la torre de vacío de la Merrill Crowe. El otro problema que causa es que durante la descarga o cosecha de los precipitados de la planta Merrill-

Crowe, dicho precipitado valioso se mantiene en suspensión y no ocurre la sedimentación ni con el agregado del floculante de rutina (magnafloc 351), esto ocurre a partir de una dosificación de 40 ppm y con una tensión superficial de 53 mN/m.

Por lo tanto, se propone el uso de otro tensoactivo denominado Kollasol STG LF, según nuestra hipótesis, le dará mayor poder humectante y que empleado en menor concentración se alcance la tensión superficial requerida sustituyendo así, a distintos métodos, que generan altos costos y desventajas. Se busca aumentar la hidrofiliidad de las superficies de las partículas, reducir la tensión superficial, disminuir el consumo de cianuro y reducir el tiempo de lixiviación obteniendo así un mayor rendimiento de extracción.

1.2. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN

Existen variables muy importantes que intervienen en la cinética de disolución del oro como es la concentración de cianuro, pH, concentración de oxígeno, área superficial liberada del oro, temperatura, etc. Pero una de las variables importantes que nos llevó a realizar esta investigación fue la tensión superficial que es alta, debido a las fuerzas de cohesión entre moléculas, oscilando entre 70 a 76 mN/m a temperaturas de 18 a 20 °C, por lo cual, el grado de percolación es bajo y el porcentaje de extracción es

menor.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo es la percolabilidad del lixiviante con el uso del Kollasol STG LF para la mejora de la extracción de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR?

1.3.1. Formulación de los problemas secundarios

- ¿Cuál es la efectividad del Kollasol STG LF en la mejora de la extracción de oro por cianuración directa a nivel de laboratorio?
- ¿Cómo es la disminución de la tensión superficial empleando el Kollasol STG LF para mejorar la humectación y percolabilidad en la columna de lixiviación?
- ¿Cómo es la cinética de extracción de oro por cianuración?

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

1.4.1. Justificación académica

Los motivos que nos llevaron a investigar los efectos del uso del tensoactivo Kollasol STG LF en las pruebas de cianuración en columnas, es poder aportar a las investigaciones ya realizadas, la opción de poder añadir un factor (tensoactivo) más a las pruebas generando mayor

recuperación del oro, acortando el tiempo de lixiviación y disminuyendo la contaminación ambiental.

1.4.2. Justificación técnica

La presente investigación se enfocará en disminuir la tensión superficial de la solución lixivante añadiendo el tensoactivo Kollasol STG LF; ya que lo que quiere es mejorar la cinética de disolución del oro, disminuir el consumo de cianuro, mejorar la percolabilidad del mineral y obtener un mayor porcentaje de extracción de oro.

1.4.3. Justificación económica

Mediante el análisis detallado de las pruebas en columnas de cianuración con el tensoactivo Kollasol STG LF, nos permitirá generar mayor ganancia económica en la Unidad minera Pucamarca, por ende, también a los trabajadores y un mayor movimiento económico en la región; ya que se acorta el tiempo de lixiviación de las columnas, permitiendo finalmente una más rápida y mayor recuperación de oro en las etapas de la planta ADR y la electrodeposición.

1.4.4. Importancia

El presente proyecto de investigación experimental realizado en la Unidad Minera Pucamarca – MINSUR está diseñado para alcanzar mayor

porcentaje de recuperación de oro empleando como aditivo surfactante Kollasol, con el que se estima elevar de 7 a 10 % más la recuperación, de ahí que, esta investigación es muy favorable por implementar una mejora en el actual proceso de cianuración del mineral con oro de tipo refractario perteneciente a un yacimiento epitermal de alta sulfuración.

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

Esta investigación se realizó a nivel laboratorio dándole un alcance de mejoramiento del grado de percolación y el porcentaje de recuperación con la finalidad de aplicar esta mejora a nivel industrial. Esta investigación no presentó ninguna limitación ya que la empresa cubre los gastos económicos y dispone los equipos necesarios para que esta investigación haya alcanzado los objetivos presentados.

1.6. OBJETIVOS

1.6.1. Objetivo general

- Mejorar la percolabilidad del lixivante con el uso del Kollasol STG LF para la mejora de extracción de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR.

1.6.2. Objetivos específicos

- Determinar la efectividad del Kollasol STG LF en la mejora de la extracción de oro por cianuración directa a nivel de laboratorio.
- Evaluar la disminución de la tensión superficial empleando el Kollasol STG LF que mejora la humectación y percolabilidad en la columna de lixiviación.
- Verificar la mejora de la cinética de extracción de oro.

1.7. HIPÓTESIS

1.7.1. Hipótesis general

La percolabilidad del lixiviante con el uso del Kollasol STG LF influye significativamente en la mejora de extracción de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR.

1.7.2. Hipótesis específicas

- La efectividad del Kollasol STG LF es significativa en la mejora de la extracción de oro por cianuración directa a nivel de laboratorio.
- La disminución de la tensión superficial empleando el Kollasol STG LF influye significativamente en la mejora de la humectación y percolabilidad en la columna de lixiviación.

- La cinética de reacción mejora significativamente en la extracción de oro.

1.8. VARIABLES

1.8.1. Caracterización de las variables

- **Variable independiente:**

- Percolabilidad del lixiviante

Definición conceptual

- Mejora de la percolabilidad y mojabilidad del mineral.

Definición operacional

- Se utiliza la mejora para poder obtener una mayor extracción de oro.

- **Variable dependiente:**

- Extracción de oro

Definición conceptual

- Se eleva el porcentaje de disolución de oro.

Definición operacional

- Se utiliza para generar mayor beneficio y ganancia económica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

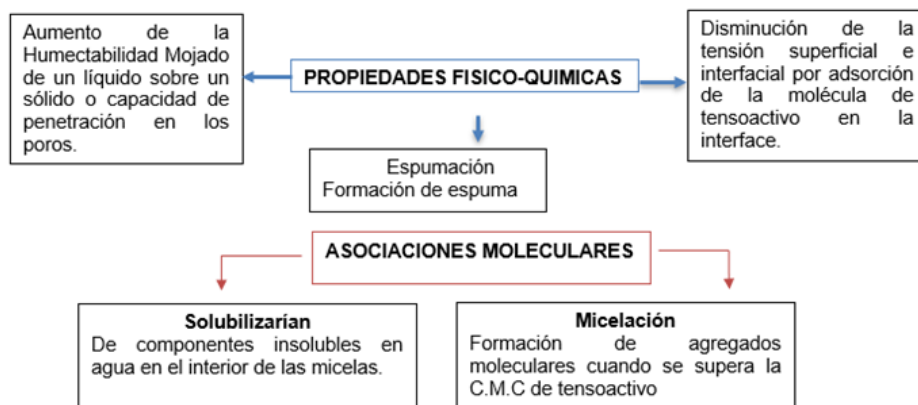
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1. Nivel internacional

Lechuga (2005) en su estudio titulado “Biodegradación y Toxicidad de Tensioactivos Comerciales” menciona que los tensioactivos son compuestos anfifílicos (en su estructura molecular poseen un grupo afín al disolvente y otro no), pero no todos los compuestos anfifílicos se pueden considerar tensioactivos, así, el alcohol etílico es un compuesto anfifílico, pero no es un tensioactivo. Para que un compuesto anfifílico pueda ser considerado tensioactivo, es necesario, que posea una longitud de cadena hidrófoba de ocho o más átomos de carbono (hidrofobicidad mínima) y que presente una polaridad mínima (relación hidrofílica/hidrofóbica adecuada) dependiendo de las características del grupo o grupos polares presentes. Por otro lado, estos compuestos anfifílicos deben presentar la posibilidad de formar agregados micelares para ser considerados compuestos tensioactivos. Las propiedades fisicoquímicas de las disoluciones de tensioactivos y las propiedades relacionadas con los fenómenos de asociaciones moleculares se muestran en la figura 1.

Figura 1

Propiedades fisicoquímicas de los Tensoactivos



Nota: La figura muestra las propiedades químicas y asociaciones moleculares que presentan los tensoactivos, 2021.

Velasquez (2016) en su trabajo titulado “Comparación teórica del uso de un compuesto activo en un detergente líquido lavavajillas de alta biodegradabilidad y baja toxicidad a partir de tensoactivos aniónicos y no iónicos” menciona que los tensoactivos tienen diversidad de propiedades, pero son fundamentalmente dos: su capacidad de adsorberse (alteración de la tensión superficial, aumento de la humectabilidad y espumación) y su tendencia a asociarse para formar estructuras llamadas micelas (micelación y procesos de solubilización) dejando en claro que existen interrelaciones entre propiedades que favorecen o desfavorecen una u otra propiedad. Cuando una molécula de tensoactivo se coloca en una interface agua/aire o agua/aceite, ella puede orientarse de manera que el grupo polar esté en el agua, mientras el grupo apolar se ubica fuera del agua, en el aire

o en el aceite. Cuando una molécula de tensoactivo se ubica de forma orientada en una interfase o una superficie, se dice que se adsorbe. La adsorción de un tensoactivo en una superficie produce en general una reducción de tensión superficial o interfacial, pero, también interviene en los procesos de humectabilidad y espumación. En cuanto a la propiedad de autoasociarse puede decirse que las primeras moléculas de tensioactivos presentes en una solución tienen una fuerte tendencia a emigrar hacia una interface y adsorberse en ella. La fuerza motriz de tal adsorción es el efecto hidrofóbico, a saber, la sustracción de la cola apolar del medio acuoso y la formación de un contacto más favorable con las partes apolares de otras moléculas del tensoactivo.

2.1.2. Nivel nacional

Existen otros estudios realizados comparando la efectividad entre surfactantes como el Lupromin – 110, Kollasol STG- 39 y Kollasol STG- 46.

Según Alonso (2014) usando un surfactante conocido como Lupromin-110, con el cual, la recuperación mejoró en un promedio entre 5 a 8 %, los estudios previos en laboratorio revelan que este surfactante con una dosis máxima de 45 ppm se puede llegar fácilmente a una tensión superficial de 36 mN/m, que son las condiciones ideales, en el cual, según nuestra hipótesis mejora la recuperación del oro en el proceso Heap

Leaching, si bien es cierto, que baja el valor de la tensión superficial rápidamente, pero, genera espumas que son muy consistentes y demoran más de 80 minutos para desaparecer, además se necesita una concentración de hasta 20 ppm para llegar a la tensión ideal de 36 mN/m que es el objetivo principal. Con el Kollasol STG-39, la tensión superficial baja moderadamente, pero alcanza los valores ideales de 36 mN/m a 20 ppm, las espumas que se forman son muy similares a la del Lupromin-110, pero, no tienen la consistencia, desaparece en menor tiempo y tiene un mejor comportamiento fisicoquímico para su aplicación a nivel industrial. Con el Kollasol STG-46, la tensión superficial baja en forma moderada y el valor ideal se alcanza a una concentración mayor a 20 ppm, y además se nota en este reactivo que la tensión superficial sube ligeramente a medida que la solución va entrando en reposo largo. Las espumas tardan en desaparecer en un tiempo mayor en comparación con el Kollasol STG-39.

Respecto a la aplicación a nivel industrial, Alonso (2014) manifiesta que inicialmente el surfactante se dosificó un poco más de lo que dicen las pruebas, es decir que, inició con 40 ppm en solución de lixiviación hasta llegar a la tensión ideal para luego ir bajando progresivamente la dosificación hasta los niveles de 20 ppm, como indica las pruebas de laboratorio. Se observó que, sí se logra bajar la tensión por primera vez a niveles de 36 mN/m en contraste con el Lupromin-110, que no alcanzó el

objetivo a pesar de dosificaciones mayores a 40 ppm (p. 96).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Lixiviación

La lixiviación es un proceso ampliamente utilizado en la metalurgia extractiva, donde el mineral es tratado con reactivos químicos para disolver los metales valiosos que contiene en compuestos solubles mientras las impurezas permanecen insolubles. Como preparación para la lixiviación, el mineral suele reducirse a un tamaño pequeño mediante la trituración y la molienda para conseguir una finura adecuada. Esto aumenta la superficie de las partículas y, por tanto, la velocidad de reacción. En algunos casos, puede ser necesario un proceso preliminar. Hay cuatro tipos de lixiviación: a) Lixiviación con cianuro (por ejemplo, mineral con oro), b) Lixiviación con amoníaco (por ejemplo, mineral cobre), c) Lixiviación alcalina (por ejemplo, mineral de bauxita), d) Lixiviación ácida (por ejemplo, mineral de sulfuro). La elección de un agente de lixiviación depende de los siguientes factores: i) Características químicas y físicas de la mena a lixiviar, ii) Coste del reactivo, iii) Acción corrosiva del reactivo y los materiales de construcción necesarios, iv) Selectividad del agente de lixiviación para el constituyente deseado a lixiviar, v) Capacidad de regeneración (Suman et al., 2019).

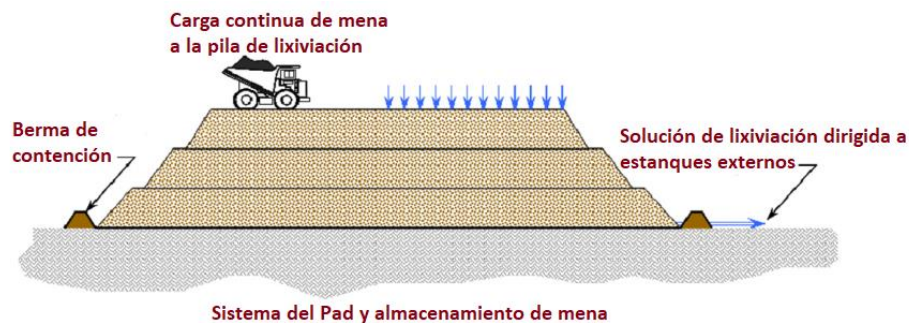
2.2.2. Lixiviación en pilas

La lixiviación en pilas (heap leaching) se utiliza como parte del proceso minero en la recuperación de oro, cobre, plata, uranio, níquel y otros metales a partir de la mena extraída. Una plataforma de lixiviación (pad) consiste en una instalación revestida (material granulado y geomembranas) en la que se deposita el mineral, utilizando métodos de transporte por camión o por faja transportadora. A continuación, se aplica la solución lixivante al mineral a una tasa controlada, disolviendo el contenido metálico contenido en la mena. La solución de lixiviación varía según el tipo de mineral que se vaya a procesar, y puede consistir en un ácido fuerte (normalmente, ácido sulfúrico para minerales de cobre o níquel) o una solución de cianuro diluida (para minerales que contienen oro y plata). La selección de la solución de lixiviación y la tasa de aplicación se determina mediante pruebas metalúrgicas detalladas. En la base de la pila de mineral, el lixiviado se recolecta mediante un sistema de recolección del PLS. El sistema de recolección de la solución suele consistir en una serie de geotubos incrustados adecuadamente en una capa de drenaje. Las soluciones de lixiviación se dirigen finalmente a una planta de procesamiento para su procesamiento. En el campo del diseño de las pilas de lixiviación, existen diferentes tipos de pilas, cada una de ellas con diferentes requisitos del sistema de revestimiento (Lupo, 2009, p. 164),

figura 2. En el caso de mina Pucamarca, corresponde al diseño de lixiviación en valle (heap valley).

Figura 2

Esquema de una pila de lixiviación



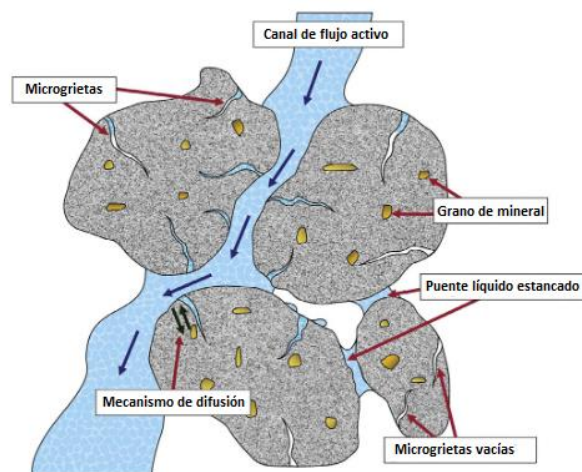
Nota: Esquema de una pila de lixiviación adaptada de Liner system design for heap leach pads, Lupo, 2009.

En efecto, en la práctica, el proceso de lixiviación en pila depende de la transferencia efectiva de masa entre las dos fases principales, a saber, la sólida y la fluida. Una pila típica se compone de mineral triturado de la mina (es decir, después de la trituración primaria y secundaria y, por lo general, por debajo de 25 mm) apilado aleatoriamente en una pila, normalmente mediante camiones volquetes o cintas transportadoras. La operación de lixiviación en pila comienza con la adición de líquido desde la superficie superior de la pila mediante emisores de goteo o sistemas de aspersión. El líquido gotea y se dispersa a través de la matriz del mineral (figura 3), como resultado tanto de la gravedad como de las fuerzas

capilares y el flujo de fluido retrata un comportamiento de flujo no saturado.

Figura 3

Representación esquemática del comportamiento del flujo de fluidos entre y dentro de las partículas



Nota: Adaptado de Ashane et al. (2019), <https://doi.org/10.1016/j.hydrmet.2019.05.010>

El comportamiento del flujo suele estar dictado por el número de Bond (Bo), que es la relación entre la gravedad y las fuerzas capilares ($Bo = \rho g L^2 / \gamma$ donde L es la escala de longitud de las partículas, γ es la tensión superficial, ρ es la densidad del líquido y g es la aceleración debida a la gravedad). La distribución del líquido en las pilas es uno de los parámetros cruciales que determina tanto el transporte de reactivos como de especies disueltas. Se espera que una distribución uniforme del líquido entre las partículas dé lugar a una recuperación óptima en los sistemas industriales de lixiviación en pilas. Sin embargo, se suele encontrar un flujo preferencial

o una canalización del líquido que reduce la eficiencia de la extracción de metales. Aunque el efecto de canalización fue reportado en varios estudios, la escasez de estudios relacionados con la mejora de la distribución del líquido dentro de las pilas todavía plantea un reto importante para mejorar el rendimiento de los metales de la lixiviación en pilas. Además, las pilas están formadas por partículas opacas, lo que dificulta la visualización del desarrollo del flujo (Ashane, 2019, p.149).

2.2.3. Condiciones necesarias para la lixiviación

Según (Codelco, 2019) para que la lixiviación tenga éxito se tienen que cumplir varios requerimientos, siendo el primero asegurar la permeabilidad de la masa a lixiviar, de manera que el líquido lixivante pase a través de todo el material y que el contacto entre el agente lixivante y el mineral sea el óptimo, para la lixiviación en pilas se requiere de ciertos elementos, condiciones y consideraciones tales como:

- Disponer de amplias superficies de terreno, relativamente llanas, con menos de 10 % de pendiente.
- Calcular los flujos de aporte y evaporación para mantener un balance equilibrado de líquidos efluentes.
- Disponer de represas de líquidos intermedios y finales.
- Considerar un margen de sobrecapacidad del sistema para absorber

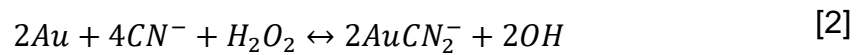
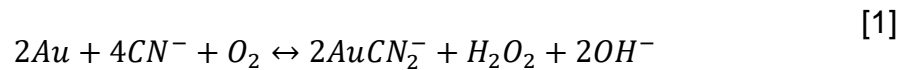
situaciones de exceso por tormentas lluvias en el área en explotación o explotada.

- Capacidad y flexibilidad para admitir grandes variaciones de leyes de mineral y tiempos de lixiviación.
- Utilizar láminas impermeables sencillas para evitar pérdidas por infiltración y la contaminación del subsuelo.
- Realizar un estudio geo-mecánico del material depositado para alcanzar la máxima altura posible y evitar el derrumbe de la pila.
- Preparar el material para llevarlo al tamaño adecuado, de manera de lograr una permeabilidad mínima suficiente, que libere el mineral en la superficie y percole adecuadamente.
- Organizar un conjunto de pilas de manera de ordenar el flujo de líquidos en forma seriada para lograr un enriquecimiento progresivo de la solución al pasar de una pila a otra.

2.2.4. Uso del cianuro en la producción de oro

La cianuración se utiliza desde hace más de 100 años para extraer metales preciosos de minerales sulfurosos y óxidos. A pesar, de este hecho, las reacciones implicadas no se comprenden del todo. Se recupera más oro por cianuración que por cualquier otro proceso. En la cianuración, el oro metálico se oxida y se disuelve en una solución alcalina de cianuro (Ekrem et al., 1998). El oxidante empleado es el oxígeno atmosférico que,

en presencia de una solución acuosa de cianuro de sodio, provoca la disolución del oro y la formación de cianuro de oro e hidróxido de sodio, según la llamada reacción de Elsner (Marsden y House, 2009).



La concentración de cianuro determina la velocidad de disolución anódica del oro, mientras que la velocidad de reducción del oxígeno depende de la concentración de oxígeno disuelto. En el proceso de cianuración, los iones de cianuro libres en la solución sólo pueden proporcionarse a un pH > 9,3. El pH de la pulpa puede aumentarse con las adiciones de hidróxidos alcalinos (NaOH, KOH, Ca (OH)₂, etc.), conocidos como álcalis proactivos. Además, los detalles de esta reacción electroquímica han recibido una atención considerable, y bajo ciertas circunstancias, la reacción está limitada por la difusión acoplada de CN⁻ y O₂ a la superficie del grano de oro. Por lo tanto, la velocidad inicial de disolución del oro está controlada en gran medida por factores como el cianuro, la concentración de oxígeno, el pH, la interfaz sólido-líquido, el Eh de la pulpa, los álcalis, el tamaño de las partículas y la temperatura (Ekrem et al., 1998). Las operaciones de minería del oro utilizan soluciones muy diluidas de cianuro de sodio (NaCN), generalmente entre 0,01 % y 0,05 %

de cianuro (100 a 500 ppm). La solución resultante que contiene oro se denomina “solución cargada” o PLS (Escalante, 2016).

2.2.5. Cinética de la cianuración del oro

La disolución del oro por cianuración, es un proceso de corrosión electroquímico con reacción heterogénea, ocurrido en la interface del área anódica y catódica. La corriente anódica está limitada por la difusión del CN^- a la superficie, mientras que la corriente catódica está limitada por la velocidad de la difusión del oxígeno. Donde la velocidad de difusión del oxígeno y el ion cianuro es directamente proporcional a la concentración de ellos en la solución y al aumento en la agitación para un estado estacionario, es decir la velocidad de disolución del oro es directamente proporcional a la corriente de corrosión o densidad de corriente (Martínez, 2005). Se puede observar que las reacciones de extracción de oro más importantes tienen energías de activación dentro del rango que indica el control del transporte de masa. La expresión general utilizada para describir la cinética de una reacción es (Marsden y Ian, 2009 p. 133):

$$\frac{dC}{dt} = K_m C^n \quad [3]$$

Donde

C = La concentración de las especies que reaccionan

t = El tiempo

k_m = Una constante de velocidad

n = El orden de reacción.

Esta expresión puede integrarse para producir una ecuación que muestre cómo cambia la concentración con el tiempo para una constante de velocidad y un orden de reacción dados. Si la reacción es de primer orden ($n = 1$), entonces la concentración después de un cierto tiempo, t , viene dada por C_t , definida como sigue:

$$C_t = C_o e^{-kt} \quad [4]$$

C_o = la concentración inicial de la especie en estudio.

2.2.6. Variables que intervienen en la cianuración

Según Martínez (2005) existen 6 variables muy importantes que influyen directamente en la cinética de la cianuración:

a. Tamaño de la partícula: El tamaño de partícula juega un papel importante, debido a que los estudios definieron que esta era una de las causas para la acumulación de inventario de oro en las pilas, al no ingresar la solución con cianuro al interior del mineral, después se definió que el tamaño máximo y óptimo del mineral debe ser de 12 pulgadas.

b. Concentración de cianuro: Lo más importante es la cantidad de

cianuro por tonelada de mineral que ingresa a la pila y su concentración en la solución lixivante; ya que, el cianuro disuelve al oro selectivamente a menores concentraciones. A mayor concentración de cianuro tendremos más metales disueltos.

- c. Tasa de riego:** Esta variable influye directamente en la cinética de lixiviación del mineral, al incrementarse la tasa de riego la velocidad de disolución del oro es mayor, debido al ingreso de mayor cantidad de cianuro al mineral, sin embargo, el contenido de oro en la solución es menor debido al efecto de dilución. Ocurre lo contrario a reducir la tasa de riego, la velocidad de disolución es menor debido al menor ingreso de cianuro al mineral. Sin embargo, la recuperación final en ambos casos es la misma.
- d. pH:** Es otra de las variables importantes, sobre todo para no perder cianuro como gas cianhídrico y retardar la cinética de lixiviación. El pH oscila entre 9,5 a 10,5.
- e. Cantidad de oxígeno disuelto:** La cantidad de oxígeno disuelto en la solución lixivante depende del medio ambiente, es muy difícil, atribuir que el oxígeno tenga una gran influencia en la cinética de lixiviación y recuperación de oro en minerales con baja ley.
- f. Metales en el mineral:** Los principales metales que son disueltos por el cianuro son cobre, plata, mercurio y otros, de los cuales el cobre y

mercurio no proporcionan ningún beneficio económico por el contrario reduce la velocidad de disolución del oro y a la misma vez generan alto consumo de cianuro debido a su función cianicidas.

Otras variables muy importantes que influyen en el proceso de la lixiviación aurífera son:

- a. Tensión superficial:** Es necesario mantener una tensión superficial óptima, puesto que, al tener una tensión superficial alta dificulta a la percolación y entonces la recuperación es menor, por ello es menester, mantener una tensión superficial baja para así poder extraer todo el oro y plata presente en el mineral.
- b. Área superficial:** La velocidad de disolución del oro será proporcional a la superficie expuesta, es decir, cuánto más grado de liberación tenga la partícula se incrementará la velocidad de disolución.
- c. Aglomeración:** Una buena aglomeración garantiza un buen coeficiente de permeabilidad de la solución y un alto porcentaje de recuperación.

2.2.7. Química de las soluciones de cianuración

Existen distintos tipos de sales de cianuros simples como cianuro de potasio y calcio, pero, el más usado en la industria de la minería es el cianuro de sodio debido a su efectividad, porcentaje de cianuro disponible que brinda tabla 1, bajos costos, disponibilidad. Este compuesto es biodegradable, es decir, fácil de degradar mediante un agente biológico sin generar un impacto ambiental.

Tabla 1

Propiedades de compuestos de cianuros simples

Compuesto	Cianuro disponible [%]	Solubilidad en agua a 25°C [g/100cc]
NaCN	53,1	48
KCN	40,0	50
Ca(CN) ₂	56,5	Se descompone

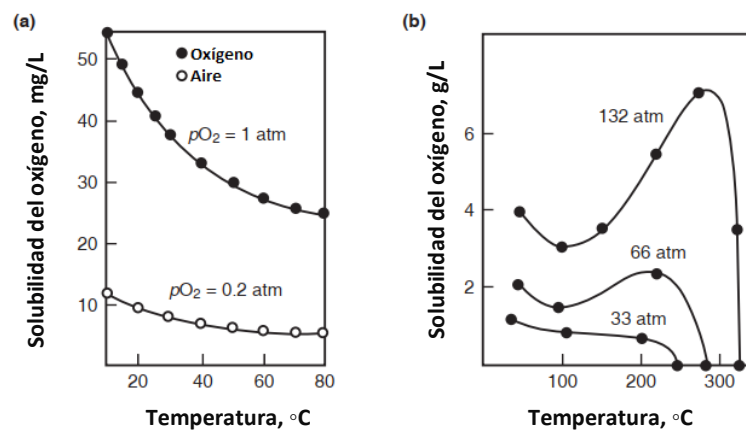
Nota: La tabla muestra las propiedades de tres compuestos que presenta el cianuro.

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar mediante la adición de una solución concentrada de cianuro o un compuesto sólido de cianuro. El control de la concentración de oxidante (es decir, el oxígeno disuelto) no es tan fácil debido a la baja solubilidad del oxígeno en el agua en condiciones atmosféricas. En consecuencia, la tasa máxima de disolución de oro para los procesos que utilizan aire para proporcionar oxígeno en la solución está determinada por las condiciones

de temperatura y presión bajo las que opera el proceso. A nivel del mar y a 25 °C, la concentración saturada de oxígeno disuelto en la solución es de 8,2 mg/L. Este valor disminuye al aumentar la altitud y la temperatura, como se muestra en la figura 4 (Marsden y. House, 2009).

Figura 4

Efecto de la temperatura y presión



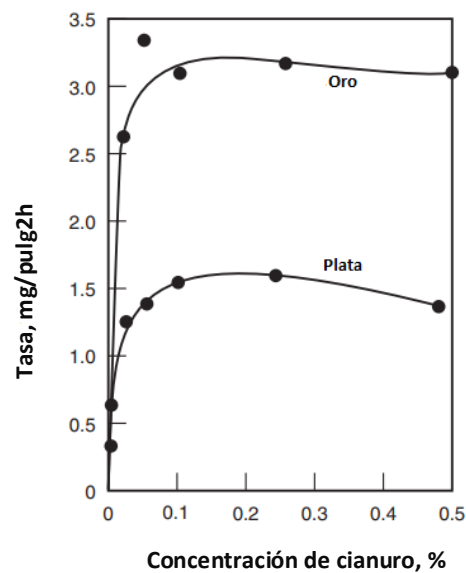
Nota: (a) Efecto de la temperatura y la composición del gas en la solubilidad del oxígeno en el agua (b) Efecto de la temperatura y la presión en la solubilidad del oxígeno puro en el agua.

La concentración de cianuro correspondiente que da la máxima tasa de disolución del oro a esta concentración de oxígeno es aproximadamente 0,005 %, o 0,002 M CN^- , equivalente a 0,01 % o 0,05 g/L de NaCN. Esto se apoya en observaciones prácticas, como se ilustra en la figura 5, donde se alcanza una tasa de disolución de oro cercana a la máxima (es decir, 3 mg/pulg²h) a 0,02 % o 0,10 g/L de NaCN. En los sistemas de lixiviación de minerales, se pueden requerir mayores niveles de cianuro debido a la

competencia de otras especies por el cianuro (Marsden y. Ian, 2009).

Figura 5

Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata



Nota: Efecto de la concentración de cianuro en la velocidad de disolución del oro y la plata en función de la tasa dada en mg/pulg²h.

En la práctica, las concentraciones de cianuro suelen mantenerse por encima de aquellas, en las que, se observa una disminución de la extracción, aunque la preocupación por el medio ambiente suele dictar que las concentraciones de cianuro se mantengan lo más bajas posible (Marsden y. Ian, 2009, p. 245).

2.2.8. Tensioactivo

En la búsqueda de la mejora de la lixiviación de oro en pila, Chun-

Ming (2019), manifiesta que un tensioactivo puede tanto disminuir la tensión superficial de un líquido como modificar su comportamiento de humectación. Cuando las moléculas de surfactante penetran en las fisuras de los poros, la adsorción se produce en la cara interior, demostrando una buena difusividad y penetrabilidad. La adición de un tensioactivo a la solución de lixiviación puede mejorar la permeabilidad del mineral, principalmente a través de los siguientes aspectos:

Cambio de mojabilidad: Cuando la solución lixivante fluye en la pila de mineral, el esparcimiento es la principal forma de contacto. La capacidad de dispersión del lixivante puede expresarse mediante el coeficiente de dispersión S , dado por:

$$S = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} - \sigma_{lg} \quad [5]$$

donde S es el coeficiente de dispersión y σ_{sl} , σ_{sg} y σ_{lg} son la tensión interfacial sólido-líquido, sólido-gas y gas-líquido por unidad de superficie. Un valor mayor de S significa que el PLS presenta una mayor capacidad de dispersión y una mejor capacidad de humectación en la superficie del mineral. La adición de tensioactivos al lixivante puede aumentar S mediante la disminución de la tensión superficial σ_{lg} , lo que mejora la capacidad de dispersión, la velocidad de flujo y la velocidad de penetración del lixivante.

Disminución de la viscosidad del PLS: Sobre la base del experimento de permeabilidad en arena por Darcy, la tasa de permeabilidad puede expresarse como

$$K = Cd^2 \frac{\rho_d}{\eta} \quad [6]$$

donde K es la permeabilidad; ρ_d es el peso unitario de la solución; η es la viscosidad dinámica de la solución; d es el tamaño de las partículas; y C es una constante que depende de la estructura de la pila, la porosidad, etc. Una vez construido el montón de mineral, C y d son valores fijos y K es inversamente proporcional a η . La viscosidad del lixivante disminuirá notablemente por el efecto de los tensioactivos utilizados en la industria química del petróleo (Guo, 2012). Por lo tanto, la adición de un tensioactivo a la solución lixivante disminuirá su viscosidad, aumentando así la permeabilidad de la pila de mineral.

Adsorción: Un tensioactivo o surfactante mejora la humectabilidad al adsorberse en las fisuras entre las partículas del mineral o en la superficie del mismo. La adsorción de tensioactivos puede promover la extensión de las fisuras, lo que se denomina "acción de cuña". Es beneficioso para que el lixiviado penetre en las fisuras del mineral. La adsorción de un tensioactivo iónico también puede cambiar las propiedades eléctricas de la superficie del mineral al atraer el H^+ del lixiviado. La repulsión se produce entre las partículas de mineral con el mismo carácter eléctrico, lo que

impide que el canal de permeabilidad sea bloqueado por las partículas finas que migran.

Mejora de la permeabilidad: El proceso de mojado en un medio poroso se denomina proceso de infiltración. La fuerza motriz en el proceso de infiltración es una presión adicional Δp generada por el menisco de la superficie del líquido. Además, cuanto mayor sea Δp , mejor será la permeabilidad. La Δp puede describirse como

$$\Delta P = \frac{2\sigma_{lg}\cos\theta}{r_f} = \frac{2(\sigma_{sg} - \sigma_{sl})}{r_f} \quad [7]$$

donde r_f es el radio de las fisuras del mineral y θ es el ángulo de contacto en la superficie del mineral.

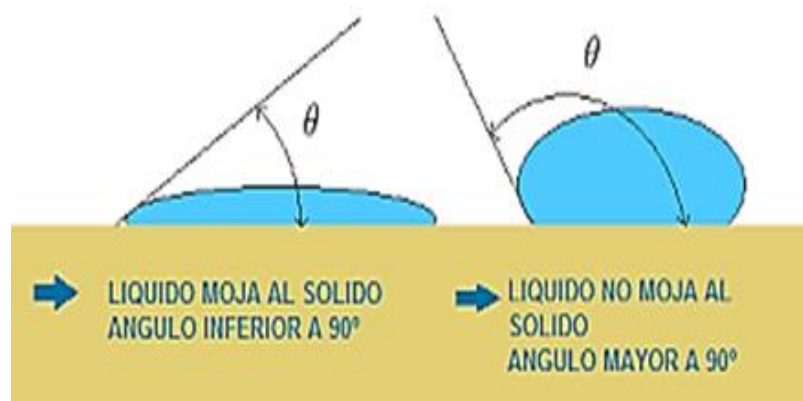
Según la ecuación (7), el valor de Δp depende de la tensión superficial sólido-gas σ_{sg} y de la tensión superficial sólido-líquido σ_{sl} . Sin embargo, σ_{sl} es difícil de medir directamente y la medición de σ_{sg} requiere la fusión de la muestra (Fu et al., 2010). La adsorción de tensioactivos no afectará a σ_{sg} , pero disminuirá σ_{sl} (Yang et al., 2007). Cuando la σ_{sg} se mantiene constante, la disminución de la σ_{sl} resultará en un aumento de la presión adicional Δp , que promueve la filtración de la solución de lixiviación en las partículas del mineral, figura 6.

Un tensioactivo puede tanto disminuir la tensión superficial de un líquido como modificar su comportamiento de humectación. Cuando las

moléculas de surfactante penetran en las fisuras de los poros, la adsorción se produce en la cara interior, demostrando una buena difusividad y penetrabilidad (Pablo, 2012).

Figura 6

Humectación de superficies sólidas

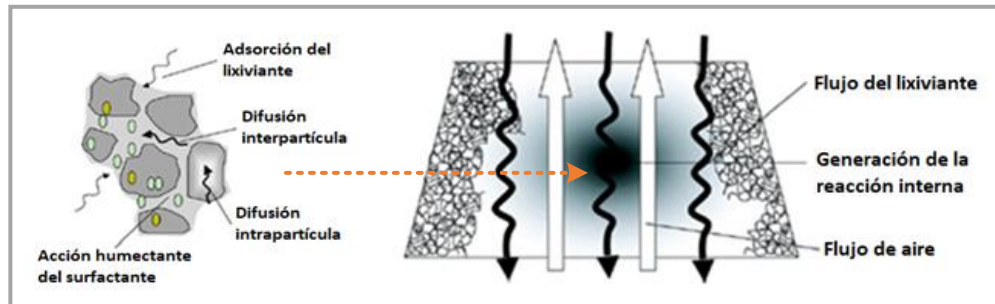


Nota: En la figura se muestra el mecanismo del mojado de un sólido, Pablo, 2012.

La adición de un tensioactivo a la solución de lixiviación puede mejorar la permeabilidad del mineral, principalmente a través de los aspectos de caracterización de los minerales que albergan al mineral o metal, el oro en este caso. Los surfactantes (tensioactivos) se han propuesto como una alternativa viable para mejorar la lixivabilidad de los minerales y mejorar la extracción de la pila en general. Se ha investigado el uso de surfactantes en sistemas de lixiviación en pila a escala de laboratorio, figura 7 (Ghorbani et al, 2011).

Figura 7

Acción de un tensioactivo en una columna de mineral



Nota: Adaptado de Large particle effects in chemical/biochemical heap leach processes. Ghorbani et al, 2011.

2.2.9. Mecanismos de acción de los tensioactivos

Se concluyó que los tensioactivos en la lixiviación aurífera cumplen 4 mecanismos muy importantes (Alonso, 2014, p. 47).

- **Acción tensioactiva:** Implica la disminución de las fuerzas de cohesión, así obtener mayor superficie libre de la solución, es decir, se disminuye la tensión superficial al disminuir el ángulo de contacto de adherencia.
- **Acción removedora:** Al brindarle un grado de mojabilidad las soluciones pueden fluir por los poros y microporos, venciendo el estado estático del fenómeno de capilaridad. Esto permite que las soluciones cianuradas re-oxigenadas tengan un mayor contacto con las partículas mineralógicas permitiendo una mayor reacción de oxidación-reducción del oro y la plata.

- **Acción humectante:** Al disminuir la tensión superficial de manera considerable, hace que el ángulo de contacto sea menor a 90° (entre 20 y 40°) produciéndose una mojabilidad total de la partícula del mineral e ingresando en todos los intersticios y microporos de la partícula del mineral oxidado.
- **Poder dispersante:** Es un buen agente dispersante que no permite que las partículas se compacten de manera natural a niveles que impidan el fluido de las soluciones.

2.2.10. Ensayos de biodegradabilidad

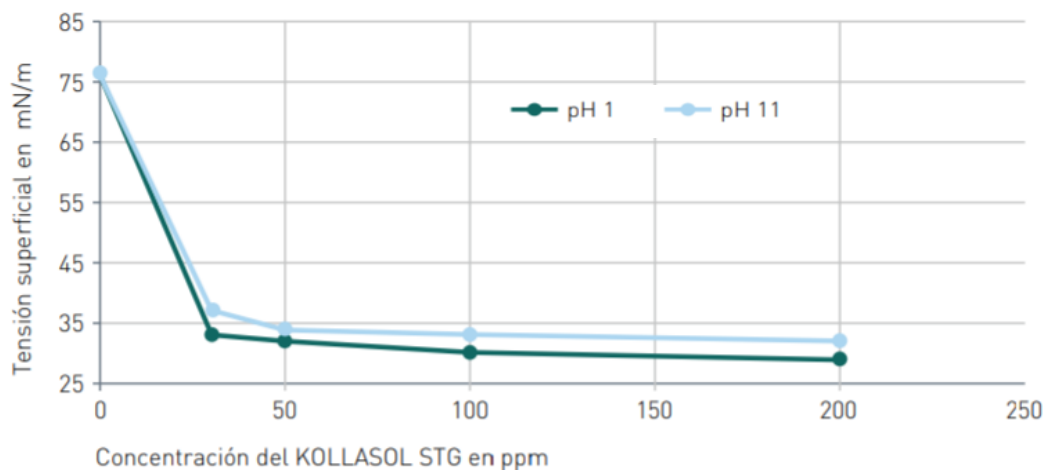
Los perfiles de biodegradación resultantes del ensayo estático, así como del ensayo de espirometría permiten determinar la cinética del proceso de biodegradación, sirviendo estos para evaluar la persistencia de los tensioactivos en el medio ambiente y para evaluar el riesgo de exposición a los humanos, animales y plantas. El principal factor que determina la biodegradabilidad es la estructura hidrófoba. La biodegradabilidad está favorecida por un aumento de la linealidad del grupo hidrófobo, y deteriorada por su ramificación. Sin embargo, si la ramificación de la cadena está próxima al grupo hidrófilo, el tensioactivo es degradado a pesar de ser ramificado. Esto debido a que las bacterias atacan al tensioactivo empezando por el extremo opuesto al grupo hidrófilo. La

destrucción de la cadena se paraliza cuando se llega a un carbono terciario. Para los diferentes grupos de tensioactivos estudiados, se observa que la toxicidad es función de su estructura química, así los valores de toxicidad son mayores para los tensioactivos de mayor longitud de cadena carbonada y de menor grado de etoxilación. se observa que la biodegradación es menor para aquellos de mayor longitud de cadena y menor grado de etoxilación. Por tanto, no se cumple la premisa general de que los tensioactivos más tóxicos resultan ser los más biodegradables (Velásquez, 2016).

2.2.11. Kollasol STG LF

Es un aditivo que cumple la función de humectar sin generar espuma, al mismo tiempo, permite la reducción de los productos químicos tóxicos y nocivos como los cianuros. Otra de su función importante es la reducción de la tensión superficial, brindando así una mejor percolación y lixiviación. Estos aditivos nos brindan distintas ventajas en el proceso de lixiviación en pilas estas son: a). Reducción del tiempo de proceso, b). Reducción de la tensión superficial, c). Excelente humectación de minerales, d). No genera espuma durante y después de la lixiviación, e). Ningún impacto negativo en el proceso, f). Mayor rendimiento de extracción, g). Crea una solución estable a pH superior a 10,5 , h). No

interfiere con los procesos sucesivos, i). Dimensión de la columna. (CHT, 2021, p.2)



2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

- **Cianuro de sodio:** Se trata de un compuesto sólido e incoloro que hidroliza fácilmente en presencia de agua y óxido de carbono (Wikipedia, 2021).
- **Compuestos anfifílicos:** También llamadas anfipáticas, son aquellas moléculas que poseen un extremo hidrofílico, es decir, que es soluble en agua, y otro que es hidrófobo, lo cual significa que rechaza el agua (Wikipedia, 2021).
- **Granulometría:** Es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes

a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica (EcuRed, s.f).

- **Hidrometalurgia:** Rama de la metalurgia donde el elemento de interés es extraído desde una solución que lo contiene (Enciclopedia Británica, 1998).
- **Lixiviación:** Proceso hidrometalúrgico mediante el cual se provoca la disolución de un elemento desde el mineral que lo contiene para ser recuperado en etapas posteriores mediante electrólisis (Ministerio de Energía y Minas, s.f).
- **Mineral:** compuesto químico inorgánico, de origen natural, que posee una estructura interna y composición química característica, formado como resultado de procesos geológicos (Consejo Minero , 2021).
- **Tensioactivo:** Son sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases (Wikipedia, s.f.).

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación

Para este proyecto se empleó el tipo de investigación con enfoque o ruta cuantitativa aplicada y científico-tecnológica que presenta un carácter experimental-transversal, debido a que se ha empleado distintas investigaciones de la ciencia metalúrgica en el área de metalúrgica extractiva del oro con la finalidad de demostrar la eficacia del tensoactivo kollasol STG LF en la recuperación del oro. La investigación tecnológica o de *desarrollo*, tiene por finalidad la invención de máquinas o de procesos que permite obtener beneficios económicos y es esencialmente experimental (Cegara, 2004, p.50). Según Ráfales (1993) se denomina investigación científico- tecnológico debido a que la característica fundamental de la investigación es el descubrimiento de principios generales, en este caso operacionales. El investigador parte de resultados anteriores, planteamientos, proposiciones o respuestas en torno al problema que le ocupa.

Para ello debe: a) Planear cuidadosamente una metodología, b) Recoger, registrar y analizar los datos obtenidos, c) De no existir estos instrumentos, debe crearlos.

3.1.2. Nivel de la investigación

Esta investigación es de carácter explicativo a nivel laboratorio ya que permitió la evaluación de la eficacia del aditivo tensioactivo proyectándose para su uso a gran escala, de acuerdo a su naturaleza esta investigación reúne las características de un estudio experimental explicativo. Como menciona Arias (2012) “La investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. De acuerdo a Hernández, Fernández y Baptista (2010) la investigación experimental es un estudio en donde se manipula conscientemente una o más variables independientes, para observar los resultados que tienen sobre una o más variables dependientes, dentro de un periodo de control por el investigador.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO

3.2.1. Población

La población estuvo constituida por el mineral ROM (run of mine) proveniente de mina, la cual, será sometida a estudio de investigación con

la finalidad de optimizar la recuperación del oro.

3.2.2. Muestra

La muestra se obtuvo mediante distintos métodos manuales de muestreo como el cuarteo, coneo y paleo alternado o fraccionado. El tipo de muestreo depende de la granulometría, tipo de mineral y pruebas que se quieran realizar, se debe tener en cuenta que estos resultados servirán para las pruebas de lixiviación a nivel de planta piloto; por lo tanto, es muy importante ser meticuloso con estas muestras.

3.2.3. Operacionalización de variables

Tabla 2

Operacionalización de variables.

VARIABLE	DIMENSIÓN	INDICADOR
VI	Dosificación del tensoactivo	g/t
Percolabilidad del lixiviante	Kollasol STG LF	
VD	Disolución del oro	g/L
Extracción de Oro	Consumo de cianuro	g/t
	Tensión superficial	mN/m

Nota: Se muestra en la tabla las variables, dimensión e indicadores, datos tomados de la U.M Pucamarca, 2021.

Constantes experimentales del estudio

- pH de la solución lixiviante

- Granulometría (μm)
- Tiempo de lixiviación (min)
- Dimensión de la columna (mm)

3.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1. Técnica de recolección de datos

Se aplicó dos técnicas que fueron indispensables para el desarrollo de esta investigación y obtención de resultados, primero, la técnica que se empleó fue análisis documental, indispensable para la obtención de datos secundarios como revistas, libros, investigaciones que aportaron considerablemente, y la segunda, se tomó los datos obtenidos de los productos de las pruebas experimentales, fundamental en toda la investigación, porque permitió tomar datos y manipular las variables que fueron necesarias.

3.3.2. Técnica de análisis de datos

El análisis de datos que se empleó fue cuantitativo siendo posible obtener resultados confiables, a través de datos numéricos recopilados mediante herramientas estandarizadas para esta investigación. Se empleó el software Microsoft Excel-2019 para la construcción de las gráficas correspondientes y la cuantificación de distintos parámetros a fin de

correlacionar los datos, y obtener resultados óptimos.

3.3.3. Materiales y equipos

Para el desarrollo de esta investigación se empleó los siguientes materiales y equipos:

- Mineral
- Baldes de plásticos 7.6 L
- Cilindros de plásticos 150 L
- Agua destilada
- Agua proceso
- Vaso precipitado 250 ml
- Probeta 200 ml
- Piseta
- Malla metálica
- Pipeta 10 ml y 50 ml
- Propipeta
- Bandejas de metal
- Tubos de ensayo
- Espátula
- Bombas peristálticas
- Multiparámetro

- pH-metro
- Chancadora primaria y secundaria
- Muestreador rotatorio Gilson
- Balanza analítica e industrial
- Columnas = 0,1905m de diámetro x 2 m
- Tensiómetro

Reactivos químicos

- Cianuro de sodio (NaCN)
- Cal viva (82 % útil) (CaO)
- Hidróxido de sodio 0,1 N
- Rodanina 0,02 %
- Nitrato de plata 0, 01 N
- Kollasol STG LF

3.4. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS

3.4.1. Muestreo

Las muestras requeridas fueron tomadas del Banco 36 (Polígono 36 A) – Tajo Checocollo, para realizar pruebas metalúrgicas (columnas). La ley de las muestras de la sílice granular están en el rango de 0,3-0,5 g/t Au.

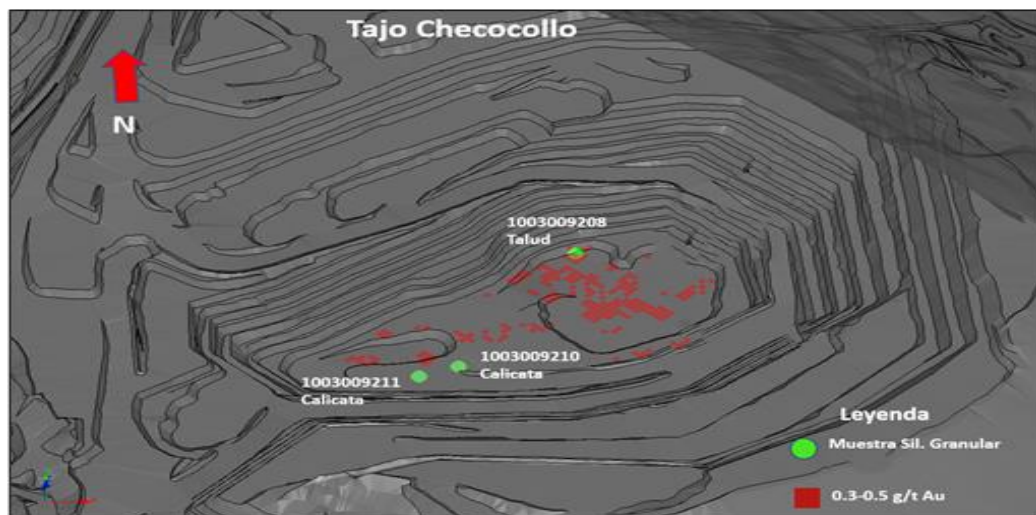
Con la ayuda de la excavadora se procedió a excavar los puntos

determinados a una profundidad aproximada de 6 metros (se toma como referencia todo el brazo de la excavadora), el material muestreado se colocó a un lado depositándolo formando un cono.

Una vez que se tomó el mineral en la profundidad establecida, se procedió a homogenizar 5 veces utilizando la excavadora según el método de cuarteo y coneo, ya homogeneizado el mineral se tomó 4 muestras representativas por calicata utilizando el método de canales, llenando los sacos a una cantidad aproximada de 20 a 25 kg.

Figura 8

Muestreo de mineral Sílice granular



Nota: La figura 8 muestra puntos donde se realizó el muestreo de sílice granular en el tajo Checocollo, U.M Pucamarca, 2021.

Se predeterminaron 12 puntos, haciendo un total de 1 080 kg, que se

emplearon para analizar las corridas de pruebas metalúrgicas.

Figura 9

Muestreo en calicatas



Nota: La imagen muestra calicatas realizadas en el cono de mineral. Archivo de la U.M Pucamarca, 2021.

3.4.2. Caracterización geológica

En el tajo Checocollo se encuentran diversos tipos de alteraciones, se identificó los porcentajes de dichas alteraciones y se determinó el contenido promedio de oro, las cuales se muestran en la tabla 3.

Existe la predominancia de la alteración sílice granular junto a la sílice pulverulenta en la parte central del tajo, así como su proyección de dichas alteraciones a bancos inferiores, es por ello, que se tiene la necesidad de conocer actualmente la recuperación metalúrgica de la sílice

granular cuyo rango de ley está entre 0,30 a 0,50 g Au/t.

Tabla 3

Tipos de alteraciones

Tipos de Alteraciones	Simbología	% de distribución	Au (g/t)
Argílica avanzada	AAR	15,06	0,30
Argílica Intermedia	AR	1,38	0,21
Sílice granular	Si-GR	5,78	0,30
Sílice masiva	Si-MA	39,34	0,44
Sílice pulverulenta	Si-PU	0,08	0,66
Sílice Vuggy	VUG	25,43	0,35
Morrenas	MORR	11,70	0,55
Roca fresca	UA	1,01	0,47
Propilítica		0,22	0,33
Total		100	

Nota: La tabla 3 muestra el % de distribución en relación con el Au libre en las alteraciones. Datos tomados de la U.M Pucamarca, 2021.

Las muestras obtenidas de los taludes y calicatas presentan fragmentos de brecha polimíctica de diversa granulometría, los clastos de dicha brecha están silicificados, incluso se observan clastos de alteración vuggy (sílice residual) producto del hidrotermalismo proveniente de la génesis propia del yacimiento, asimismo, los tamaños de los fragmentos varían desde los 3 cm hasta los 15 cm, la alteración predominante es de la sílice granular, es conocido también que este material es enviado a la planta como mineral ROM durante el proceso de minado. Existe poca

presencia de óxidos de hierro, las cuales se encuentran en los planos de fracturas.

3.4.3. Granulometría de la muestra

Para determinar la distribución granulométrica de la mena después del chancado se tomó por cuarteo muestra de 24,3 kg y se pasó por el set de mallas que se muestra en la tabla 4. Con estos datos se obtiene la curva GGS para determinar el valor del tamaño de la partícula, que resulta ser un $P_{80} = 11\ 004\ \mu\text{m}$ equivalente a 10,998 mm (0,433”), la cual se muestra en la figura 5.

Tabla 4

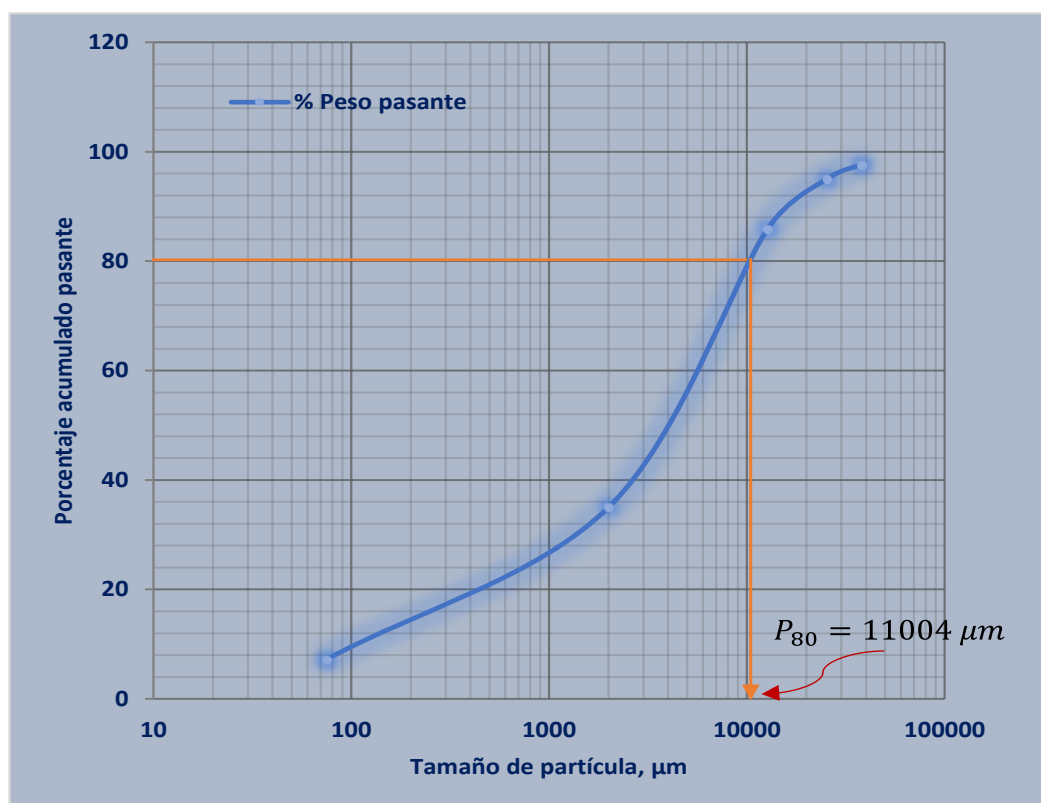
Datos del análisis granulométrico para la malla valorada

Malla	Abertura (micras)	Peso (kg)	% Peso retenido	% Peso acumulado	% Peso pasante	P_{80} μm	Ley de Cabeza (g/t)		
							Au	AuCN	%AuCN
11/2"	38100	0,571	2,36	2,4	97,6	0,0	1,21	0,98	81,06
1"	25400	0,635	2,62	5,0	95,0	0,0	1,39	1,22	87,96
1/2"	12700	2,239	9,25	14,2	85,8	0,0	1,22	1,08	88,63
10	2000	12,293	50,80	65,0	35,0	11004	0,79	0,65	82,35
200	75	6,712	27,73	92,8	7,2	0,0	0,40	0,33	81,64
-200	10	1,750	7,23	100,0	0,0	0,0	0,49	0,36	73,77
Total (peso)		24,2					0,728	0,60	82,2

Nota: Análisis granulométrico valorado, datos tomados de la U.M Pucamarca, 2021.

Figura 10

Curva GGS de la muestra experimental



Nota: Corresponde al mineral sílica alterada granular. Archivo Pucamarca, 2021.

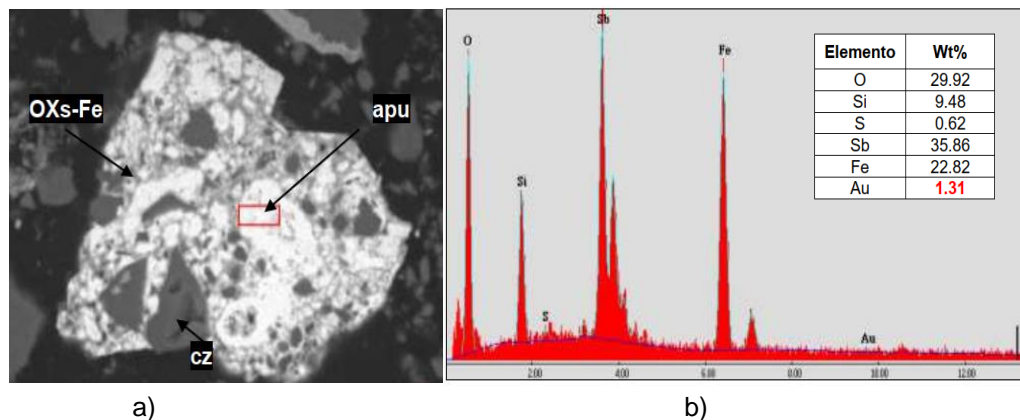
3.4.4. Caracterización microscópica del mineral sílica granulada

Para la caracterización mineralógica se ha tomado información que obra en los archivos de la Minera Pucamarca, referente al estudio microscópico del Yacimiento Cerro Checocollo. Del estudio por microscopía electrónica de barrido y Fluorescencia de rayos X se tomó los que corresponden a la zona de sílica alterada granular de tres muestras cuyos

resultados se dan en las figuras 11,12 y 13.

Figura 11

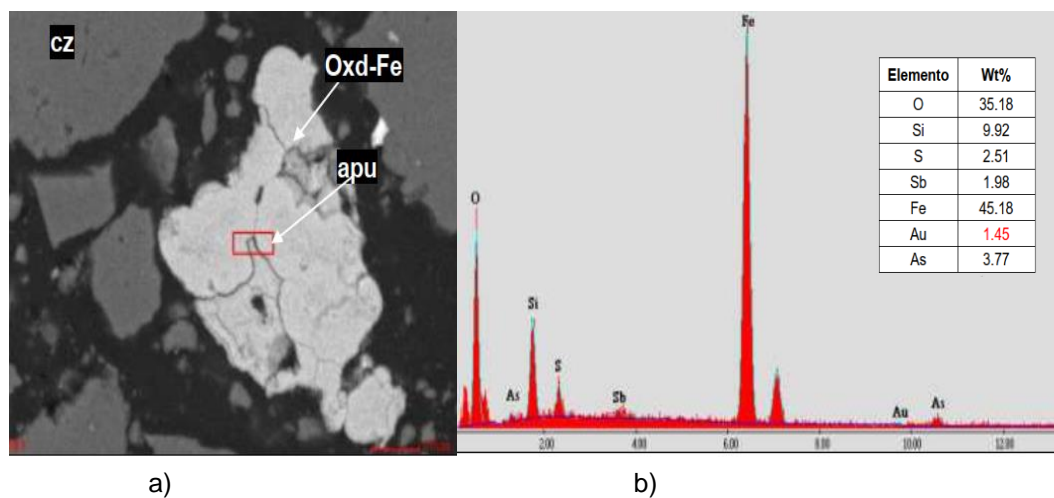
Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada.



Nota: a) Región marcada de **Apuanita (ap)** en borde de cuarzo (**cz**) y óxidos de **Fe (oxd-Fe)** de tamaño aproximado de 20µm; (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno, Silicio, Azufre, Antimonio, Hierro, Oro y Arsénico.

Figura 12

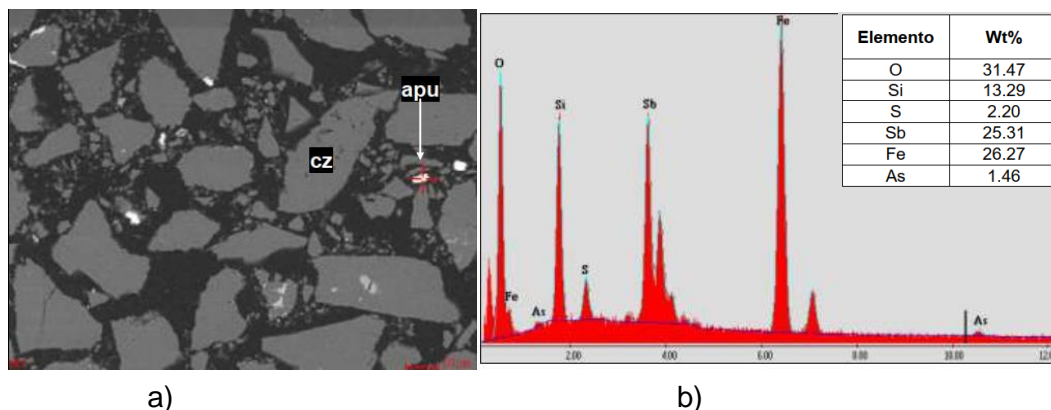
Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada.



Nota: a) Región marcada de **Apuanita (ap)** en borde de cuarzo (**cz**) y óxidos de **Fe (oxd-Fe)** de tamaño aproximado de 20µm; (b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno, silicio, azufre, antimonio, hierro, oro y arsénico.

Figura 13

Microscopía y difractograma del mineral sílica alterada granulada.



Nota: a) Región marcada con una partícula de **Apuanita (ap)** acompañada por cuarzo (**cz**) de tamaño aproximado de 50µm; b) Espectro la cual muestra los elementos presentes: Oxígeno, silicio, azufre, antimonio, hierro y arsénico.

Estas microestructuras y difractogramas muestran que no hay oro visible, típico de un mineral refractario perteneciente a un yacimiento de tipo epitermal de media y alta sulfuración, como ocurre en el cerro Checocollo.

3.4.5. Pruebas de cianuración en columnas

Se realizaron 2 pruebas por triplicado de cianuración en columnas de 0,1905m Φ x 2 m h, a un P₈₀ de 10,9982 mm (0,433”), una prueba se realizó con Kollasol STG LF y la otra sin Kollasol STG LF para ver la diferencia de extracción de oro.

Carguío de columnas

- La muestra fue homogeneizada con la cantidad de cal requerida según la ratio obtenido (según pH del mineral) figura 14.

Figura 14

Homogenizado del mineral con cal



Nota: En la imagen se muestra el mezclado con cal y homogenizado del mineral a usar en las pruebas. Archivo de la U.M Pucamarca (2021).

- Las columnas fueron verificadas, para corroborar si están correctamente selladas para evitar fugas de solución cianurada.
- La muestra fue cargada en sacos de máximo 20 kg. Anotar peso total húmedo depositado dentro de la columna (Determinar el % humedad del mineral).

Figura 15

Llenado y carguío del mineral en sacos.



Nota: En la figura muestra el llenado en sacos de mineral para ser cargados a columnas. Archivos de la U.M Pucamarca (2021).

- Luego de terminar el carguío de las columnas, se anotó la altura libre dejada entre el mineral y el límite de la columna.
- Se procedió armar el circuito de bombeo por cada columna cargada, tal como se muestra en la Figura 16.

Figura 16

Circuito de bombeo de la solución lixivante



Nota: En la imagen se muestra el circuito de bombeo de la solución lixivante empleando una bomba peristáltica. Archivo de la U.M Pucamarca, 2021.

3.4.6. Prueba de cianuración en columna 6 sin Kollasol STG LF

- a) Se empezó la prueba regando con una tasa de 11 L/hm² durante todo el proceso de lixiviación, figura 17.
- b) Se realizó la lixiviación con la concentración de cianuro de 60 ppm a un pH de 10,5 (promedio).
- c) Se registró la fecha y hora de inicio de riego. También el dato de la hora y fecha de la primera gota que cae al balde solución percolada (para determinar % humedad de saturación).

Figura 17

Primera solución lixiviada



Nota: En la imagen se muestra el circuito completo de columnas realizando la lixiviación, Archivo de la U.M Pucamarca (2021).

- d) De la solución percolada se tomó una muestra de aproximadamente 200 ml para ser analizada por lo siguiente:
- Se midió los parámetros de pH, cianuro libre.
 - Se envió solución rica en tubos de ensayo al laboratorio químico para ser analizado por Au.

Todos los controles antes mencionados se realizaron diariamente hasta mantener por tres días consecutivos la ley de percolación de oro $< 0,014$ ppm (este dato fue proporcionado por el Técnico de Minsur- límite detección).

- a) Luego la columna entró a una etapa de lavado, se preparó solución alcalina respetando la densidad de riego de la columna. Este lavado se realizó hasta que la concentración de cianuro libre estuvo $< a 10$ ppm.
- b) Después de haber terminado la etapa de lavado, se dejó drenar la columna hasta alcanzar el mínimo flujo de drenaje, de igual manera esta solución se pesará y enviará a analizar.
- c) Se midió altura libre final dejada entre el mineral y el límite de la columna (% de compactación del mineral en la columna), figura 18.

Figura 18

Mineral descargado de la columna, después de la lixiviación



Nota: La imagen muestra el ripio descargado de las columnas. Archivo de la U.M Pucamarca (2021).

3.4.7. Prueba de cianuración en columna 7 con Kollasol STG LF

Se siguió los mismos pasos que en la prueba anterior (columna 6):

- a) Por medio de la curva de tensión superficial vs concentración, se determinó la concentración de Kollasol STG LF (ppm) para llevar la solución de riego a una tensión superficial de 36 mN/m.
- b) Fue añadida la cantidad de Kollasol STG LF calculada a la solución de riego, agitar suavemente, figura 19.

Figura 19

Pesado del kollasol STG LF



Nota: La imagen muestra el pesado de Kollasol añadir a la solución. Fuente: Archivo de la U.M Pucamarca (2021).

- c) Se empezó la prueba regando con una tasa de 11 L/hm² durante todo el proceso de lixiviación, Figura 20.

Figura 20

Prueba de lixiviación en columna



Nota: La imagen muestra el primer riego de la columna con una solución de tensión superficial modificada con kollasol. Archivos de la U.M Pucamarca (2021).

- d) Se realizó la lixiviación con la concentración de cianuro de 60 ppm a un pH de 10,5 (promedio) y a una tensión superficial de 36 mN/m.
- e) Se registró la fecha y hora de inicio de riego. También el dato de la hora y fecha de la primera gota que cae al balde solución percolada (para determinar % humedad de saturación).

De la solución percolada se tomó una muestra de aproximadamente 200 ml para ser analizada por lo siguiente:

- Se midió los parámetros de pH, cianuro libre y Tensión superficial.

Figura 21

Tensiómetro



Nota: La imagen muestra un tensiómetro de anillo y placa KRÜSS. Fuente: Archivos U.M Pucamarca (2021).

- Se envió solución rica en tubos de ensayo al laboratorio químico para ser analizado por Au.

Figura 22

Muestras tomadas de la solución lixiviada



Nota: La imagen muestra alícuotas tomadas de la solución lixiviada, después de cada percolación para su control. Fuente: Archivos de la U.M Pucamarca (2021).

- f) Todos los controles antes mencionados se realizaron diariamente hasta mantener por tres días consecutivos la ley de percolación de oro $< 0,014$ ppm (este dato lo brindó el Técnico de Minsur- límite detección).

Figura 23

Medición de la Fuerza Cianuro



Nota: La imagen muestra el control de la fuerza cianuro. Fuente: Archivos de la U.M Pucamarca (2021).

- g) Luego la columna entró a una etapa de lavado, se preparó solución alcalina respetando la densidad de riego de la columna. Este lavado se realizó hasta que la concentración de cianuro libre estuvo < 10 ppm.
- h) Después de haber terminado la etapa de lavado, se dejó drenar la columna hasta alcanzar el mínimo flujo de drenaje, de igual manera esta solución se pesará y enviará a analizar, figura 24. Se midió altura libre final dejada entre el mineral y el límite de la columna (% de compactación del mineral en la columna).

Figura 24
Drenaje de la solución



Nota: La imagen muestra el circuito de columnas con el último lavado del mineral. Archivo de la U.M Pucamarca, (2021).

3.4.8. Determinación de la concentración y dosis de Kollasol STG LF

Para realizar las medidas de tensión superficial, se preparó soluciones en diferentes concentraciones de tensioactivo Kollasol STG LF,

concentraciones desde 0 ppm hasta 500 ppm, y tomar mediciones de tensión superficial en cada una, para formar una curva del comportamiento en la disminución de la tensión superficial.

Se preparó una solución de 500 ppm de Kollasol STG LF y realizar diluciones sucesivas para obtener concentraciones de 400, 300, 200, 100, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 y 10 ppm de Kollasol STG LF, de la siguiente forma:

- a) Se pesó 10 ml de solución cianurada y agregar 5 mg de Kollasol STG LF, tomar una pequeña muestra en el recipiente transparente del equipo y medir la tensión superficial por triplicado y registrarlo como tensión superficial a 500 ppm. Regresar la muestra.
- b) Se diluyó la preparación inicial, preparado en (a), añadiendo el volumen necesario para obtener 400 ppm de Kollasol STG LF.
- c) Se calculó el volumen de solución a añadir, aplicando la siguiente formula:

$$Vol\ añadir = \frac{W\ kollasol}{ppm\ final} - Vol\ inicial \quad [8]$$

Donde:

Vol. añadir: volumen de solución a añadir (L)

W Kollasol: peso de Kollasol STG LF que se añadió inicialmente (mg)

ppm final: concentración final de Kollasol STG LF en ppm.

Vol. inicial: volumen inicial de solución cianurada (L)

Descarga de columna

- Terminada la etapa de DRENAJE la columna se descargó, tomando todas las medidas de seguridad posibles.
- Luego toda la muestra descargada fue OREADA a la intemperie (se secó una muestra representativa para el % de humedad retenido) y luego de 1 día, recién se homogeneizó y cuarteó para obtener muestra para la ley del ripio, malla valorada del ripio (para los análisis químicos del ripio fue necesario hacer un lavado de la muestra).

Constantes experimentales de la prueba de lixiviación en columna estándar

Se utilizó las siguientes constantes experimentales:

Humedad de saturación	: 7,97 %
Masa de muestra	: 2 000 kg
Ratio de cal	: 0,251 kg/t
Tasa de riego	: 11 L/hm ²
Flujo de riego	: 5,23 ml/min
Cianuro libre	: 60 ppm
pH promedio	: 10,5

Constantes experimentales de la prueba de lixiviación en columna con Kollasol STG LF

Para esta prueba se consideró las siguientes constantes experimentales:

Humedad de saturación: 7,86 %

Masa de muestra: 2 000 kg

Ratio de cal: 0,250 kg/t

Tasa de riego: 11 L/hm²

Flujo de riego: 5,23 ml/min

Cianuro libre: 60

pH promedio: 10,5

Tensión Superficial: 36 mN/m.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

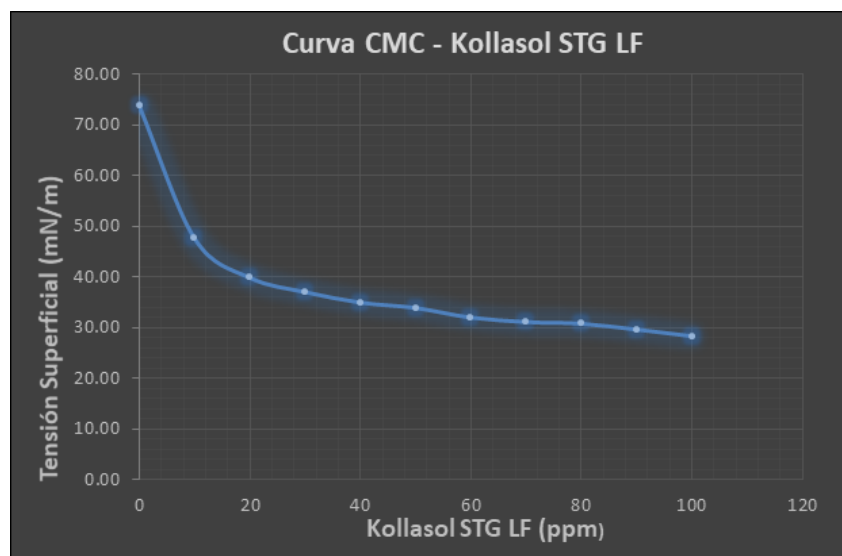
En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de investigación con el Kollasol STG LF para mejorar la percolabilidad y la extracción de oro mediante el proceso de cianuración. Mediante la comparación realizada entre la prueba de columna convencional y la prueba de columna aplicando kollasol STG LF, los resultados obtenidos muestran una mejora sustancial obtenida con el uso de dicho tensioactivo. La extracción de oro incrementó a un 7,80 % y también mejoró la percolabilidad del mineral (Sílice granular), disminuyendo el tiempo de lixiviación y teniendo menos gasto en el consumo de NaCN, así como la permeabilidad del mineral, la cual ha sido reconocida desde hace tiempo como un factor crítico en el rendimiento de la lixiviación en pilas. Una mala permeabilidad del mineral da lugar a una menor recuperación de oro y a un mayor tiempo de recuperación de la lixiviación, e influye sobre el tamaño nominal de la trituración, la altura de la pila y la tasa de riego del lixivante, entre otros.

4.1.1. Determinación de la concentración óptima de Kollasol STG LF

En la figura 25 se puede apreciar la concentración óptima para este fin, la cual es disminuir la tensión superficial de la solución a usar en la prueba hasta 36 mN/m. Para este caso el valor es 32 ppm de kollasol STG LF, por lo tanto, se usó 32 mg de Kollasol STG LF por cada litro de solución.

Figura 25

Comportamiento de la tensión superficial empleando kollasol.



Nota: La imagen muestra la disminución de la tensión superficial empleando kollasol STG LF. Elaboración propia, (2021).

Es importante resaltar que la medida de tensión superficial depende de la solución o agua de tratamiento que se utilice en cada prueba.

4.2. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTES EXPERIMENTALES EN LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN ESTÁNDAR

4.2.1. Determinación del porcentaje de humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_o - W_f}{W_o} \times 100 \quad [9]$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1.222 - 1.216}{1.222} \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 0.49\%$$

4.2.2. Determinación de la densidad de riego

$$\rho_{riego} = \frac{33 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 1,98 \frac{\text{L}}{\text{h}} \quad [10]$$

$$\rho_{riego} = \frac{1,98 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{0,18 \text{ m}^2} = 11 \frac{\text{L}}{\text{h} - \text{m}^2}$$

4.2.3. Determinación del área de la columna

$$A_{columna} = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \times \left(\frac{7.5}{4} \times \frac{0,0254}{1} \right)^2 = 0,029 \text{ m}^2 \quad [11]$$

4.2.4. Determinación del volumen de riego

$$Vol_{riego} = \rho_{riego} \times A_{columna} \times 24 \text{ h} \quad [12]$$

$$Vol_{riego} = 11 \frac{\text{L}}{\text{h} - \text{m}^2} \times 0,029 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h}$$

$$Vol_{riego} = 7,656 \text{ L}$$

4.2.5. Determinación de la cantidad de NaCN a añadir

$$g \text{ NaCN} = \frac{\text{ppm} \times 1,885 \times \text{vol}_{\text{solucion}}}{980} \quad [13]$$

$$g \text{ NaCN} = \frac{60 \times 1,885 \times 7,6}{980} = 0,8771 \text{ g}$$

4.2.6. Determinación del porcentaje de compactación

$$\% \text{ Compactación} = \frac{h_o - h_f}{h_o} \times 100 \quad [14]$$

$$\% \text{ Compactación} = \frac{164_{\text{cm}} - 163_{\text{cm}}}{164_{\text{cm}}} \times 100 = 0,61\%$$

4.2.7. Determinar flujo de riego

$$\text{Flujo de riego} = 11 \frac{\text{Lt}}{\text{hxm}^2} \times 0,029 \quad [15]$$

$$\text{Flujo de riego} = 0,319 \frac{\text{Lt}}{\text{hxm}^2} \times \frac{h}{60 \text{min}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}} = 5,23 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

4.3. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTES EXPERIMENTALES EN LAS PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN APLICANDO KOLLASOL STG LF

4.3.1. Determinación del porcentaje de humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{W_o - W_f}{W_o} \times 100 \quad [16]$$

$$\% \text{ Humedad} = \frac{1,060 - 1,055}{1,060} \times 100$$

$$\% \text{ Humedad} = 0,47\%$$

4.3.2. Determinación de la densidad de riego

$$\rho_{riego} = \frac{33 \text{ ml}}{\text{min}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 1,98 \frac{\text{L}}{\text{h}} \quad [17]$$

$$\rho_{riego} = \frac{1,98 \frac{\text{L}}{\text{h}}}{0,18 \text{ m}^2} = 11 \frac{\text{L}}{\text{h} - \text{m}^2}$$

4.3.3. Determinación del área de la columna

$$A_{\text{columna}} = \pi \frac{D^2}{4} = \pi \times \left(\frac{7,5}{4} \times \frac{0,0254}{1} \right)^2 = 0,029 \text{ m}^2 \quad [18]$$

4.3.4. Determinación del volumen de riego

$$Vol_{riego} = \rho_{riego} \times A_{\text{columna}} \times 24 \text{ h} \quad [19]$$

$$Vol_{riego} = 11 \frac{\text{L}}{\text{h} - \text{m}^2} \times 0,029 \text{ m}^2 \times 24 \text{ h}$$

$$Vol_{riego} = 7,656 \text{ L}$$

4.3.5. Determinación de la cantidad de NaCN a añadir

$$g \text{ NaCN} = \frac{\text{ppm} \times 1,885 \times vol_{\text{solucion}}}{980} \quad [20]$$

$$g \text{ NaCN} = \frac{60 \times 1,885 \times 7,6}{980} = 0,8771 \text{ g}$$

4.3.6. Determinación del porcentaje de compactación

$$\% \text{ Compactación} = \frac{h_o - h_f}{h_o} \times 100 \quad [21]$$

$$\% \text{ Compactación} = \frac{177_{cm} - 176_{cm}}{177_{cm}} \times 100 = 0,56\%$$

4.3.7. Determinar flujo de riego

$$\text{Flujo de riego} = 11 \frac{L}{h \cdot m^2} \times 0,029 \quad [22]$$

$$\begin{aligned} \text{Flujo de riego} &= 0,319 \frac{L}{h \cdot m^2} \times \frac{h}{60 \text{ min}} \times \frac{1000 \text{ ml}}{1 L} \\ &= 5,23 \frac{\text{ml}}{m^2 \cdot \text{min}} \end{aligned}$$

4.3.8. Determinar gramos de kollasol STG LF a añadir

$$\text{Kollasol } g = \frac{32_{mg} - 7,6_L}{1_L} = 243,2mg \quad [23]$$

$$\text{Kollasol } g = 243,2_{mg} \times \frac{1_g}{1000_{mg}} = 0,2432g$$

4.4. PRUEBAS DE LIXIVIACIÓN EN COLUMNA

Como se puede apreciar en las tablas 5 y 6 se muestra los resultados de las pruebas estándar en columna, la cual muestra un porcentaje de extracción de oro de 58,93 % y en la prueba con adición del tensioactivo Kollasol STG FL en columna, muestra una extracción de 66,74 %. Ello configura una clara influencia en la permeabilidad de la solución cianurante y su percolabilidad, dando como resultado una mejor extracción de oro con la ayuda que proporciona el tensoactivo Kollasol STG LF.

Tabla 5*Comparación de las pruebas con kollasol y estándar*

COLUMNA	ppm	Tasa de riego (L/hm ²)	Granulometría mm	Ley de Cabeza Calculada (g/t) Au	Extracción calculada (%) Au
C-6 estándar	60	11	100% -50,8	1,081	58,93
C-7 con kollasol	60	11	100% - 50,8	1,080	66,74

Nota: La figura muestra la diferencia de extracción de Au entre las dos pruebas realizadas dato de extracción obtenido del Anexo 02 y 03. (2021).

Tabla 6*Comparación de resultados de la prueba con y sin Kollasol*

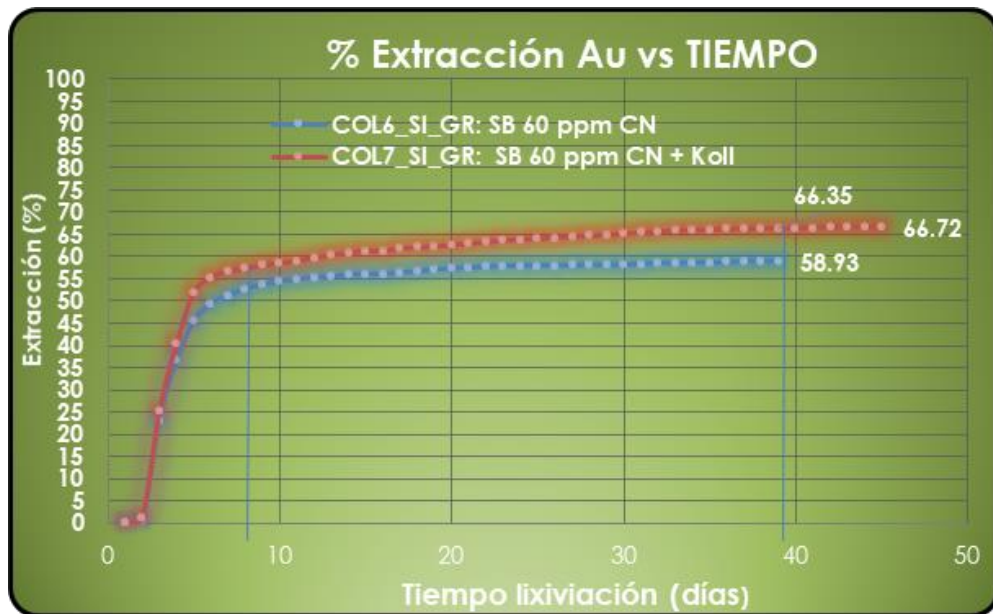
Nº Columna	ppm	Tasa de riego L/hm ²	Granulometría mm	Ley g Au/t	Extracción % Au
C-6 estándar	60	11	100 % -50,8	0,926	58,90
C-7 con Kollasol	60	11	100 % -50,8	0,926	66,72

En la figura 26 se puede ver claramente que la prueba estándar en columna llega a una extracción de 58,93 % en 39 días, mientras la prueba con el tensioactivo Kollasol STG LF se obtiene la misma extracción en el día 8.

Se nota también que en el día 39 que acaba su lixiviación la prueba estándar, la prueba con tensioactivo Kollasol STG LF sigue recuperando hasta el día 45 obteniendo una extracción total de oro de 66,74 %.

Figura 26

Extracción de Au en relación al tiempo



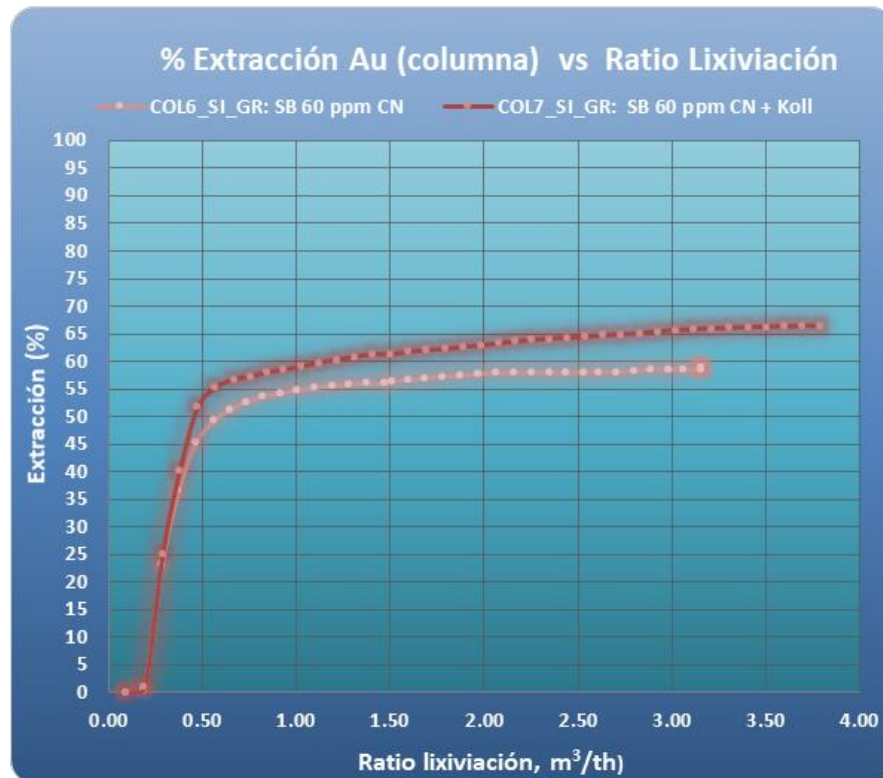
Nota: La figura muestra la extracción de Au en las pruebas con y sin Kollasol.

En la figura 27 se puede observar que la prueba estándar en columna se logró extraer 58,59 % de oro con 3,16 m^3/th de ratio de lixiviación, mientras que se obtuvo la misma extracción de oro en la prueba con tensioactivo Kollasol STG LF en columna usando solamente 0,85 m^3/th de ratio de lixiviación obteniéndose la misma extracción.

Se notó también que la prueba con Kollasol STG LF llega a la recuperación máxima de 66,74 % de extracción de oro con un gasto de 3,79 m^3/th de ratio de lixiviación.

Figura 27

Porcentaje de extracción en relación con la ratio de lixiviación



Nota: La figura muestra el porcentaje de extracción vs la ratio de lixiviación. (2021).

En la figura 28 se nota claramente, que la prueba estándar en columna se logra obtener una extracción máxima de 58,93 % de oro usando 0,776 g de NaCN, mientras la prueba de cianuración con KOLLASOL STG LF en columna logra la misma extracción usando solo 0,187 g de NaCN. También se puede notar que la prueba con Kollasol STG LF sigue consumiendo NaCN por más días, eso se debe a que sigue extrayendo más oro de la columna de mineral.

Figura 28

Porcentaje de extracción en relación con el ratio de NaCN



Nota: La imagen muestra el porcentaje de extracción vs la ratio de NaCN, datos obtenidos de los anexos 2 y 3. (2021).

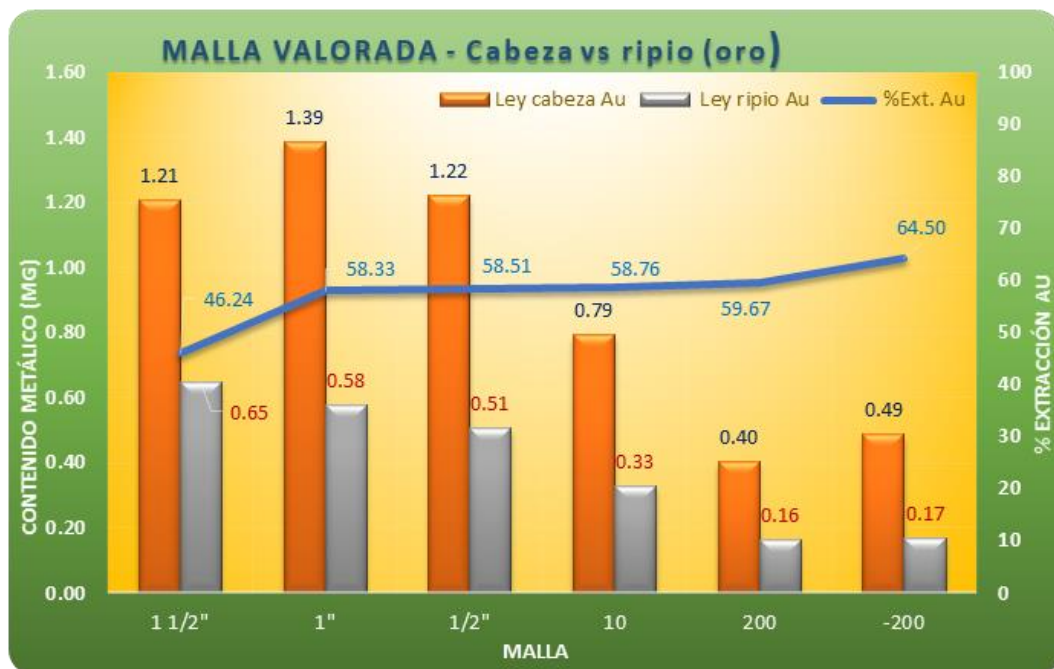
En la figura 29 se puede observar que el porcentaje de extracción de oro por malla valorada de la prueba estándar de columna por diferentes mallas consideradas, se da precisamente una mejor extracción de oro en la malla-200 o a 75 μ m.

En dicha distribución granulométrica se tiene un promedio ponderado

del 59,10 % de extracción de oro.

Figura 29

Comparación del análisis de ley de cabeza y ripio de la malla valorada para la prueba estándar



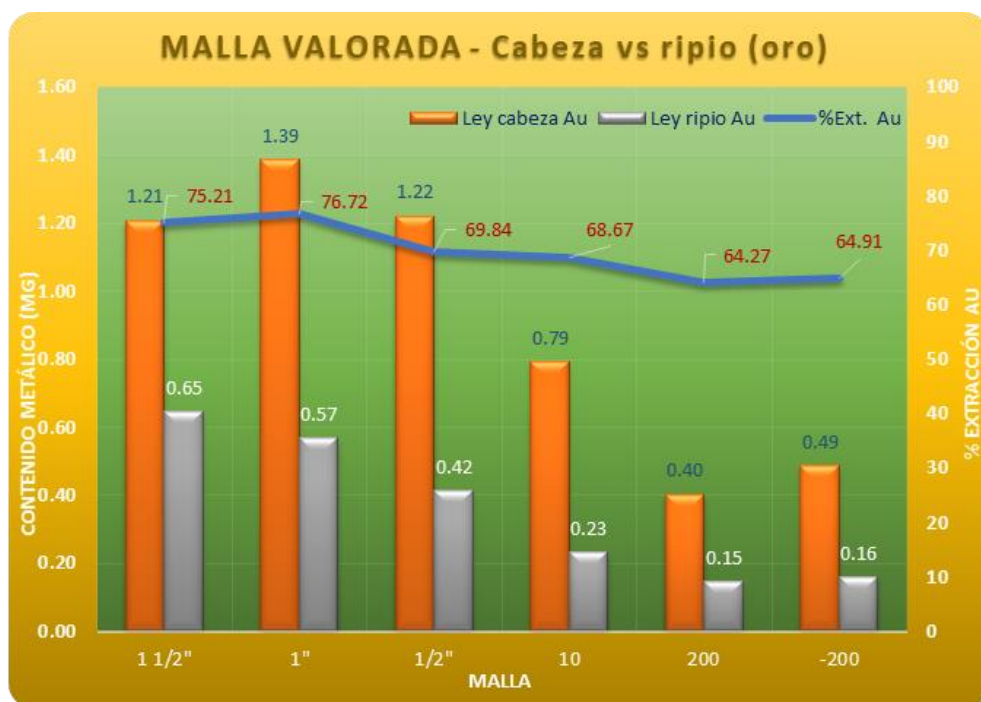
Nota: La figura muestra la comparación de ley de la prueba 1, ley de cabeza vs ley de ripio vs % de extracción, datos tomados de la tabla 3. (2021).

En la figura 30 se puede observar que la prueba con adición del tensioactivo Kollasol STG LF en columna se tiene un mayor porcentaje de extracción en la malla 25,4 mm (1 pulgada) con una extracción que alcanza el 76,72 % de oro. Esto se debe a la mejora de la permeabilidad de la solución lixivante en la roca con la aplicación del tensioactivo Kollasol STG LF y proporciona un promedio ponderado de 67,467 % de extracción de

oro.

Figura 30

Análisis de ley de cabeza y ripio por malla valorada con Kollasol STG LF



Nota: La figura muestra la comparación de ley de la prueba 2, ley de cabeza vs ley de ripio vs porcentaje de extracción, dato obtenido de la tabla 4. (2021).

4.5. DISCUSIÓN

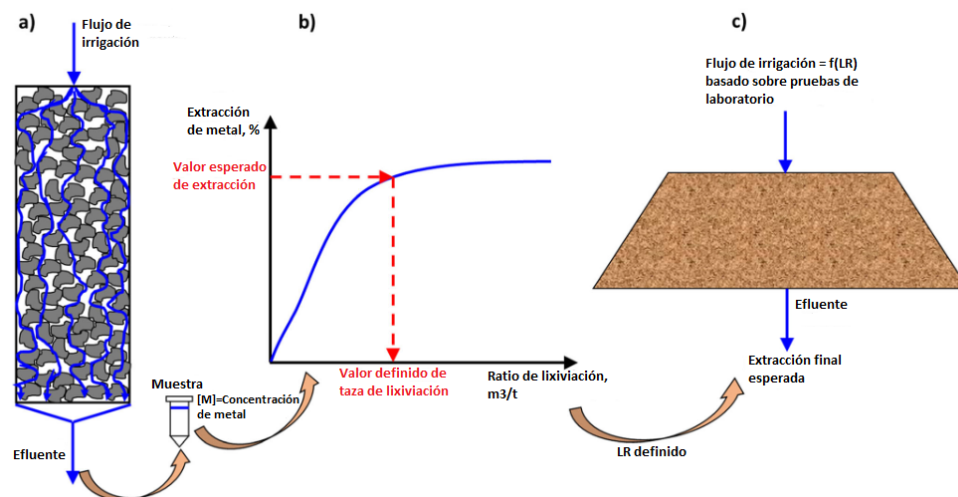
Teniendo en cuenta que el objetivo principal del presente estudio busca lograr una mejora en la permeabilidad de la solución de cianuro en la roca con tenencia de oro refractario con la utilización de un nuevo surfactante no iónico denominado Kollasol STG LF se logró una respuesta

favorable que confirma la hipótesis planteada al lograr bajar la tensión superficial al valor técnicamente aceptable, por consiguiente, se logró obtener una extracción de oro de 7,81 % mayor a la prueba de cianuración convencional y mejorar la cinética de lixiviación (lo que ayuda a acortar el tiempo de lixiviación y reducir el consumo de cianuro) como se muestra en la figura 26.

Estos resultados permiten escalar a la siguiente etapa de pilotaje o industrial siguiendo el esquema propuesto por Estay y Díaz-Quesada, mostrado en la figura 31.

Figura 31

Esquema de aplicación de pruebas para escalamiento

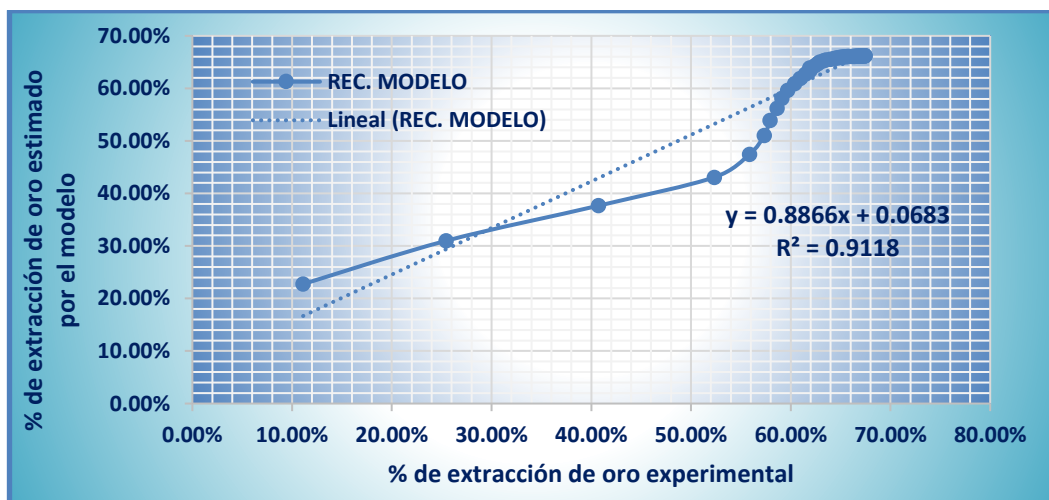


Nota: Procedimiento esquemático para obtener las curvas de extracción de oro a partir de (a) los ensayos de columnas de lixiviación, (b) construcción de las curvas de extracción en función del LR para definir el valor del LR para el escalado, y (c) aplicación del valor del LR seleccionado a escala industrial. Adaptado de Estay & Díaz-Quesada, 2020. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00243-4>

Por otro lado, los resultados experimentales y los valores predichos obtenidos mediante los modelos ajustados se presentan en la tabla 9. Los valores predichos fueron razonablemente comparables con los experimentales, con un coeficiente de correlación lineal de $R^2 = 0,91$ (figura 32), que es un valor estadístico y técnicamente aceptable para este tipo de mineral refractario de media y alta sulfuración (Teimouri et al. 2020).

Figura 31

Relación entre los valores experimentales y los predichos de extracción de oro



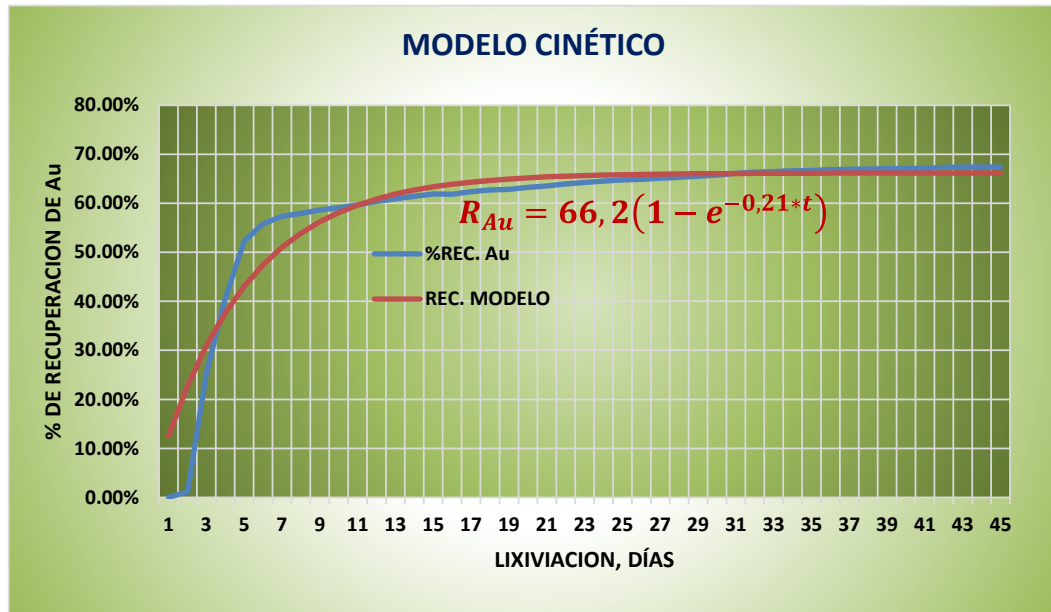
Nota: El estadístico R^2 de la correlación es aceptable.

De otro lado, se tiene que al emplear un modelo cinético de primer orden y modelar el proceso con el uso del tensioactivo Kollasol STG LF, proporciona una respuesta de lixiviación rápida en los primeros días, tal como se puede apreciar en la figura 33, pero al pasar de los días, la

lixiviación se hace más lenta y la tendencia de la curva empieza a decaer.

Figura 32

Modelo del proceso cinético con el uso de Kollasol



Nota: Se muestra el modelo químico-cinético del proceso con Kollasol, 2021.

El modelo cinético de primer orden obtenido con los datos de la tabla 8 en el anexo 3, está dado por la siguiente expresión:

$$R_{Au} = 66,2(1 - e^{-0,21*t}) \quad [24]$$

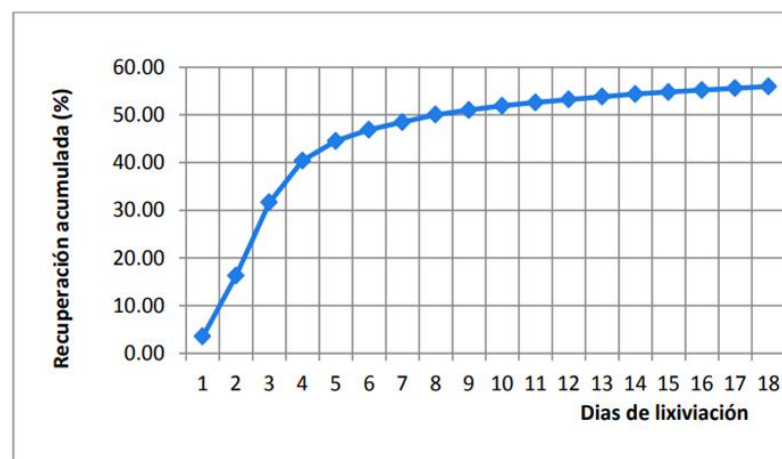
Que da una recuperación máxima de oro en el PLS de 66,2 % y un tiempo óptimo de 23,8 días de lixiviación.

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Alonso (2014) con el surfactante Kollasol STG, se contrasta que con este tensioactivo logra

bajar la tensión superficial a 36 mN/m. La recuperación de oro calculada es 10 % más con el surfactante Kollasol STG, asimismo, se acorta el tiempo de lixiviación en el pad, con solo 9 días de operación, lo que pone en evidencia que hay una diferencia tecnológica entre ambos procesos debido a que los minerales que contienen al oro son diferentes en su estructura por ser la mina Pucamarca una diatrema perteneciente a un yacimiento epitermal de media y alta sulfuración, de ahí que, tecnológicamente se puede observar que guarda similitud en el hecho de mostrar una mejora en la cinética de la lixiviación del oro, como se muestra en la figura 34 que corresponde al trabajo de tesis realizado por Alonso, 2014.

Figura 33

Recuperación acumulada vs días de lixiviación con Kollasol STG



Nota: La figura muestra la recuperación acumulada vs el tiempo de lixiviación. Alonso, 2014.

En consecuencia, este resultado configura una relación tecnológica

parecida con los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación aplicando el tensoactivo Kollasol STG LF que también mejora el porcentaje de extracción de oro y su cinética de lixiviación y dándole un mayor rendimiento metalúrgico al cianuro, lo que permite, con total certeza su escalamiento a las etapas de pilotaje o aplicación industrial. Se deja constancia, que el oro se encuentra también en el silicato, por lo que, se requiere investigar el uso de fluoruro de sodio, sustancia que disuelve al silicato y deja libre al oro para ser disuelto por el cianuro y evaluarlo desde el punto de vista técnico y económico.

4.6. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

La percolabilidad del lixivante con el uso del Kollasol STG LF influye significativamente en la mejora de extracción de oro en la unidad minera Pucamarca-MINSUR.

H1 = El uso del Kollasol STG LF disminuye la tensión superficial de la solución lixivante a 36 mN/m, hay una mayor mojabilidad del mineral y como consecuencia hay una mejora en la extracción de oro.

Ho = El uso del Kollasol STG LF no disminuye la tensión superficial de la solución lixivante, no hay una mayor mojabilidad del mineral y como consecuencia no hay una mejora en la extracción de oro.

En conformidad con los resultados obtenidos utilizando el

tensoactivo Kollasol STG LF se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis de investigación (H_1).

CONCLUSIONES

Se demostró que en el proceso de lixiviación aplicando tensioactivo Kollasol STG LF a 60 ppm de NaCN se logró una mayor extracción de oro, aumentando 7,81 % de extracción de oro.

Se reduce la tensión superficial de la solución mejorando la percolabilidad (permeabilidad) del mineral y aumento de la mojabilidad del mismo.

Se logró mejorar la cinética de lixiviación de oro, reduciendo el tiempo de lixiviación de 39 días a 8 días.

Se logró bajar el consumo de cianuro de sodio aplicando el tensioactivo Kollasol STG LF a 0,589 g de NaCN de diferencia a la prueba de cianuración convencional.

RECOMENDACIONES

Se invita al jefe encargado del laboratorio metalúrgico de la unidad minera Pucamarca, continuar con las pruebas usando los otros tipos de alteraciones.

Se invita al supervisor del laboratorio metalúrgico a seguir investigando sobre el tensoactivo Kollasol STG LF, a hacer pruebas con las tensiones para tratar de conseguir mejores resultados en otras condiciones.

Se invita a los operadores del laboratorio metalúrgico a hacer pruebas bajando el tiempo de lixiviación de las columnas empleando el tensoactivo Kollasol STG LF con otros tipos de alteraciones de mineral.

Se invita a los operadores del laboratorio metalúrgico a optimizar el gasto de cianuro en las pruebas en columnas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ashane, W., Lankoon, I., Gobal Krishnan, S. y Chokshi, V. (2019). *The effects of packing shape and structure on liquid distribution of heap leaching systems: Addition of PCBs as non-ore particles*. Hydrometallurgy 187, 149-157.

<https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.05.010>

Cegarra, J. (2004). *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Ediciones Diez de Santos. Madrid.

Codelco. (Setiembre 27, 2019).

https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf

Codelco. (Octubre 15, 2019). *Codelco Educa*. Obtenido de

https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005316/lixiviacion_media_t_cnico_080119.pdf

Chun-Ming Ai, Ping-Ping Sun, Ai-Xiang Wu, Xun Chen y Chao Liu. (2019). *Accelerating leaching of copper ore with surfactant and the analysis of reaction kinetics*. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials Volume 26, Number 3, March 2019, p. 274.

<https://doi.org/10.1007/s12613-019-1735-7>

- Enciclopedia Británica. (1998). *Hydrometallurgy*.
<https://www.britannica.com/technology/hydrometallurgy/additional-info#history>
- Escalante, D. S. (2016). *Efecto de la concentración de cianuro y la granulometría de un mineral oxidado, en la recuperación de oro mediante lixiviación por agitación*. Cajamarca: Repositorio UPN.
- Estay, H. y Díaz-Quesada, S. (2020). *Deconstructing the Leaching Ratio*. Mining, Metallurgy & Exploration. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00243-4>
- Ekrem, A., Girgin, S., Önal, G. y Zeki, M. (1998) *The truth about cyanidation process and its environmental effects on gold mining*. Istanbul Technical University, Mining Faculty. Mineral & Coal Processing Section, 80626, Maslak/İstanbul-Turkey.
https://www.researchgate.net/publication/318340348_The_truth_about_cyanidation_process_and_its_environmental_effects_on_gold_mining
- Fu, X., Chen, Bao, Z., Wang, R. y Hu, Y. (2010). Study on the wetting ability of class a foam extinguishing agent, *Fire Sci. Technol.*, No. 2, p. 131.
- Gay, L. y Mills, G. (1996). *Educational Reaserch: competencies for analysis and applications*. New Jersey. Estados Unidos: Prentice Hall Inc.

- Guo, P., Jiao, S., Chen, F., He, J., Li, Y. y Zeng, H. (2012). *Optimization and oil displacement efficiency of non-ionic low molecular surfactant, Oil Drill. Prod. Technol.*, 34(2012), No. 2, p. 81.
- Hernández, S., Fernández, R. y Baptista, C. (2010). *Metodología de la Investigación*. Mexico: Mc Graw Hill, Quinta edición.
- Isidro P, H. (2018). *Pruebas de cianuración en botellas y columnas para minerales mixtos auríferos en la empresa minera j.j.inversiones minera sac en abancay*. Tacna.
- Ráfales L, E. (1993). *Metodología de la investigación técnico - científica* . Moscu: Edit Rubiños.
- Lechuga, M. (2005). *Biodegradación y toxicidad de tensioactivos comerciales*.
- Lupo, J. (Mayo, 22, 2009). *Liner system design for heap leach pads*. AMEC Earth and Environmental, 304 Inverness Way South, Suite 490, Englewood, CO 80112, USA.
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.006>
- Martinez, J. A. (2005). *Manejo de pilas de lixiviación de oro en minería Yanacocha S.R.L*. Lima: Repositorio UNMSM.
- Minsur. (Abril, 25, 2016). *minsur.com* . Obtenido de <https://www.minsur.com/nuestras-operaciones/unidad-minera-pucamarca/>

- Misari, F. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: s.e.
- Pablo, E. J. (2012). *Determinación Experimental de Tensión Superficial del agua en cámara micro-reológica*. Madrid.
- Sanchez, V. D. (2014). *Uso de surfactantes y su influencia en la recuperacion de minerales oxidados de oro en procesos de lixiviacion en pilas*. Lima: Repositorio UNI.
- Suman, S., Kumar, A. y Harish, M. (2019). *Unit processes in hydrometallurgy: leaching, purification of leach liquor*. MME09MT 1403 Pemunit Processes In Hydrometallurgy Leaching, Purification Of Leach Liquor.pdf (nitjsr.ac.in)
- Teimouri, S., Mawire, G., Potgieter, J.H., Simate, G. S. van Dyk, L. y Dworzanowski, M. (2020) *Using experimental design and response surface methodology (RSM) to optimize gold extraction from refractory sulphidic gold tailings with ionic liquids*.
<http://dx.doi.org/10.17159/2411-9717/1068/2020>
- Velasquez, M. A. (2016). *Comparación teórica del uso de un compuesto activo en un detergente líquido lavavajillas de alta biodegradabilidad y baja toxicidad a partir de tensioactivos aniónicos y no iónicos*. Pereira.
- Velasquez, M. A. (2016). *Comparación teórica del uso de un compuesto activo en un detergente líquido lavavajillas de alta*

*biodegradabilidad y baja toxicidad a partir de tensioactivos
aniónicos y no iónicos. Pereira.*

Yang, J., Tan, Y., Wang, Z., Shang, Y. y Zhao, W. (2007). *Study on the coal
dust surface characteristics and wetting mechanism*, J. China Coal
Soc., No. 7, p. 737.

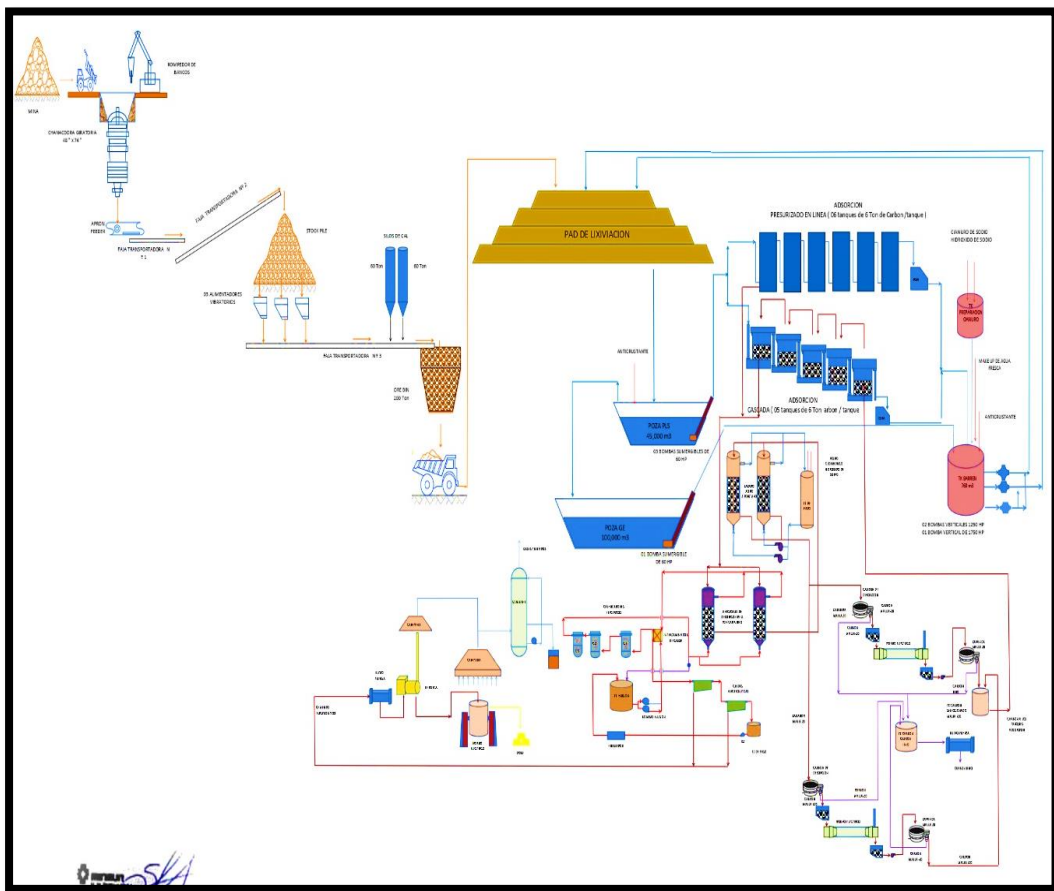
ANEXOS

ANEXO 1

Diagrama de flujo de la unidad minera Pucamarca

Figura 1

Diagrama de flujo de los procesos que se realiza en la U.M Pucamarca.



Nota: La imagen muestra un diagrama de flujo del proceso que se realiza en la U.M Pucamarca. Fuente: Archivos de la U.M Pucamarca (2021).

ANEXO 2

Recolección de datos de las pruebas experimentales

Tabla 1

Data de la prueba de lixiviación estándar en columna

DÍAS DE LIXIVIAC	SOLUCIÓN LIXIVIANTE				SOLUCIÓN PREGNANT				
	Peso (kg)	pH	CN ⁻ (ppm)	TENSIÓN SUPERF	Peso (kg)	pH	CN ⁻ (ppm)	TENSIÓN SUPERF	Au (g/m ³)
1	7,60	10,95	60,8	73					
2	7,60	10,87	61,0	73	0,30	11,37	48,8	73,0	3,410
3	7,60	10,80	60,0	74	7,92	11,81	61,4	72,0	2,570
4	7,35	10,90	61,0	74	6,75	11,70	104,2	73,0	1,824
5	7,60	10,89	61,8	74	8,39	11,33	103,2	73,0	0,987
6	7,60	10,75	61,4	74	5,11	12,40	94,60	73,0	0,790
7	6,87	10,89	60,4	74	5,14	11,20	80,60	73,0	0,456
8	7,16	11,03	61,0	75	6,65	11,23	78,60	73,5	0,283
9	7,25	10,75	62,2	72	6,30	11,32	75,00	75,0	0,171
10	7,21	10,80	60,2	73	6,35	11,20	81,60	75,0	0,131
11	7,48	10,98	61,4	74	6,60	11,12	43,00	75,0	0,105
12	7,33	10,97	61,0	72	6,61	10,82	31,20	75,0	0,098
13	7,60	10,99	61,8	72	6,30	10,90	26,00	74,0	0,076
14	7,60	10,98	61,4	73	8,72	10,73	25,20	75,0	0,066
15	7,60	11,15	60,4	74	6,63	10,65	25,40	74,0	0,063
16	7,60	10,09	61,0	74	6,21	10,70	20,20	74,2	0,060
17	3,37	10,18	62,2	74	7,66	10,67	20,20	74,0	0,061
18	6,50	10,80	60,2	74	6,14	10,47	11,40	74,4	0,050

Continuación de la tabla 1

19	7,60	10,94	61,4	74	6,27	10,01	17,80	74,0	0,064
20	7,60	10,62	61,0	74	7,84	10,35	22,60	74,0	0,049
21	7,60	10,58	60,2	74	6,94	10,47	21,00	74,2	0,034
22	7,60	10,63	60,8	74	6,78	10,39	22,20	74,0	0,048
23	7,60	10,72	60,2	74	7,47	10,48	17,00	73,0	0,043
24	7,60	10,74	60,0	74	5,72	10,10	12,00	73,0	0,042
25	7,60	10,62	61,2	74	5,47	10,50	14,40	73,0	0,037
26	7,60	10,64	60,8	75	6,51	10,64	15,80	70,9	0,031
27	7,60	10,63	60,4	71	6,42	10,80	15,80	71,0	0,040
28	7,60	10,65	60,8	74	6,80	10,28	17,20	75,0	0,039
29	6,27	10,67	60,2	73	5,72	10,87	16,00	73,5	0,033
30	7,60	10,69	59,6	74	5,41	10,88	17,00	74,2	0,037
31	7,60	10,89	59,6	75	6,41	10,84	15,20	74,8	0,047
32	7,29	10,54	60,2	74	6,82	10,57	18,20	74,5	0,037
33	7,60	10,26	60,6	74	6,9	10,50	20,60	73,5	0,032
34	6,37	10,48	60,4	74	6,9	10,74	16,20	74,2	0,037
35	7,60	10,47	58,6	74	6,0	9,78	17,20	74,8	0,036
36					7,1	9,94	16,80	74,5	0,039
37					6,7	9,84	9,20	73,5	0,019
38					6,0	10,08	3,00	74,2	0,011
39					1,5	10,05	4,20	74,8	0,004

Nota: La tabla muestra los controles realizados durante la prueba estándar en columna.

Continuación Tabla 1

FINOS EN SOLUCIÓN	FINOS ACUMULADOS (mg)	EXTRACCIÓN
Au (mg)	Au	Au (%)
0	0	0,00
0,461	0,46	0,53
19,792	20,25	23,17
11,750	32,00	36,61
7,668	39,67	45,38
3,406	43,08	49,27
1,713	44,79	51,23
1,312	46,10	52,73
0,798	46,90	53,65
0,585	47,48	54,32
0,448	47,93	54,83
0,393	48,33	55,28
0,230	48,55	55,54
0,317	48,87	55,90
0,159	49,03	56,09
-0,076	48,96	56,00
0,321	49,28	56,37
0,240	49,52	56,64
0,313	49,83	57,00
0,281	50,11	57,32
0,133	50,24	57,47
0,222	50,46	57,72
0,124	50,59	57,87
0,043	50,63	57,92
0,005	50,64	57,92
0,004	50,64	57,93
0,059	50,70	57,99
0,068	50,77	58,07
-0,009	50,76	58,06
0,031	50,79	58,10
0,198	50,99	58,32
0,139	51,13	58,48
0,024	51,15	58,51
0,048	51,20	58,56
0,037	51,24	58,61
0,079	51,31	58,70
0,130	51,44	58,85
0,064	51,51	58,92
0,006	51,52	58,93

Nota: Continuación de la tabla 1.

Tabla 2*Data de la prueba de lixiviación en columna aplicando el tensoactivo**Kollasol STG LF*

DÍAS DE LIXIVIAC	SOLUCIÓN PREGNANT				SOLUCIÓN PREGNANT				
	Peso (kg)	pH	CN ⁻ (ppm)	TENSIÓN SUPERF	Peso (kg)	pH	CN ⁻ (ppm)	TENSIÓN SUPERF	Au (g/m ³)
1	7,60	10,95	61	36,5					
2	7,60	10,87	62	36,5	0,30	11,15	14,2	68,0	5,64
3	7,60	10,80	61	37,5	8,11	11,88	25,4	51,5	3,15
4	7,18	10,90	61	36,5	7,32	11,52	31,8	47,8	2,22
5	7,60	10,89	62	38,0	8,41	11,11	31,4	42,8	1,489
6	7,60	10,75	61	37,0	4,66	12,73	33,00	43,0	0,912
7	7,60	10,89	61	39,0	4,70	11,83	19,40	42,4	0,457
8	7,08	11,03	61	38,0	6,07	10,83	20,60	43,8	0,203
9	6,96	10,75	61	72	5,65	10,87	19,80	43,0	0,174
10	7,09	10,80	61	73	6,09	10,83	19,40	45,0	0,122
11	7,06	10,98	60	74	5,90	10,79	21,80	45,0	0,138
12	7,37	10,97	61	72	6,00	10,86	24,00	45,0	0,161
13	7,60	10,99	62	72	5,73	10,60	20,40	52,0	0,142
14	7,60	10,98	61	73	8,06	10,48	21,20	54,0	0,102
15	7,60	11,15	60	74	6,30	10,50	21,80	62,0	0,113
16	7,60	10,09	61	74	5,90	10,10	19,60	65,0	0,070
17	7,60	10,18	62	74	6,87	10,20	16,80	70,0	0,098
18	7,60	10,80	60	74	6,22	10,05	16,60	73,0	0,077
19	7,60	10,94	61	74	6,07	10,85	37,00	70,0	0,041
20	7,60	10,62	61	74	7,79	10,94	18,80	72,0	0,065

Continuación de la tabla 2

21	7,60	10,58	60	74	6,12	10,89	15,20	72,5	0,065
22	7,60	10,63	61	74	6,80	9,95	19,20	72,0	0,080
23	6,83	10,72	60	74	6,89	9,94	15,40	72,0	0,060
24	6,58	10,74	60	74	5,85	10,56	33,00	73,0	0,062
25	7,60	10,62	61	74	6,38	10,14	20,60	73,0	0,051
26	7,60	10,64	61	75	6,17	10,32	13,40	72,6	0,043
27	7,60	10,63	60	71	6,21	10,29	14,00	71,0	0,048
28	7,60	10,65	61	74	6,12	9,79	18,20	75,0	0,055
29	7,60	10,67	60	73	6,39	10,18	18,40	75,0	0,053
30	7,60	10,69	60	74	5,88	10,32	15,60	73,2	0,052
31	7,60	10,89	60	75	7,17	10,10	10,20	74,1	0,064
32	7,60	10,54	60	74	6,50	9,88	15,00	74,0	0,056
33	7,60	10,26	61	74	6,30	9,90	16,00	74,0	0,053
34	7,60	10,48	60	74	6,80	9,29	16,20	74,0	0,054
35	7,60	10,47	59	74	6,63	9,10	12,20	74,0	0,047
36	7,60	10,39	60	74	7,10	9,52	14,20	74,0	0,049
37	7,60	10,59	59	74	6,47	9,45	8,60	74,0	0,037
38	7,60	10,35	59	74	7,09	10,09	13,20	74,0	0,040
39	7,60	10,51	59	73	6,70	9,68	10,40	74,0	0,030
40	7,60	10,66	60	74	6,49	9,91	11,00	74,0	0,034
41	7,60	11,27			6,50	10,34	12,40	74,0	0,039
42	7,60	11,10			6,65	9,45	9,00	74,0	0,032
43					7,20	10,20	6,00	74,0	0,010
44					1,10	9,38	2,20	74,0	0,005
45					0,09	9,01	1,60	74,0	0,04

Nota: La tabla muestra los controles realizados durante la prueba empleando Kollasol en columnas.

FINOS EN SOLUCIÓN	FINOS ACUMULADOS (mg)	EXTRACCIÓN
Au (mg)	Au	Au (%)
0	0	0,00
1,130	1,13	1,09
24,984	26,11	25,17
15,681	41,79	40,29
11,927	53,72	51,78
3,619	57,34	55,27
1,517	58,86	56,73
0,601	59,46	57,31
0,707	60,17	58,00
0,506	60,67	58,48
0,573	61,25	59,04
0,726	61,97	59,74
0,563	62,53	60,28
0,564	63,10	60,82
0,454	63,55	61,26
-0,035	63,52	61,23
0,527	64,04	61,73
0,327	64,37	62,05
0,146	64,52	62,19
0,403	64,92	62,58
0,294	65,21	62,86
0,441	65,65	63,29
0,310	65,96	63,59

0,270	66,23	63,85
0,236	66,47	64,07
0,162	66,63	64,23
0,195	66,83	64,42
0,233	67,06	64,64
0,235	67,29	64,87
0,202	67,50	65,06
0,356	67,85	65,41
0,251	68,10	65,65
0,129	68,23	65,77
0,162	68,39	65,93
0,099	68,49	66,02
0,150	68,64	66,17
0,057	68,70	66,22
0,101	68,80	66,32
0,034	68,84	66,35
0,053	68,89	66,40
0,033	68,92	66,44
0,213	69,13	66,64
0,074	69,21	66,71
0,006	69,21	66,72
0,004	69,22	66,72

Nota: Continuación de la tabla 2.

Tabla 3*Evaluación cinética de extracción de oro con surfactante Kollasol STG LF*

TIEMPO(DIAS)	%REC. Au	REC. MODELO
1		
2	11.07%	22.74%
3	25.44%	30.99%
4	40.72%	37.67%
5	52.34%	43.08%
6	55.87%	47.47%
7	57.35%	51.02%
8	57.94%	53.90%
9	58.62%	56.24%
10	59.12%	58.13%
11	59.68%	59.66%
12	60.38%	60.90%
13	60.93%	61.91%
14	61.48%	62.72%
15	61.92%	63.38%
16	61.89%	63.92%
17	62.40%	64.35%
18	62.72%	64.70%
19	62.86%	64.98%
20	63.26%	65.22%
21	63.54%	65.40%
22	63.97%	65.55%
23	64.27%	65.68%
24	64.54%	65.78%
25	64.77%	65.86%
26	64.92%	65.92%
27	65.11%	65.97%
28	65.34%	66.02%
29	65.57%	66.05%
30	65.77%	66.08%
31	66.11%	66.10%
32	66.36%	66.12%
33	66.48%	66.14%
34	66.64%	66.15%
35	66.74%	66.16%
36	66.88%	66.17%
37	66.94%	66.17%
38	67.04%	66.18%
39	67.07%	66.18%
40	67.12%	66.19%
41	67.16%	66.19%
42	67.36%	66.19%
43	67.44%	66.19%
44	67.44%	66.19%
45	67.44%	66.19%

Anexo 3

Figura 2

Hoja de datos de seguridad de la cal hidratada

	HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD DEL PRODUCTO	Fecha: 04-08-2014 Rev. : 02 Página: 1 de 5 Autor: E.Q.M.			
	CAL HIDRATADA				
COPIA Nro. _____ ASIGNADA A: COPIA NO CONTROLADA					
SECCION 1: IDENTIFICACION DE PRODUCTO Y LA COMPANIA					
Nombre del Producto	Hidróxido de Calcio.				
Nombre Comercial	Cal Hidrata				
Marca	INTICAL				
Uso de Producto	Insumo Químico				
Fabricante	Cal y Cemento Sur S.A. Juliaca (051)-328544 – 328545. Arequipa (054)-225000 – 222525.				
		Rótulo NFPA 			
SECCION 2: COMPOSICION / INFORMACION SOBRE COMPONENTES					
Nombre Químico:	Número de CAS	Porcentaje			
Dióxido de silicio (SiO ₂)	14808-60-7	4.0 - 5.5 %			
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	1377-28-1	1.0 - 1.7 %			
Hidróxido de calcio (Ca(OH) ₂)	1305-62-0	>80.0 %			
Óxido de magnesio (MgO)	1309-48-4	1.2 - 2.0 %			
Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	-	0.40 - 1.0 %			
SECCIÓN 3: IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS					
Contacto con los Ojos	Corrosivo. Irritación severa dependiendo del contacto. Una sobreexposición puede producir dolor, coloración roja, ardor de la córnea y ulceración con posible daño permanente, quemaduras químicas.				
Contacto con la Piel	Corrosivo. El contacto prolongado y repetido con el material en forma de polvo o húmedo puede producir erupción cutánea, piel seca, dermatitis y quemaduras químicas.				
Inhalación	La respiración del polvo puede causar irritación en la membrana mucosa de la nariz, por exposición crónica puede causar silicosis, lesión en el tabique nasal, garganta, tos y bronquitis genérica.				
Ingestión	Irritante gástrico, puede causar quemaduras en la boca, garganta y el estómago. Corrosiva. La ingestión puede producir ulceración y ardor en la boca y garganta, náuseas, vómitos, dolor abdominal y diarrea.				
ELABORADO POR:	FECHA	REVISADO POR:	FECHA	APROBADO POR:	FECHA
E.Q.M.	02-08-14	W.L.L.F.	04-08-14	J.L.H.	04-08-14
FIRMA		FIRMA		FIRMA	
					

Nota: Archivos de la U.M Pucamarca, 2021.

Anexo 4

Figura 3

Hoja de datos de seguridad del cianuro de sodio

COD. 201515

HOJA DE DATOS DE SEGURIDAD

Sodium Cyanide Briquette



Versión: 1.4 Fecha de revisión: 13.06.2017 Número de HDS: 1638479-0005 Fecha de la última revisión: 27.05.2017
Fecha de la primera emisión: 05.05.2017

1. IDENTIFICACIÓN DE LA SUSTANCIA QUÍMICA PELIGROSA O MEZCLA Y DEL PROVEEDOR O FABRICANTE

Nombre del producto : Sodium Cyanide Briquette

SDS-identcode : 13000000101

Informaciones sobre el fabricante o el proveedor

Compañía : The Chemours Company FC, LLC

Domicilio : 1007 Market Street
Wilmington, DE 19899 Estados Unidos de América (EE.UU.)

Teléfono : (52) (55) 5125-4907

Teléfono de emergencia : Emergencia médica: (Rocky Mountain - E.E.U.U.) 1 302 773 2000 ; Emergencia de transporte: (CHEMTREC - E.E.U.U.) 1 703 527 3887

Dirección de correo electrónico : Infolatam@chemours.com

Uso recomendado del producto químico y restricciones de uso

Uso recomendado : Intermediario aislado transportado usado bajo condiciones estrictamente controladas.
Producto químico intermedio
Formulación
Productos de tratamiento de superficies metálicas, incluyendo productos galvanicos y para la galvanoplastia
Agente desengrasante
Limpieza
Endurecedor
Agentes de recubrimiento y agentes para el tratamiento de superficies de metal
Productos de tratamiento de superficie no-metálicos
Inhibidor
Agentes de extracción
Valorización
Ayuda para procesamiento, minería


Restricciones de uso : Utilizado en la producción de armas o narcóticos
Ayuda de Pesca
Plaguicidas
Fertilizantes
Desinfectantes
Usos para el consumidor: Hogares privados (= público en general = consumidores)
Únicamente para uso profesional.

Nota: Archivos de la U.M Pucamarca,2021.

Anexo 5

Figura 4

Hoja de datos de seguridad del Kollasol STG-LF

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD de acuerdo con el Reglamento (CE) No. 1907/2006		
KOLLASOL STG-LF		
Versión 1.0	Fecha de revisión: 13.08.2019	Fecha de la última emisión: - Fecha de primera emisión: 13.08.2019
SECCIÓN 1: Identificación de la sustancia / mezcla y de la sociedad / empresa		
1.1 Identificador de producto		
Nombre comercial	: KOLLASOL STG-LF	
1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o mezcla y usos desaconsejados		
Uso del Sub- postura / mezcla	: Detergentes	
1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad		
Proveedor de fabricante		
CHT Germany GmbH Bismarckstraße 102 72072 Tubinga Alemania Tel.: +49 7071 154 0 info@cht.com	CHT Switzerland AG Kriessemstrasse 20 9462 Montlingen Suiza Tel.: +41 71763 88 11 info.switzerland@cht.com	
Importador	: - - - - -	
Departamento responsable	: CHT Germany GmbH CHT Switzerland AG Seguridad del producto sds.germany@cht.com sds.switzerland@cht.com	
1.4 número telefónico de emergencia		
Teléfono de emergencia número	: +49 7071 154 0 (Alemania, 24 horas) + 41 71763 88 11 (Suiza, 24 horas)	

SECCIÓN 2: Identificación de peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o mezcla

Clasificación (REGLAMENTO (CE) No 1272/2008)

Daño ocular grave, categoría 1	H318: Provoca lesiones oculares graves.
Peligro acuático a largo plazo (crónico), categoría 3	H412: Nocivo para los organismos acuáticos con efectos duraderos.

Nota: Archivos de la U.M Pucamarca,2021.