



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Recuperación de plata mediante el proceso Merrill-
Crowe de una solución lixiviada del mineral argentífero
con Sandioss, Shupluy – Ancash**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Jhon Jairo RAMOS GUTIERREZ

Heitan Ernesto MINA ORE

ASESOR

Dr. Vidal Sixto ARAMBURÚ ROJAS

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Ramos, J. & Mina, H. (2025). *Recuperación de plata mediante el proceso Merrill-Crowe de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss, Shupluy – Ancash*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Jhon Jairo Ramos Gutierrez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	70493963
URL de ORCID	No aplica
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Heitan Ernesto Mina Ore
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	75228276
URL de ORCID	No aplica
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08608364
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-5818-8569
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Daniel Florencio Lovera Dávila
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Vladimir Alejandro Arias Arce
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	07009405
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Luis Vidarte Merizalde
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07397539
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.16 Lixiviación de Minerales
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Lima Centro poblado: Ciudad Universitaria de Lima Urbanización: Los Cipreses Manzana y lote: No aplica Calle: Germán Amézaga N°375 Latitud: -12.05611 Longitud: -77.08444
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2023 - 2025
URL de disciplinas OCDE	Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05 Otras ingenierías y tecnologías https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.02



«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 28, del mes de abril del 2025 siendo las 11:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila

(PRESIDENTE)

Dr. VLADIMIR ALEJANDRO, Arias Arce

(MIEMBRO)

Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «**RECUPERACIÓN DE PLATA MEDIANTE EL PROCESO MERRIL-CROWE DE UNA SOLUCIÓN LIXIVIADA DEL MINERAL ARGENTÍFERO CON SANDIOSS, SHUPLUY-ANCASH**» presentada por Don: HEITAN ERNESTO MINA ORE, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis Mancomunada, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....(14) *Aprobado*.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Heitan Ernesto Mina Ore**.

Siendo las *12:05* horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 28 de abril de 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA
Presidente


Dr. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS MANCOMUNADA PARA OPTAR TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el lunes 28, del mes de abril del 2025 siendo las 11:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila

(PRESIDENTE)

Dr. VLADIMIR ALEJANDRO, Arias Arce

(MIEMBRO)

Ing. JOSÉ LUIS, Vidarte Merizalde

(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación de la TESIS MANCOMUNADA Titulada: «**RECUPERACIÓN DE PLATA MEDIANTE EL PROCESO MERRIL-CROWE DE UNA SOLUCIÓN LIXIVIADA DEL MINERAL ARGENTÍFERO CON SANDIOSS, SHUPLUY-ANCASH**» presentada por Don: JHON JAIRO RAMOS GUTIERREZ, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación de Tesis Mancomunada, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....(14) # Probado.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis Mancomunada por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Jhon Jairo Ramos Gutierrez**.

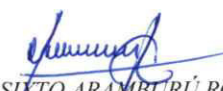
Siendo las **12:15** horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Tesis Mancomunada.

Lima, 28 de abril de 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DAVILA
Presidente


Dr. VLADIMIR ALEJANDRO ARIAS ARCE
Miembro


Ing. JOSÉ LUIS VIDARTE MERIZALDE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
ASESOR DE TESIS



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N.º000059-2024-D-FIGMMG/UNMSM de la tesis mancomunada, cuyo título es "RECUPERACIÓN DE PLATA MEDIANTE EL PROCESO MERRILL-CROWE DE UNA SOLUCIÓN LIXIVIADA DEL MINERAL ARGENTÍFERO CON SANDIOSS, SHUPLUY - ANCASH" presentado por los bachilleres **JHON JAIRO RAMOS GUTIERREZ y HEITAN ERNESTO MINA ORE** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el **15%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional.**

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 10 de octubre de 2024

Firma del Asesor

Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS

DNI: 08608364

ÍNDICE

RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	ix
NOMENCLATURA	xi
LISTA DE TABLAS	xii
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
CAPÍTULO I: Introducción	1
CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema	2
2.1. Descripción de la Problemática.....	2
2.2. Problemática de la Investigación	2
2.2.1. Problema General	2
2.2.2. Problemas Específicos	3
2.3. Justificación de la Investigación	3
2.4. Objetivos de la Investigación	4
2.4.1. Objetivos Generales	4
2.4.2. Objetivos Específicos.....	4
2.5. Hipótesis y Variables	5
2.5.1. Hipótesis General.....	5
2.5.2. Hipótesis Específicas	5
2.5.3. Identificación de Variables	6
2.5.4. Operacionalización de Variables	7
CAPÍTULO III: Marco Teórico.....	9
3.1. Antecedentes de la Investigación.....	9
3.2. Bases Teóricas	13
3.2.1. Minerales de Plata.....	13

3.2.1.1.	Depósitos de Minerales de Plata	15
3.2.2.	Lixiviación de Minerales	16
3.2.2.1.	Lixiviación de Plata	17
3.2.2.2.	Lixiviantes Ecológicos (Eco amigable)	23
3.2.3.	Merril Crowe	26
3.2.3.1.	Clarificación.....	27
3.2.3.2.	Desaereación	28
3.2.4.	Precipitación y Filtración	29
3.2.4.1.	Variables en la Precipitación de Zinc	31
3.2.5.	Producción de Plata	32
3.2.5.1.	Internacional	32
CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación		35
4.1.	Tipo y Diseño de Investigación	35
4.2.	Unidad de Análisis.....	36
4.2.1.	Ubicación.....	36
4.2.2.	Vías de Acceso.....	37
4.3.	Población de Estudio	38
4.4.	Tamaño de Muestra	38
4.5.	Procedimiento Metodológico de la Investigación.....	38
CAPÍTULO V: Resultados		39
5.1.	Microscopia del Mineral de Cabeza	39
5.1.1.	Tipos de Enlaces y Posibilidades de Liberación	41
5.2.	Análisis Químico de la Muestra de Cabeza	44
5.3.	Moliendabilidad	44
5.4.	Pruebas de alcalinidad de la pulpa.....	45

5.5.	Lixiviación con Reactivo Sandioss	47
5.5.1.	Evaluación de la granulometría de Lixiviación con Sandioss	47
5.5.2.	Cinética de Lixiviación con Sandioss	50
5.6.	Precipitación de Au-Ag con Polvo de Zinc	53
5.6.1.	Clarificación del PLS	54
5.6.2.	Desoxigenación del PLS	55
5.6.3.	Precipitación con Polvo de Zinc	57
CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados		60
CONCLUSIONES		63
RECOMENDACIONES		65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		66
ANEXOS		70

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas las personas que han sido fundamentales en mi vida y en este recorrido académico.

A mi madre por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado.

A mi hijo Gael, cuya presencia en mi vida me ha dado una razón más para luchar y alcanzar mis metas. Tu sonrisa y amor me llenan de energía y me recuerdan cada día por qué es importante seguir adelante. Eres mi mayor inspiración y mi mayor orgullo.

A mis amigos, por su compañía y por ser un soporte emocional en los momentos difíciles. Su amistad ha sido una fuente de motivación y alegría.

Gracias a todos por ser parte de mi vida y por ayudarme a alcanzar esta meta.

Jhon

Este trabajo está dedicado a mis padres y hermana, quienes me impulsaron a ser cada día; por ayudar a levantarme en cada caída. No me imagino donde estoy ahora sin sus sacrificios por verme progresar.

A mis profesores, mi asesor de tesis, por guiarme y corregirme, los tendré siempre presente.

A mis amigos, compañeros, siempre compartiendo información e ideas, fueron un soporte de una forma u otra.

Heitan

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a nuestro asesor y profesores por su invaluable guía y apoyo durante la realización de esta tesis. Su dedicación y sabiduría han sido esenciales para alcanzar este logro.

A nuestras familias, compañeros y amigos, gracias por su constante colaboración y motivación a lo largo de este viaje académico.

Agradecemos a la Escuela de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por brindarnos las facilidades para realizar en sus instalaciones las pruebas metalúrgicas requeridas para este estudio.

Finalmente, a todos aquellos que de alguna manera contribuyeron a este proyecto, les extendemos nuestra gratitud. Su ayuda y aliento han sido fundamentales.

Los Autores

RESUMEN

La muestra representativa de mineral Argentífero del distrito de Shupluy, en el departamento de Ancash ensayó una ley de 5.23 Oz-Ag/TC y 1.02 g-Au/TM, y el análisis de microscopía óptica determinó la presencia de Ag nativa con una distribución de 0.05%, además de esfalerita, galena argentífera, pirita, marcasita, rutilo y gangas, de las cuales, se pudo observar la mayor distribución de este último, con un valor de 67.47%.

Considerando la mineralogía, se desarrollaron pruebas de lixiviación en botella con reactivo sintético Sandioss en un tiempo de 36 horas, evaluando primero la granulometría de lixiviación se alcanzó recuperaciones de 85.17% de Ag y 88.46% de Au a una granulometría de 95% - 200 Malla, en las cuales se emplearon 200 g. de mineral, 600 ml de H₂O, 300 RPM, pH=12, y un consumo de 6.53 Kg/TM de Sandioss y 1.60 Kg/TM de cal. Las pruebas de cinética determinaron la mayor recuperación en un tiempo de 48 horas, con valores de 86.14% de Ag y 88.89% de Au, con un consumo de 6.97 Kg/TM de Sandioss, y 1.35 Kg/TM de cal.

Basado en los mejores resultados de lixiviación, se desarrollaron pruebas metalúrgicas de precipitación de Ag mediante el proceso Merrill Crowe, para lo cual se preparó la solución y establecer los parámetros de turbidez en función de la dosis de floculante suministrada, y la concentración de oxígeno en solución en función de la presión de vacío. Los mejores resultados de las pruebas de clarificación de la solución demostraron que con una dosis de 12 ml de floculante al 0.01% se alcanzó una turbidez de 0.32 (NTU), así también, la presión de vacío fue de 30 PSI por 5 minutos alcanzó una concentración de oxígeno de 0.61 mg/lit. Habiendo definido los parámetros operacionales se realizaron pruebas de precipitación con polvo de Zn, evaluando la precipitación a distintas concentraciones de oxígeno en solución, alcanzando una recuperación de

99.89% de Ag y 99.58% de Au con una masa de 160.07 mg de polvo de Zinc, para un volumen de 1.5 lt con una concentración de oxígeno de 0.61 mg/lt.

Teniendo en cuenta los mejores resultados de recuperación de Ag en las pruebas de lixiviación con Sandioss y precipitación con polvo de Zn, se alcanzó una recuperación total de 86.05% de Ag, y 88.51% de Au.

ABSTRACT

A representative sample of silver-bearing ore from the Shupluy district in the department of Ancash assayed at 5.23 Oz-Ag/TC and 1.02 g-Au/TM. Optical microscopy analysis determined the presence of native silver with a distribution of 0.05%, along with the presence of ef, gn, py, mt, rt, and GGs, with the latter showing the highest distribution at 67.47%.

Considering the mineralogy, bottle leaching tests were carried out using synthetic Sandioss reagent for a time of 36 hours. The leaching granulometry achieved recoveries of 85.17% Ag and 88.46% Au at a granulometry of 95% -200 mesh. These tests used 200 g of ore, 600 ml of H₂O, 300 RPM, pH=12, with a consumption of 6.53 Kg/TM of Sandioss and 1.60 Kg/TM of lime. Kinetic tests determined the highest recovery in 48 hours, with values of 86.14% Ag and 88.89% Au, with a consumption of 6.97 Kg/TM of Sandioss and 1.35 Kg/TM of lime.

Based on the best leaching results, metallurgical tests were conducted for Ag precipitation through the Merrill Crowe process. The solution was prepared to establish turbidity parameters based on the supplied flocculant dose and oxygen concentration in solution based on suction pressure. The best results from the clarification tests showed that with a dose of 12 ml of 0.01% flocculant, turbidity of 0.32 (NTU) was achieved. Similarly, suction pressure of 30 PSI for 5 minutes reached an oxygen concentration of 0.61 mg/L. With defined operational parameters, precipitation tests using Zn powder were performed, evaluating the precipitation at different oxygen concentrations in solutions, achieving recoveries of 99.89% Ag and 99.58% Au with a mass of 160.07 mg of Zn powder for a volume of 1.5 lt with an oxygen concentration of 0.61 mg/L.

Considering the best recovery results from leaching tests with Sandioss and precipitation with Zn powder, a total recovery of 86.05% Ag and 88.51% Au was achieved.

NOMENCLATURA

ppm	Partes por millón
NTU	Unidad nefelométrica de turbidez
RPM	Revoluciones por minuto
PSI	Libra por pulgada cuadrada
g/TM	Gramos por toneladas métricas
Kg/TM	Kilogramos por toneladas métricas
Oz/TC	Onzas por toneladas cortas
mg/l	Miligramos por litros
ln	Logaritmo neperiano
R	Coefficiente de correlación
Ag	Plata
Au	Oro
ef	Esfalerita
gn	Galena
py	Pirita
mt	Marcasita
rt	Rutilo
GGs	Gangas
pH	Potencial de hidrógeno
PLS	Pregnant leaching solution
S/L	Relación sólido líquido
H ₂ O	Agua
O ₂	Oxígeno gaseoso

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Matriz de Operacionalización de Variables</i>	8
Tabla 2 <i>Composición química del Sandioss</i>	24
Tabla 3 <i>Producción de plata (2022-2023)</i>	32
Tabla 4 <i>Acceso a Shupluy</i>	37
Tabla 5 <i>Especies mineralógicas del mineral de cabeza</i>	39
Tabla 6 <i>Entrelazamientos y su posibilidad de liberación</i>	41
Tabla 7 <i>Leyes reportadas en el análisis químico</i>	44
Tabla 8 <i>Variación de la granulometría en función del tiempo de molienda</i>	44
Tabla 9 <i>pH del medio según el consumo de cal</i>	46
Tabla 10 <i>Balance de la lixiviación a 80% - Malla 200</i>	47
Tabla 11 <i>Balance de la lixiviación a 85% - Malla 200</i>	48
Tabla 12 <i>Balance de la lixiviación a 90% - Malla 200</i>	48
Tabla 13 <i>Balance de la lixiviación a 95% - Malla 200</i>	48
Tabla 14 <i>Balance de la lixiviación a 12 horas</i>	50
Tabla 15 <i>Balance de la lixiviación a 24 horas</i>	50
Tabla 16 <i>Balance de la lixiviación a 36 horas</i>	51
Tabla 17 <i>Balance de la lixiviación a 48 horas</i>	51
Tabla 18 <i>Balance de la lixiviación a 60 horas</i>	51
Tabla 19 <i>Nivel de turbidez según la dosis del floculante</i>	54
Tabla 20 <i>Concentración de oxígeno gaseoso según el PSI</i>	56
Tabla 21 <i>Recuperación de Au y Ag con precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.61$ ppm)</i>	57
Tabla 22 <i>Recuperación de Au y Ag con precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.95$ ppm)</i>	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 <i>Efecto de la concentración de cianuro sobre la rapidez de disolución de la plata</i>	19
Figura 2 Efecto de pH sobre la rapidez de disolución de plata en HCN	21
Figura 3 Gráfico de Recuperación de Au en función del tiempo usando Sandioss.....	25
Figura 4 Gráfico de Recuperación de Au en función del tiempo usando Cianuro	25
Figura 5 Potencias de los metales (nobles y menos nobles)	30
Figura 6 Mecanismo de precipitación de oro.....	31
Figura 7 Producción mensual de plata (2022-2023)	34
Figura 8 Producción de plata según empresas (2023)	34
Figura 9 Metodología de la investigación.....	35
Figura 10 Ubicación de Shupluy	37
Figura 11 Distribución volumétrica de las especies mineralógicas	40
Figura 12 Liberación de las especies mineralógicas	41
Figura 13 <i>Distribución volumétrica de los entrelazamientos</i>	42
Figura 14 <i>Micrografía con presencia de Ag, gn, ef y py</i>	43
Figura 15 <i>Micrografía con presencia de py, ef y GGs</i>	43
Figura 16 <i>Tendencia de la gráfica de moliendabilidad</i>	45
Figura 17 <i>Gráfica de la alcalinidad de la pulpa</i>	46
Figura 18 <i>Gráfico comparativo de las recuperaciones de Au-Ag en función de la granulometría</i>	49
Figura 19 <i>Gráfico comparativo de las recuperaciones de Au-Ag en función del tiempo de lixiviación</i>	52
Figura 20 <i>Gráfico comparativo de los consumos de reactivos en la lixiviación</i>	53

Figura 21	<i>Gráfico comparativo de las pruebas de clarificación</i>	<i>55</i>
Figura 22	<i>Gráfico comparativo de las pruebas de desoxigenación.....</i>	<i>56</i>
Figura 23	<i>Comparativa de la precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.61$ ppm)</i>	<i>58</i>
Figura 24	<i>Comparativa de la precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.95$ ppm)</i>	<i>59</i>

CAPÍTULO I: Introducción

Actualmente, Perú es considerado un notable país polimetálico y la industria del metal juega un papel importante en el panorama tecnológico en la búsqueda de nuevas tecnologías que sustituyan a las ya tradicionales por unas más eficientes, económicas y rentables para separar la plata y el oro de los minerales en el proceso de lixiviación.

El estudio de la aplicación del reactivo Sandioss en la lixiviación de minerales argentíferos abre nuevas perspectivas en la metalurgia extractiva. La sinergia entre los componentes del reactivo permite una disolución eficiente de la plata, superando las limitaciones de los métodos convencionales.

Adicionalmente, para recuperar los metales preciosos contenidos en las soluciones lixiviadas, se pueden emplear diferentes métodos hidrometalúrgicos, como la extracción por solventes, el intercambio iónico con resinas, la precipitación con zinc (proceso Merrill-Crowe) y la adsorción en carbón activado.

El proceso Merrill-Crowe destaca como la técnica más comúnmente empleada en la extracción de oro y plata, gracias a su eficacia y rentabilidad en el ámbito metalúrgico. Para elegir este proceso, se estudia a detalle la solución lixiviada para sacar la mayor cantidad de oro y plata posible a un menor costo y haciendo más fácil el trabajo.

Este estudio tiene dos metas: en primer lugar, realizar la extracción de plata mediante lixiviación con el reactivo Sandioss y, en segundo lugar, evaluar la eficiencia del proceso Merrill-Crowe para obtener precipitado de plata a partir de las soluciones obtenidas en la lixiviación de minerales de plata proveniente del distrito de Shupluy, Ancash.

CAPÍTULO II: Planteamiento del Problema

2.1. Descripción de la Problemática

La plata, al ser un metal de gran valor económico, demanda la implementación de innovaciones tecnológicas en los procesos hidrometalúrgicos. Estas nuevas tecnologías deben garantizar la seguridad y eficacia en la extracción de plata a partir de minerales argentíferos, con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos.

Los procesos hidrometalúrgicos de extracción de plata en Perú se basan en el uso de reactivos químicos altamente tóxicos. Si bien estos reactivos permiten recuperar el metal, su manejo, transporte y disposición final representan desafíos considerables debido a los riesgos que implican para la salud humana y el ecosistema.

Ante los desafíos tecnológicos, ambientales y económicos del presente y futuro, se requiere la identificación y utilización de reactivos lixiviantes de plata que, además de ser eficientes, sean seguros para la salud y el medio ambiente, de bajo costo y fácil adquisición.

Por ello, el presente trabajo investigativo tuvo como objetivo principal evaluar la eficacia del reactivo Sandioss en la lixiviación de minerales argentíferos. Posteriormente, se aplicó el proceso Merrill Crowe a la solución obtenida con el fin de determinar su capacidad para precipitar la plata metálica.

2.2. Problemática de la Investigación

2.2.1. Problema General

- ¿De qué forma el proceso Merrill-Crowe permitirá recuperar plata a partir de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash?

2.2.2. Problemas Específicos

- ¿De qué manera la caracterización identificará los minerales de valor económico, su distribución, grados de liberación y enlaces presentes en el mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash?
- ¿Cómo podemos recuperar solución de plata empleando el proceso de lixiviación con Sandioss del mineral argentífero proveniente del distrito de Shupluy, Ancash?
- ¿Cómo influye la concentración de oxígeno en la precipitación de plata con polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe?
- ¿De qué forma podemos tener una recuperación total mayor al 85% de plata empleando el proceso Merrill-Crowe de la solución lixiviada de la primera etapa?

2.3. Justificación de la Investigación

La problemática presente y la información especializada en la obtención de precipitado de plata por proceso Merrill-Crowe a partir de soluciones lixiviadas con reactivo ecológico Sandioss en las labores de minería, a nivel nacional, conlleva a realizar el presente estudio. Su desarrollo ayudará a la coyuntura económica brindando una nueva tecnología productiva y comprometiendo a las empresas generar fuentes de trabajo. A su vez, los resultados permitirán elaborar documentos válidos, planteando procesos de mejora en la extracción del mineral y mejoras de sus tecnologías productivas.

El proyecto tiene un alcance orientado a muchas empresas del sector minero quienes han logrado implementar el proceso Merrill-Crowe en la obtención de precipitado de oro de soluciones cianuradas, sin embargo, muy pocas empresas han logrado la implementación del proceso para la precipitación de plata a partir de soluciones lixiviadas

con reactivo ecológico Sandioss. En la actualidad, países como México, Bulgaria, Austria, entre otros realizan este procedimiento por su menor impacto ambiental generando protección y conciencia ambiental. Así, es relevante realizar esta investigación ya que podría aplicarse en empresas del sector minero.

2.4. Objetivos de la Investigación

La presente investigación tiene como finalidad evaluar la recuperación de plata a partir de una solución lixiviada de mineral argentífero, utilizando el agente lixivante Sandioss y aplicando el proceso Merrill-Crowe. El estudio se desarrollará con muestras del distrito de Shupluy, región Áncash, y se enfocará en optimizar las condiciones del proceso para lograr una recuperación eficiente del metal precioso.

2.4.1. *Objetivos Generales*

- Recuperar plata mediante el proceso Merrill-Crowe de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash.

2.4.2. *Objetivos Específicos*

- Identificar los minerales, su distribución, grados de liberación y enlaces presentes, mediante la microscopia óptica del mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.
- Recuperar solución de plata mediante el proceso de lixiviación con Sandioss del mineral argentífero proveniente del distrito de Shupluy, Ancash.

- Determinar la influencia de la concentración de oxígeno en la precipitación de plata mediante el uso de polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe.
- Obtener una recuperación total mayor al 85% de plata mediante el proceso Merrill-Crowe de la solución lixiviada de la primera etapa.

2.5. Hipótesis y Variables

La tesis se basa en la evaluación de la eficiencia del proceso Merrill-Crowe aplicado a una solución lixiviada con Sandiooss obtenida a partir de mineral argentífero del distrito de Shupluy, en la región Áncash. En este contexto, se plantean la siguiente hipótesis general y las hipótesis específicas que guían el desarrollo del estudio.

2.5.1. Hipótesis General

- El proceso Merrill-Crowe permitirá recuperar plata de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandiooss en el distrito de Shupluy, Ancash.

2.5.2. Hipótesis Específicas

- La caracterización del mineral argentífero permitirá identificar las especies involucradas, grados de liberación, distribución y enlaces presentes en el mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.
- La lixiviación con Sandiooss permitirá recuperar solución de plata del mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.
- La concentración de oxígeno influye significativamente en la precipitación de plata con polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe, siendo posible que

concentraciones más bajas de oxígeno favorezcan una mayor precipitación de plata en comparación con concentraciones más altas.

- El proceso Merrill Crowe permitirá tener una recuperación total mayor al 85% de plata de la solución lixiviada de la primera etapa.

2.5.3. Identificación de Variables

El presente proyecto tendrá dos etapas, en la etapa de las pruebas de lixiviación del mineral argentífero con Sandioss, se tomarán en cuenta las siguientes variables:

Variables independientes

- Tiempo de lixiviación
- Granulometría

Variable dependiente

- Recuperación de Ag (%)

Variable Constantes

- %sólidos
- pH de lixiviación
- Concentración de reactivo ecológico Sandioss

En las pruebas Merrill-Crowe de la solución lixiviada de la primera etapa, las variables a estudiar son:

Variable independiente

- Masa de polvo de zinc
- Concentración de oxígeno

Variable dependiente

- Recuperación de Ag (%)

Variables Constantes

- Tiempo de cementación
- Concentración del agente lixivante.
- pH
- Turbidez

2.5.4. Operacionalización de Variables

Con el fin de comprender mejor cómo las diferentes variables influyen en el proceso, se llevaron a cabo balances metalúrgicos y se utilizaron herramientas estadísticas de Minitab 19 para analizar los datos obtenidos. Estos análisis se realizaron sobre los datos obtenidos de las pruebas de lixiviación con Sandioss en minerales argentíferos, así como del proceso Merrill Crowe aplicado a la solución lixiviada en la etapa inicial. A través de este análisis, se buscaba comprender en profundidad cómo las diferentes variables interactúan entre sí y cómo influyen en los resultados finales del proceso. En la Tabla 1 se podrá observar la Matriz de Operacionalización de variables.

Tabla 1 *Matriz de Operacionalización de Variables*

Variables Independientes: Granulometría, Tiempo de Lixiviación, Concentración de Oxígeno, Masa de polvo de Zinc

Variable Dependiente: Recuperación de plata.

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador	Escala de medición
Granulometría	Es la distribución del tamaño de un grano. expresada normalmente en la prueba U.S. Standard Sieve con ayuda de una criba o pila de mallas o tamices. (Carbotecnia.info)	Es la distribución, en porcentaje, de los diversos tamaños del agregado en una muestra. (Toirac, 2012, p. 293)	Porcentaje	%	Cuantitativo
Tiempo de lixiviación	El tiempo de lixiviación es el tiempo que dura el proceso de lixiviar, que es la extracción de una sustancia de un material sólido. (Codelco Educa)	Tiempo de contacto del disolvente líquido con los minerales para extraer el soluto, resultando en la disolución de uno de los sólidos. (Codelco Educa)	Tiempo	Horas	Cuantitativo
Concentración de oxígeno	Es uno de los agentes claves en la lixiviación. Sabiendo la demanda de oxígeno disuelto, se puede tener una mayor tasa de recuperación del mineral, un tiempo de retención más corto en el tanque y un menor consumo de cianuro. (Ecociencia)	Concentración de Oxígeno en función de la presión de vacío usada para desoxigenar la Solución rica lixiviada	Porcentaje	%	Cuantitativo
Masa de polvo de zinc	El polvo de zinc es un compuesto químico de color gris azulado, no tiene olor, es insoluble en agua, peligroso y altamente inflamable. (peru.pochteca.net)	Cantidad de reactivo (en peso) que se encuentra disuelto en una cantidad dada de solución.	Cantidad de polvo de Zinc	Gramos	Cuantitativo
Recuperación de Plata	La recuperación de plata es un proceso que consiste en extraer y separar la plata de otros materiales. (Yucundo, 2015, p.12)	Cantidad de plata extraída a partir del mineral en el proceso de lixiviación y Merrill-Crowe. (Telvia,2017, p.3)	Plata recuperada	%	Cuantitativo

CAPÍTULO III: Marco Teórico

3.1. Antecedentes de la Investigación

Barreto, y otros(2023) en su tesis “Caracterización y lixiviación ecológica para recuperar metales preciosos en relaves de amalgamación – Puno”; realizado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. En la tesis se investigó la lixiviación con reactivos ecológicos Sandioss y Jinchuan, para la recuperación de oro y plata en relaves de amalgamación, en Puno. El presente estudio se enmarca dentro de la investigación experimental. Los resultados demuestran que con Sandioss se alcanzó una recuperación de 99.25% de Au y 93.14% de Ag, y con el reactivo Jinchuan, logró una recuperación de 96.31% de Au y 91.18% de Ag. La relevancia de este estudio se da en la demostración de los reactivos ecológicos presentando una buena performance metalúrgica, perfilándose como sustituto del reactivo convencional, a pesar de ello, se encuentran pocos artículos que revisen el estado de la investigación de la extracción de oro a partir de minerales, concentrados de oro u otros materiales que contienen oro mediante la adopción de estos reactivos. Finalmente se determinan las conclusiones y recomendaciones.

Weigang(2022), en su tesis “Experimental Research on Environmental Friendly Gold Leaching of a Refractory Gold Ore in Laos”; realizado por Tianjin Huakan Group Co., Ltd., Tianjin, China. En la tesis se realizó un experimento sobre la condición del agente de lixiviación de oro que no daña el medio ambiente en el mineral de oro, con el fin de obtener mejores condiciones del proceso y guiar la producción en el sitio de la mina. El presente estudio se enmarca dentro de la investigación experimental. Los resultados demuestran que la tasa de lixiviación de oro es relativamente estable, la ley de los relaves se puede reducir a menos de 0,34 g/t y la tasa de lixiviación de oro puede

alcanzar más del 93,78%. La relevancia de este estudio se fundamenta en la existencia de condiciones de lixiviación de oro con agentes de lixiviación de oro respetuosos con el medio ambiente obteniendo condiciones óptimas del proceso. Finalmente se determinan las conclusiones y recomendaciones.

Ramos (2019), en su tesis “Recuperación de plata de los relaves de flotación, mediante la lixiviación en la Empresa Administradora Cerro SAC”; realizado en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. En la tesis se investigó la lixiviación de los relaves de mineral de pirita-plata, un mineral pirítico con alto contenido de plata. El proceso de lixiviación surge como un sustituto inmediato por el deseo de recuperar el valioso metal de este relave. El presente estudio se enmarca dentro de la investigación experimental, donde se aplicaron los conocimientos previos sobre la caracterización del mineral para llevar a cabo pruebas de lixiviación en el relave. Los ensayos de lixiviación fueron concebidos para determinar la concentración óptima de cianuro de sodio y evaluar su interacción con la temperatura, maximizando así la extracción de plata. Los resultados dan una recuperación de plata de 50.06 % con un consumo de NaCN de 4.8 kg/t a una concentración de 5,500 ppm y una temperatura de 40 °C. La relevancia de este estudio se fundamenta en la existencia de un stock de un millón de toneladas de relave con una ley promedio superior a 5, oz/t lo que representa un potencial económico significativo. Finalmente se determinan las conclusiones y recomendaciones.

Calcina (2019), en su tesis “Propuesta de mejora de la recuperación de oro a través del proceso de Merrill Crowe en el área de desorción de la planta La Joya Mining SAC”; realizado en la Universidad Tecnológica del Perú. En la tesis se determinó que una combinación de factores, incluyendo variables operativas, equipamiento, recursos

humanos y condiciones ambientales, influyeron negativamente en la recuperación del oro. Mediante la aplicación de técnicas de estudio de tiempos y observación directa, se cuantificó el tiempo dedicado a cada etapa del proceso. Con base en estos resultados, se propuso la implementación del método de Merrill-Crowe, cuya eficacia fue evaluada mediante ensayos a escala de laboratorio. La investigación, de carácter experimental y cuantitativo, permitió desarrollar un diagnóstico preciso de las causas de la baja recuperación y proponer una solución técnica fundamentada en evidencia empírica. Los resultados indicaron que las condiciones óptimas para la recuperación de oro se obtuvieron utilizando 1.26% de polvo de zinc, 1.31% de acetato de plomo y un pH de 12, logrando una extracción del 99.94%. Adicionalmente, se realizó un estudio de tiempo de este procedimiento, cuyos resultados revelaron una reducción en el tiempo requerido para la recuperación de oro a 30 horas y 15 minutos. Al final se hacen conclusiones y recomendaciones.

Zapana (2019), en su tesis “Adecuamiento y optimización del consumo de zinc en la etapa de Merrill Crowe de la unidad Minera Arasi - Puno”; realizado en la Universidad Nacional de San Agustín. En la tesis mediante un enfoque experimental y cuantitativo, lleva a cabo un diagnóstico detallado del proceso de Merrill-Crowe en la mina Arasi-Puno con el fin de identificar oportunidades para minimizar el consumo de reactivos y maximizar la recuperación de oro y plata. Los resultados obtenidos demostraron una mejora sustancial en la calidad del precipitado, alcanzando un grado de pureza superior al 99%. Esta mejora se atribuye directamente a las modificaciones realizadas en el proceso, las cuales permitieron reducir significativamente la concentración de metales en la solución estéril. Finalmente, se realizan conclusiones y recomendaciones.

Huarza (2018), en su tesis titulado “Estudio de mejoras y adecuamiento metalúrgico en la etapa de lixiviación para recuperar oro y plata del concentrado aurífero en la empresa minera aurífera Retamas – Marsa”; realizado en la Universidad Nacional de San Agustín. Para efectos de la tesis se estudió un mineral de la empresa minera aurífera Retamas para evaluar los parámetros de operación actuales y realizar pruebas para lograr mayores tasas de recuperación, menor consumo cianuro de sodio y cinética de filtración acelerada. La presente investigación es de carácter experimental y cuantitativa. Los resultados de los ensayos indicaron que las concentraciones de cianuro de 0.2% y 0.25% en el filtrado resultaron ser las más eficientes para la lixiviación del oro, alcanzando una solubilización del 96% y una mínima solubilización de otros metales. Además, se obtuvo la máxima recuperación de plata, llegando a un 78.76%. La introducción de oxígeno puro y la modificación del pH a 13 resultaron en una disminución significativa de la concentración de arsénico en la solución, alcanzando un valor de 0.74%, por otro lado, químicamente se registró la menor tasa de consumo de cianuro de sodio cambiando el pH a 13 a razón de 4,59 kg/t, lo que corresponde a una reducción en el consumo de cianuro de alrededor del 50%. Finalmente, se realizan conclusiones y recomendaciones.

Chambi (2018), en su tesis “Estudio del procedimiento de cianuración por agitación para la extracción de plata en relaves de Villa De Pasco – Tinyahuarco – 2017”; realizado en la Universidad Alas Peruanas. En este estudio se desarrollaron una serie de pruebas para determinar el proceso de cianuración agitada más adecuado para la recuperación de la plata presente en los relaves mineros. La investigación se aplica a nivel experimental, donde se utilizará un método cuantitativo ya que es estadístico y experimental. Los resultados experimentales muestran que el tiempo de molienda adecuado es de 5 minutos, el tiempo de cianuro adecuado es de 72 horas, la cantidad

promedio de NaCN consumido para estas condiciones es de 3,7 kg/t, la cantidad de cal consumida es de 4,78 kg/t. Finalmente, se formulan conclusiones y recomendaciones.

3.2. Bases Teóricas

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos relevantes para comprender los procesos implicados en la lixiviación y recuperación de plata, con énfasis en los minerales argentíferos y sus características. Este marco teórico es crucial para contextualizar las técnicas de recuperación metalúrgica aplicadas en el estudio.

3.2.1. Minerales de Plata

Los minerales argentíferos son sustancias naturales compuestas por elementos que incluyen plata en su estructura química. Estos minerales se localizan predominantemente en yacimientos de plata y se explotan con el propósito de extraer el metal precioso, entre los cuales están (Palyanova, 2020):

- Argentita (Ag_2S): La argentita, un mineral de plata con composición de sulfuro de plata, se destaca por su color gris oscuro a negro y su brillo metálico característico. Es uno de los minerales de plata más frecuentes y se encuentra comúnmente en depósitos formados por aguas termales.
- Acantita (Ag_2S): La acantita es un sulfuro de plata con una estructura cristalina distinta a la argentita considerada un polimorfo de este último mineral. Es común encontrarla asociada a otros minerales de plata en los depósitos donde se extrae este metal.
- Clorargirita (AgCl): La clorargirita, también denominada plata de cuerno por su apariencia cerosa, es un mineral compuesto de plata y cloro. Se

forma en zonas oxidadas de yacimientos de plata y suele presentar una coloración que va del blanco al gris.

- Pirargirita (Ag_3SbS_3): También llamada rubí de plata debido a su característico color rojo intenso y brillo metálico, es un mineral compuesto de plata, arsénico y azufre. Se forma en ambientes hidrotermales, donde se encuentra asociada a otros minerales sulfurados.
- Estefanita (Ag_5SbS_4): Se trata de un sulfosal de plata de tonalidad gris oscura a negra y brillo metálico. Este mineral es común en yacimientos hidrotermales, donde se forma a partir de fluidos calientes que circulan a través de las rocas.
- Tetraedrita ($(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$): un sulfuro complejo que puede contener plata, cobre, hierro y otros metales, es conocida por su color gris oscuro a negro y su brillo metálico. Este mineral se forma en yacimientos polimetálicos, donde se encuentra asociada a otros minerales sulfurados.
- Electrum: Una aleación natural compuesta principalmente de oro y plata, puede encontrarse en estado natural como un mineral. Suele estar asociado con depósitos de oro y plata, presentando un color que varía del amarillo pálido al plateado y un característico brillo metálico.

Los minerales de plata presentados son ejemplos de los que se pueden encontrar en distintos tipos de depósitos alrededor del mundo. El conocimiento detallado de estos minerales es esencial para la minería, ya que influye directamente en las técnicas de extracción y procesamiento que se emplearán para obtener la plata contenida en los minerales.

3.2.1.1. Depósitos de Minerales de Plata

La formación de yacimientos de plata es el resultado de diversos procesos geológicos que concentran este metal en zonas específicas de la corteza terrestre. A continuación, se describen algunos de los tipos más comunes de estos depósitos. (Goldfarb, Marsh, & Monecke, 2010):

- **Depósitos epitermales:** Los yacimientos epitermales de plata son el resultado de procesos hidrotermales que ocurren cerca de la superficie terrestre en zonas volcánicas. Estos procesos involucran la circulación de fluidos calientes y ácidos que transportan metales como la plata, desde las profundidades hacia la superficie, donde se depositan en fracturas y poros de las rocas formando vetas y disseminaciones minerales.
- **Depósitos de vetas polimetálicas:** Los yacimientos de vetas polimetálicas están estrechamente relacionados con la actividad tectónica. Las fallas y fracturas generadas por estos procesos permiten la circulación de fluidos mineralizados que depositan una variedad de metales incluyendo plata, plomo, zinc y cobre en las zonas de mayor fracturación de las rocas.
- **Depósitos de pórfido:** Los yacimientos de pórfido caracterizados por su gran tamaño y baja ley de metales están relacionados con la intrusión de magmas en la corteza terrestre. Estos depósitos contienen importantes cantidades de plata, cobre, molibdeno y oro y se forman típicamente en zonas de subducción, donde la interacción entre el magma y las rocas de la corteza genera fluidos mineralizados que depositan los metales en la roca encajante.
- **Depósitos de reemplazo de carbonato:** Los yacimientos de reemplazo de carbonatos se desarrollan en ambientes sedimentarios donde rocas

carbonatadas han sido alteradas por fluidos hidrotermales. Estos fluidos, cargados de metales reaccionan con las rocas carbonatadas reemplazando los minerales originales y formando cuerpos mineralizados de plata, plomo, zinc y otros metales, comúnmente asociados a zonas de fallas o fracturas.

- **Exhalativo sedimentario (SEDEX) Depósitos:** Los yacimientos SEDEX son cuerpos mineralizados formados por la precipitación de sulfuros metálicos incluyendo plata, plomo y zinc, a partir de fluidos hidrotermales que circulan a través de rocas sedimentarias en ambientes marinos. Estos depósitos se desarrollan en cuencas sedimentarias donde la actividad tectónica y volcánica ha generado las condiciones adecuadas para la formación de fluidos mineralizados.
- **Depósitos de placer:** Los yacimientos de placer son acumulaciones naturales de minerales valiosos, entre ellos la plata, en sedimentos sueltos. Estos depósitos se forman a través de procesos de erosión y transporte, donde los minerales más densos son separados de la roca original y concentrados en ambientes sedimentarios.

Es importante tener en cuenta que la diversidad geológica de los depósitos de plata implica que no existe un método único para su explotación. Las características geológicas de cada yacimiento determinan la elección de las técnicas de minería y los procesos metalúrgicos más adecuados para la extracción de plata.

3.2.2. Lixiviación de Minerales

La lixiviación es un proceso metalúrgico utilizado para extraer metales valiosos de minerales mediante la disolución selectiva en una solución líquida. Este proceso se

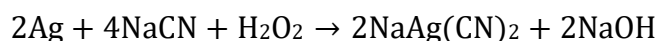
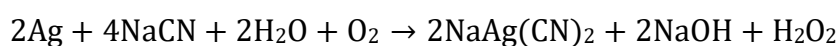
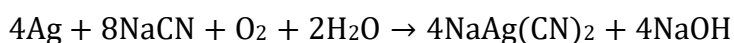
utiliza comúnmente para recuperar metales como el oro, plata, cobre, y otros, utilizando diferentes reactivos y condiciones. La lixiviación permite separar el metal deseado del mineral, facilitando su posterior recuperación mediante procesos adicionales, como la precipitación o la absorción.

3.2.2.1. Lixiviación de Plata

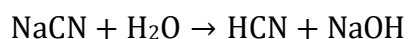
La lixiviación de plata se lleva a cabo mediante la disolución de los minerales argentíferos en soluciones adecuadas que permiten liberar el metal de su estructura mineral. Este proceso es esencial en la minería de plata, donde se utilizan diferentes agentes lixiviantes, como el cianuro o el Sandioss, para obtener soluciones ricas en plata.

3.2.2.1.1. Disolución de la Plata en Soluciones de Cianuro

Se han propuesto las siguientes fórmulas para la disolución del Ag en soluciones de cianuro diluidas (Ramos, 2019):



Boldaender propuso las dos últimas ecuaciones, mientras que la mayoría de las expresiones matemáticas son análogas a las planteadas por Elsner. La reacción de Elsner continúa hasta el agotamiento total del cianuro o del metal en la solución. La hidrólisis de una solución acuosa de cianuro alcalino se describe a continuación:



La cal se incorpora de manera rutinaria a las soluciones cianuradas para cumplir una doble función: neutralizar el pH ácido del mineral y proteger el cianuro de la descomposición por hidrólisis. Esto es esencial ya que los componentes ácidos podrían generar ácido cianhídrico (Bustinza, 2019).

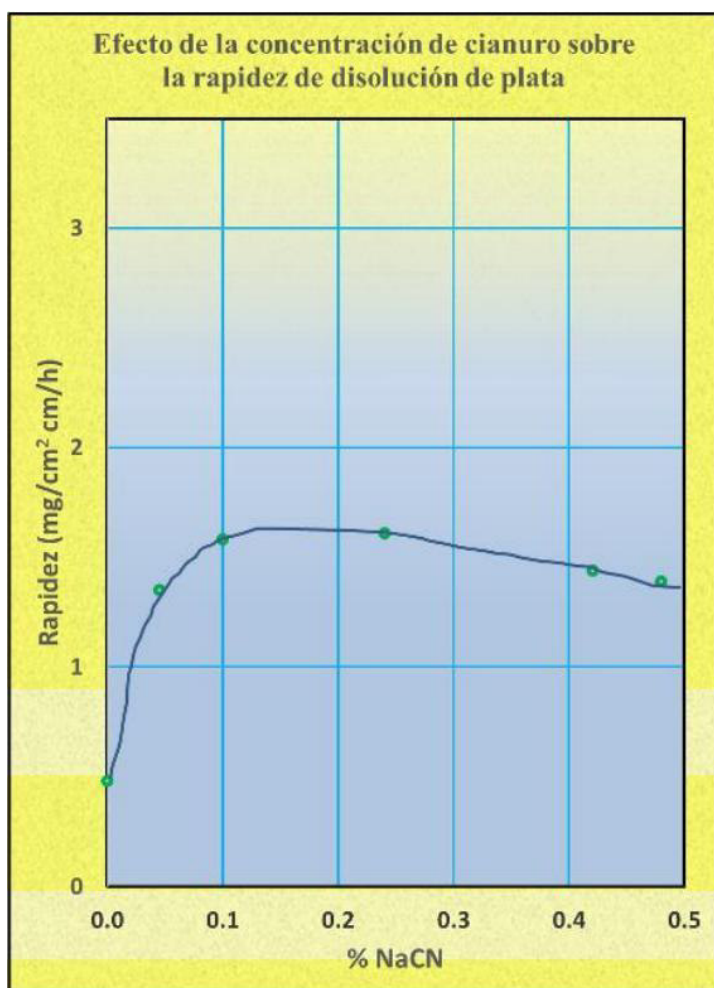
3.2.2.1.2. *Influencia de la Preoxidación*

La pre-oxidación con oxígeno promueve la oxidación de los sulfuros, convirtiendo el hierro ferroso en férrico y generando un precipitado de hidróxido férrico que neutraliza la superficie de los sulfuros. Esta reacción reduce significativamente la demanda de cianuro y oxígeno en las etapas subsiguientes del proceso de cianuración. Los sulfuros, en ausencia de oxidantes, son relativamente inertes en soluciones acuosas, pero su estabilidad disminuye drásticamente al aumentar el potencial de oxidación del medio, lo cual se puede lograr mediante la adición de oxidantes o elevando las condiciones de temperatura y presión.

Influencia de la concentración de cianuro por Julian y Smart (1903) postula que los cianuros de sodio, potasio, amonio, calcio, estroncio y bario presentan una capacidad de disolución del oro y la plata similar por unidad de ion cianuro. La Figura 1 ilustra la relación entre la concentración de cianuro y la velocidad de disolución de la plata, presentada por Maclaurin y Baesky (Lescano & Oyarce, 2015).

Figura 1

Efecto de la concentración de cianuro sobre la rapidez de disolución de la plata



Nota: Recuperado de Lescano & Oyarce (2015).

3.2.2.1.3. Descomposición de la Solución de Cianuro

Un estudio comparativo de la eficiencia de diversos cianuros en la lixiviación de oro y plata reveló que la naturaleza del catión asociado al anión cianuro no ejerce un efecto apreciable sobre la capacidad de disolución. El parámetro crítico es la concentración de iones cianuro en la solución. Así, un mol de cianuro de calcio, pese a su mayor peso molecular, disuelve la misma cantidad de metal precioso que dos moles de cianuro de sodio, debido a que su contenido de iones cianuro es equivalente. La adición

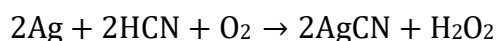
de cal a la pulpa cianurada tiene como objetivo principal estabilizar el ion cianuro, previniendo su hidrólisis, y neutralizar la acidez inherente a muchos minerales, evitando así la liberación del altamente tóxico ácido cianhídrico. Otro factor que influye en la estabilidad de la solución es la presencia de dióxido de carbono en el aire (Mamani, 2022).

3.2.2.1.4. *Cinética de la Cianuración de los Minerales Argentíferos*

El ion cianuro, presente en los cianuros de sodio, potasio, amonio, calcio, estroncio y bario, confiere a estos compuestos una capacidad disolvente similar para el oro y la plata. La cinética de disolución de la plata muestra una dependencia lineal directa con la concentración de cianuro hasta alcanzar un punto de saturación, más allá del cual un incremento en la concentración de cianuro tiene un efecto adverso sobre la velocidad de disolución. (Ascuña, Zela, Bolaños, Mamani, & Huanca, 2018).

3.2.2.1.5. *El efecto de la alcalinidad en la disolución de la plata*

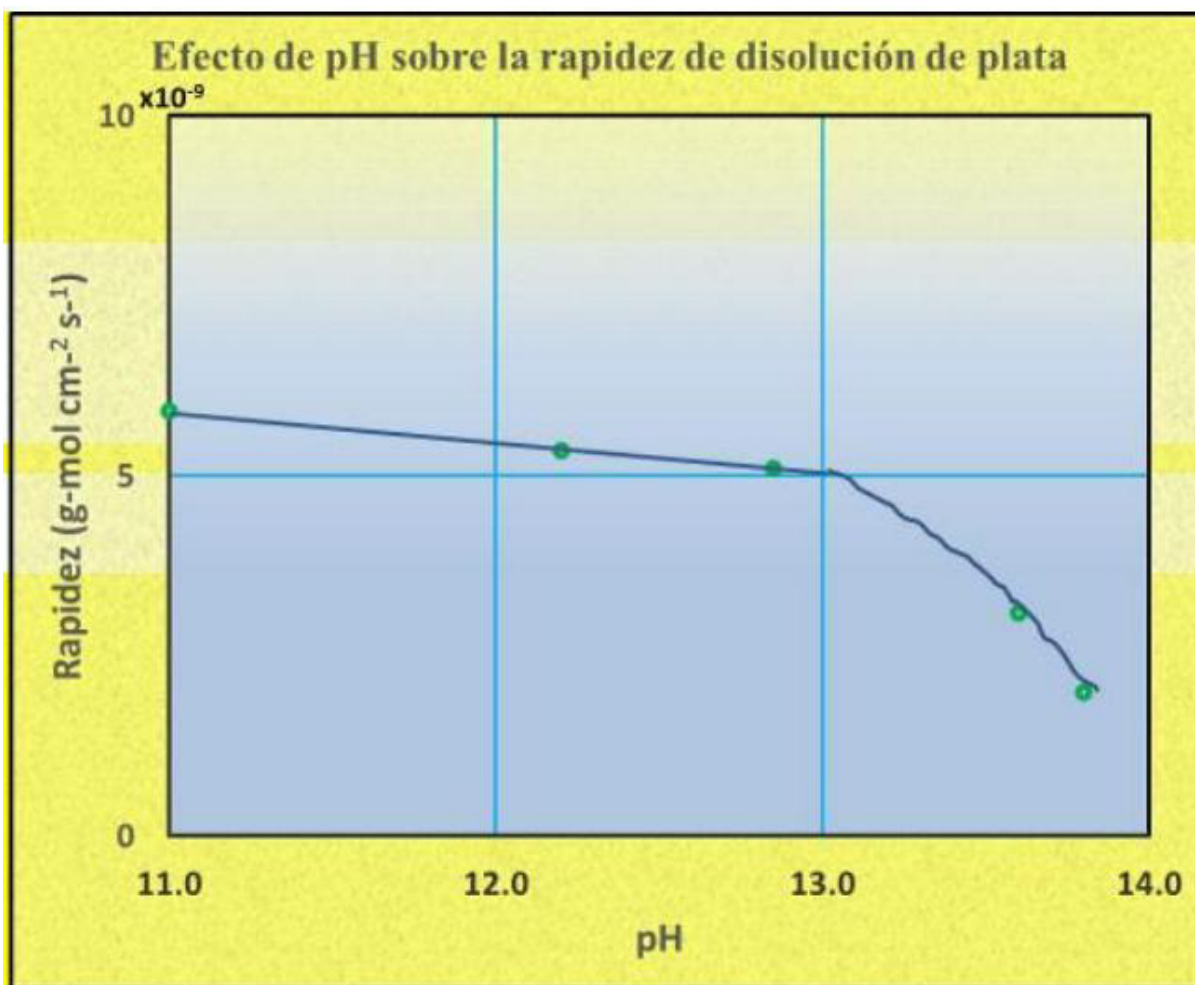
El agua saturada con ácido cianhídrico(HCN) gaseoso y oxígeno reacciona con la plata metálica, dando lugar a la formación de cianuro de plata(AgCN), un compuesto de baja estabilidad y peróxido de hidrógeno. (Lara, 2016).



Resulta fundamental mantener un control riguroso de la alcalinidad de las soluciones cianuradas para optimizar la velocidad de disolución de la plata. Estudios realizados por Kakovskii y Kholmanskikh han demostrado que un pH elevado inhibe este proceso, como se evidencia en la Figura 2. En la práctica industrial, el pH de las soluciones de cianuro suele encontrarse en un rango entre 11 y 12. (Ramos, 2019).

Figura 2

Efecto de pH sobre la rapidez de disolución de plata en HCN



Nota: Recuperado de Lescano & Oyarce (2015).

3.2.2.1.6. *La Temperatura y su Influencia en el Proceso de Cianuración*

La aplicación de calor a una solución de cianuro que contiene plata induce dos fenómenos antagónicos. Por un lado, el incremento de la temperatura favorece la cinética de la reacción de disolución al aumentar la energía cinética de las partículas. Sin embargo, la solubilidad de los gases, como el oxígeno, disminuye con la temperatura, lo que puede limitar la velocidad de ciertas reacciones redox involucradas en el proceso de lixiviación.

La ecuación de Elsner, que describe la disolución de oro y plata en soluciones cianuradas, resalta la importancia del oxígeno en este proceso. Numerosos estudios han investigado el efecto de la temperatura en la cinética de disolución, determinando energías de activación relativamente bajas para la plata, típicas de procesos controlados por difusión. Estos resultados sugieren que la disolución de los metales preciosos involucra al menos dos mecanismos paralelos: uno controlado por la difusión de los reactivos hacia la superficie metálica y otro, más rápido, gobernado por reacciones químicas en la interfase sólido-líquido.

La disolución de la plata en soluciones cianuradas requiere la presencia de un agente oxidante, siendo el oxígeno el más común. Aunque históricamente se han utilizado otros oxidantes como el peróxido de sodio o el cloro, estos han sido gradualmente abandonados debido a su alto costo y los riesgos inherentes a su manejo. (Snyders, Bradshaw, Akdogan, & Eksteen, 2014).

3.2.2.1.7. *Tratamiento de los Minerales Refractarios de Plata*

La presencia de minerales de baja ley y de oro y plata asociados a elementos como hierro, arsénico y silicio, clasifica a muchos yacimientos como refractarios. La complejidad de estos minerales ha impulsado la búsqueda de nuevas tecnologías de procesamiento. En este contexto, la hidrometalurgia ha emergido como una opción atractiva, ofreciendo ventajas significativas en comparación con la tostación. Asimismo, la escalada en los precios del oro y la plata ha motivado la explotación de yacimientos minerales refractarios, cuya extracción resultaba económicamente inviable en el pasado. Estas nuevas actividades extractivas se han visto catalizadas por la imposición de estándares ambientales más rigurosos. (Zaldaña & Zavaleta, 2016).

3.2.2.2. Lixiviantes Ecológicos (Eco amigable)

El reactivo Sandioss es una alternativa no tóxica al cianuro de sodio para la lixiviación de oro y plata. Su versatilidad permite tratar una amplia variedad de materiales, desde minerales oxidados y sulfurados hasta relaves y escorias. La lixiviación con Sandioss puede realizarse en diferentes configuraciones, como pilas, pozas y tanques de agitación, logrando altas recuperaciones metálicas mediante un proceso gradual y sostenido.

La presencia de ferrocianuros en el reactivo Sandioss resulta fundamental para llevar a cabo la lixiviación. Con el objetivo de verificar la composición del reactivo y determinar la concentración de ferrocianuro, se realizó un análisis gráfico. A partir de este análisis, se establecieron las cantidades precisas de Sandioss a utilizar para preparar soluciones al 0,2% y 0,3%. (Lovera, Peralta, Chang, & Arias, 2018).

3.2.2.2.1. Lixiviación de Minerales Auríferos con Sandioss

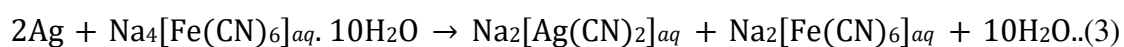
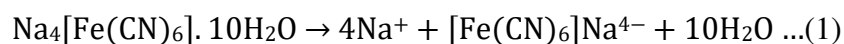
El Agente de Extracción de Oro Sandioss es un lixivante no cianurado que ofrece una alternativa ambientalmente amigable a los métodos tradicionales de extracción de oro. Su versatilidad permite tratar una amplia gama de materiales auríferos, desde minerales oxidados hasta concentrados y relaves, sin alterar significativamente la infraestructura existente. El empleo del reactivo Sandioss en procesos de lixiviación ha demostrado ser altamente efectivo para la disolución del oro superando los resultados obtenidos con el uso de cianuro, reportando recuperaciones de oro superiores al 98% utilizando este nuevo reactivo. (Huaco, 2017).

Tabla 2*Composición química del Sandioss*

Componentes	Fórmula	Número CAS	Porcentaje (%)
Óxido de sodio	Na ₂ O	1313-59-3	35-50
Nitrógeno	N	7727-37-9	12-20
Amonio	NH ⁴⁺	14798-03-9	7-12
Ferrocianuro de sodio	Na ₄ Fe(CN) ₆	13601-19-9	7-12
Agua	H ₂ O	7732-18-5	1-4
Calcio	Ca	7440-70-2	1-5
Hierro	Fe	7439-89-6	1-5
Insolubles en agua	---	---	3-8

Nota: Recuperado de Huaco (2017).

Disolución de plata en solución de Sandioss. (Fuente propia).



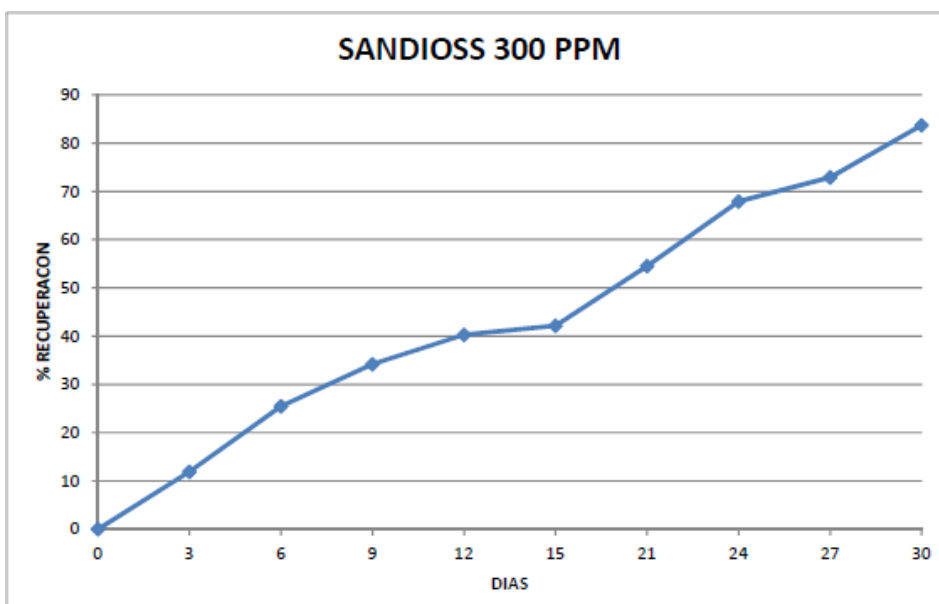
3.2.2.2.2. *Comparación de Recuperación de Mineral entre Sandioss y Cianuro*

La empresa Bioper Perú realizó pruebas en columna usando Sandioss y Cianuro, a fin de comparar su grado de recuperación de Au. Para ello usaron un mineral de la Concesión Minera Puebla de Los Infantes del Caserío de Huayday, distrito de Lucma, provincia de Gran Chimú, La Libertad. (Sandioss vs Cianuro, 2015)

Se detallan las condiciones de prueba donde se usaron 25 kg del mineral en las pruebas, la solución utilizada tenía una concentración de 300 partes por millón (ppm) del reactivo activo, en un medio alcalino de pH 11, El mineral fue triturado hasta obtener partículas menores a 1/4 de pulgada favoreciendo la exposición del mineral al reactivo.

Figura 3

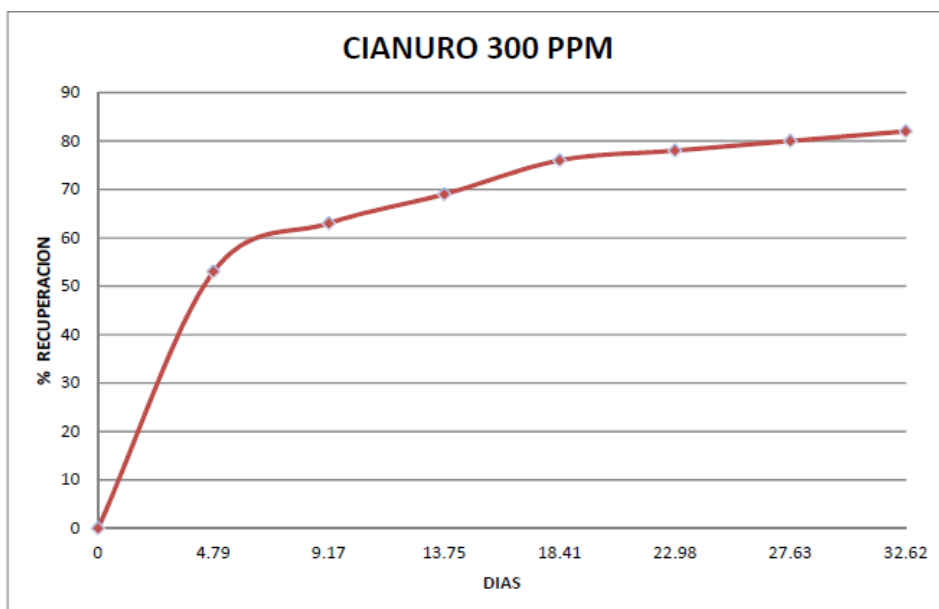
Gráfico de Recuperación de Au en función del tiempo usando Sandioss



Nota: Obtenido de Nature Business Bioper

Figura 4

Gráfico de Recuperación de Au en función del tiempo usando Cianuro



Nota: Obtenido de Nature Business Bioper

Para esta prueba, cuyo mineral se determinó a priori que es refractario, su lixiviación es de 30 días aprox., se determina lo siguiente: (Sandioss vs Cianuro, 2015)

- La recuperación de oro: el % de extracción con Sandioss es de 83.73% y de cianuro del 82.00% es decir: Sandioss tiene mayor % de recuperación
- El consumo de reactivo: el consumo de Sandioss es de 1.039 kg/tn y del cianuro de 1.197 kg/tn, es decir el consumo de sandios es menor que del cianuro
- El tiempo de lixiviación: con Sandioss el tiempo de lixiviación (30 días) es menor que con cianuro (32.62 días)
- La velocidad de lixiviación: la velocidad de lixiviación con Sandioss es casi constante y la del cianuro es al inicio rápida y luego lenta.

3.2.3. *Merril Crowe*

La cementación o precipitación del oro, plata y mercurio mediante zinc metálico, se aplicó en las plantas desde 1889; el método se caracteriza por:

- Utilizar trozos de Zinc (virutas, placas, entre otros.).
- Contacto en bateas o cajones.
- Alto consumo de Zinc 10 kg de zinc por 1 kg de Au.
- Dificultar para cosechar y remover el oro adherido al zinc.
- Rendimientos medianos.
- Pasivación del Zinc. ($\text{Zn}(\text{OH})_2$, sales, entre otros.).

Entre las innovaciones introducidas resaltan las siguientes:

- Uso de polvo de zinc para acelerar la velocidad del proceso.
- Aplicación de filtros prensa, para coleccionar los cementos y agotar el zinc.

- Desaireación de las soluciones a menos de 1 ppm de oxígeno, para reducir el consumo de zinc (torre Crowe) (Chavez, 2018).

En Perú, la producción de polvo de zinc para uso industrial es limitada. Sin embargo, Zinc Industrias Nacionales S.A. (ZINSA) se destaca como el principal fabricante nacional de este insumo. Además de ZINSA, otras empresas en Perú comercializan polvo de zinc, aunque no necesariamente lo producen localmente tales como CM&C, Progresiones Químicas, etc.

Asimismo, a nivel nacional existen empresas mineras que utilizan el proceso Merrill Crowe como medio de recuperación de metales preciosos., tales como Minera Yanacocha S.R.L, Compañía Minera Sipán S.A., Minera Aurífera Retamas S.A. (MARSA), La Joya Mining S.A.C., Unidad Minera Tucari – Aruntani S.A.C., Minera Anabi S.A.C., Consorcio Minero Horizonte S.A., etc.

3.2.3.1. Clarificación

El objetivo es lograr una clarificación de las soluciones de lixiviación, alcanzando niveles de sólidos en suspensión inferiores a 0,5 ppm. Esta medida es fundamental para prevenir la pasivación del zinc durante el proceso de cementación, garantizar un óptimo desempeño de los equipos de filtración y obtener precipitados de mayor pureza, lo que se traduce en una mayor eficiencia metalúrgica.

Esta operación se puede llevar a cabo en varios tipos de equipos de filtración, entre ellos tenemos los siguientes:

- Filtro clarificante tipo hoja
- Filtros a presión
- Filtros con lecho de arena por gravedad
- Unidades filtrantes con tubos plásticos porosos recubiertos con diatomeas.

La filtración es un método de separación sólido-líquido en el que un lecho poroso retiene las partículas sólidas presentes en una suspensión, permitiendo el paso del líquido a través de sus poros. Cuando se forma un queque filtrante, las partículas sólidas se depositan en la superficie del medio filtrante, creando una capa que impide el paso de más partículas. (Ayala, 2015).

3.2.3.2. Desaereación

La precipitación de metales preciosos a partir de soluciones cianuradas requiere un acondicionamiento previo que incluya la eliminación total del oxígeno disuelto. El oxígeno, debido a su carácter oxidante, interfiere en el proceso de precipitación, reduciendo la eficiencia de recuperación. Por esta razón, la etapa de desaereación es fundamental para garantizar una precipitación completa y efectiva.

El oxígeno disuelto se refiere a la cantidad de oxígeno molecular (O_2) presente en el agua en estado no combinado. Este gas se disuelve en el agua a partir del contacto con la atmósfera, y su solubilidad está influenciada por diversos factores fisicoquímicos. La presión atmosférica favorece la disolución del oxígeno, mientras que la temperatura y la salinidad la disminuyen.

La eliminación del oxígeno disuelto en el agua puede realizarse mediante tres métodos principales: desaereación química, térmica y por vacío. En el proceso Merrill-Crowe, se emplea la desaereación por vacío, donde el oxígeno es extraído mecánicamente al someter la solución a una presión muy baja. (Chavez, 2018).

3.2.3.2.1. *Desaereación por Vacío*

El proceso de desaereación consiste en someter el líquido a un vacío parcial, lo cual provoca que los gases disueltos se liberen de la solución. Para favorecer esta

liberación, el líquido se atomiza en finas gotas al ingresar a torres empaquetadas, incrementando así el área superficial de contacto líquido-gas. Los gases liberados son luego evacuados del sistema mediante bombas de vacío. La coexistencia de cianuro y oxígeno en la solución crea un ambiente corrosivo que redisuelve los precipitados de oro y plata, lo que resulta en pérdidas metalúrgicas. Para evitar este fenómeno, es necesario disminuir el contenido de oxígeno en la solución. (Chavez, 2018).

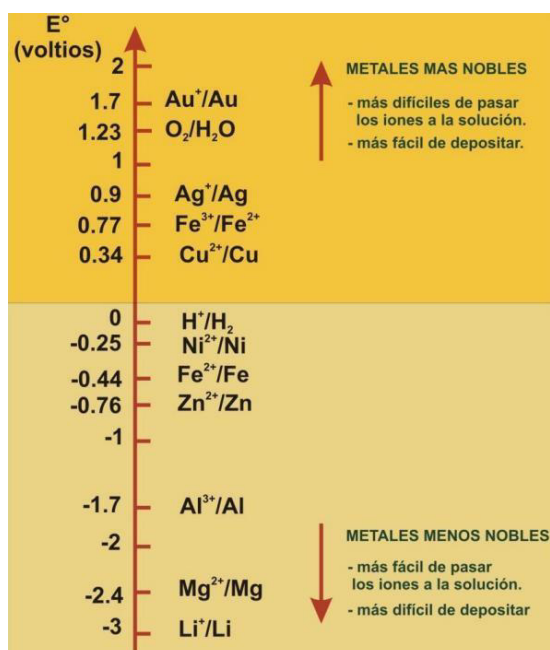
3.2.4. *Precipitación y Filtración*

La precipitación del oro en el proceso Merrill Crowe es un fenómeno electroquímico gobernado por los potenciales estándar de reducción de los metales involucrados. La mayor nobleza del oro, reflejada en un potencial de oxidación menos positivo en comparación con el zinc, favorece la reducción del oro y la oxidación del zinc, lo que impulsa la reacción de cementación.

Considerando que a mayor E° el metal es más noble, siendo difícil el paso de iones a la solución y a menor E° el metal es menos noble, entonces es más fácil el paso de los iones a la solución (Chavez, 2018).

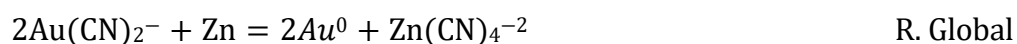
Figura 5

Potencias de los metales (nobles y menos nobles)



Nota: Recuperado de Chavez (2018).

Básicamente es un proceso electroquímico donde el zinc se disuelve (Reacción Anódica) y los electrones cedidos sirven para reducir el complejo aurocianurado a oro metálico (Reacción Catódica) (Chavez, 2018).



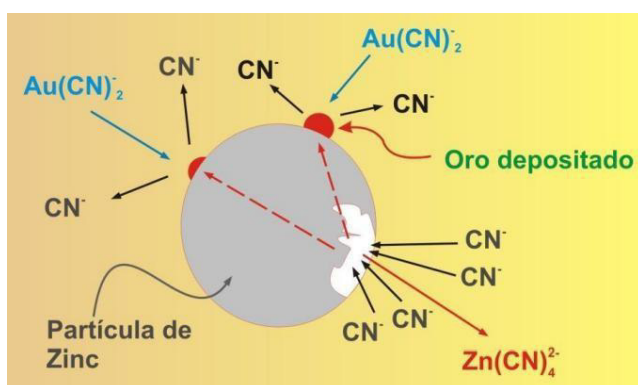
El proceso de precipitación del oro con polvo de zinc se inicia con la adsorción del complejo aurocianurado junto con especies de cianuro libre sobre la superficie del zinc, a partir de la solución previamente desaerada (Chavez, 2018).

El complejo aurocianurado es transportado en conjunto con el cianuro libre presente en la solución hacia la superficie del zinc para que ocurra la adsorción sobre el

mismo. Dándose la transferencia de electrones entre el zinc y el complejo aurocianurado de oro, simultáneamente se realiza la disociación simultánea del mismo, formándose el cianuro de zinc (R.Global). Una vez libre el oro metálico ocurre la desorción del cianuro de zinc desde la misma superficie de la partícula de zinc, transfiriéndose hasta la solución (Zapana, 2019).

Figura 6

Mecanismo de precipitación de oro



Nota: Recuperado de Chavez (2018).

3.2.4.1. Variables en la Precipitación de Zinc

- Concentración mínima de cianuro
- Oxígeno disuelto
- Sólidos en suspensión
- pH de la solución rica
- Iones metálicos interferentes:
- Influencia de sales de plomo en la precipitación
- Filtración (Zapana, 2019)

3.2.5. Producción de Plata

3.2.5.1. Internacional

La producción minera metálica de noviembre de 2023 superó las cifras del año anterior, mostrando un crecimiento considerable en metales como cobre (10.9% más), oro (9.7% más), zinc (1.2% más), plata (6.9% más), plomo (9.0% más), hierro (8.5% más), estaño (19.4% más) y molibdeno (19.5% más).

Asimismo, la producción de la mayoría de los metales mineros experimentó un crecimiento significativo en los primeros once meses del año 2023, destacando el aumento del 14.0% en la producción de cobre, oro (2.1%), zinc (5.8%). En contrario, la plata (-1.9%) y el estaño (-9.8%) mostraron una tendencia contraria. (Dirección de Promoción Minera, 2023).

Tabla 3

Producción de plata (2022-2023)

Metal	Noviembre			Enero-Noviembre		
	2022	2023	Var.%	2022	2023	Var.%
Cobre (TMF)	228,659	253,582	10.9	2,193,352	2,499,635	14.0
Oro (g finos)	8,544,894	9,377,633	9.7	88,452,500	90,349,724	2.1
Zinc (TMF)	114,235	115,646	1.2	1,246,732	1,318,979	5.8
Plata (kg finos)	245,480	262,338	6.9	2,805,430	2,752,128	-1.9
Plomo (TMF)	21,417	23,354	9.0	232,445	247,157	6.3
Hierro (TMF)	1,060,828	1,151,044	8.5	11,432,311	12,960,276	13.4
Estaño (TMF)	2,368	2,828	19.4	25,565	23,064	-9.8
Molibdeno (TMF)	2,726	3,257	19.5	28,723	30,469	6.1

Nota: Recuperado de Dirección de Promoción Minera (2023).

En Perú, los datos de noviembre de 2023 muestran un crecimiento del 6.9% en la producción de plata alcanzando los 262 338 kilogramos finos. Este incremento se atribuye principalmente al desempeño positivo de Nexa Resources Perú, Volcan Compañía

Minera y Minera Chinalco, que registraron aumentos en su producción de plata del 195.4%, 27.8% y 15.2%, respectivamente. (Dirección de Promoción Minera, 2023).

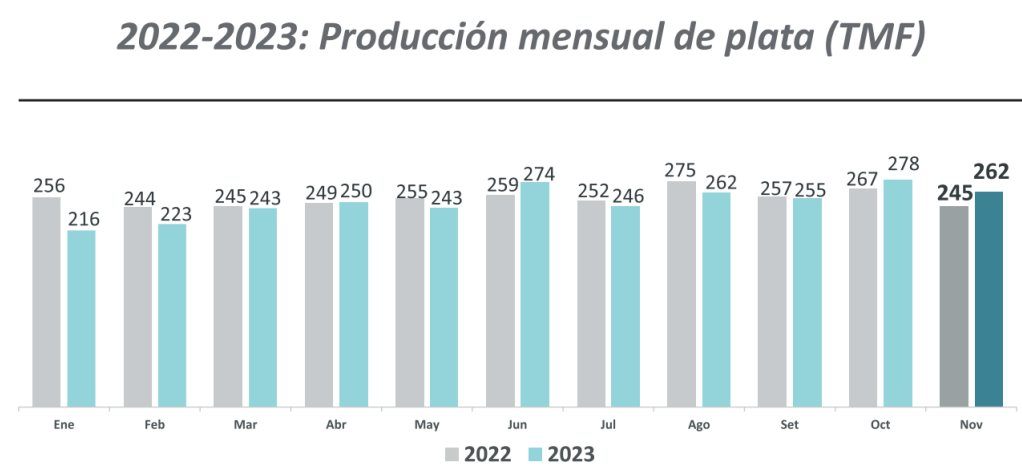
A pesar del incremento en la producción de plata registrado en noviembre, la producción acumulada hasta ese mes (2 752 128 kilogramos finos) fue un 1.9% menor en comparación con el mismo período del año anterior (2 805 430 kilogramos finos). Este resultado se explica principalmente por la disminución en la producción de Antamina, que se encuentra en proceso de obtener los permisos necesarios para implementar un proyecto que le permita aumentar su producción.

A nivel empresarial, Compañía Minera S.A.S. y Compañía Minera Ares S.A.C. se posicionaron en el segundo y tercer lugar como las principales productoras de plata, con una participación del 8.0% y 7.5% respectivamente.

A nivel departamental, Pasco ocupó el primer lugar en producción con una participación del 20.0%. Áncash y Junín se ubicaron en segundo y tercer lugar con el 18.0% y 16.0% del total, respectivamente. (Dirección de Promoción Minera, 2023).

Figura 7

Producción mensual de plata (2022-2023)

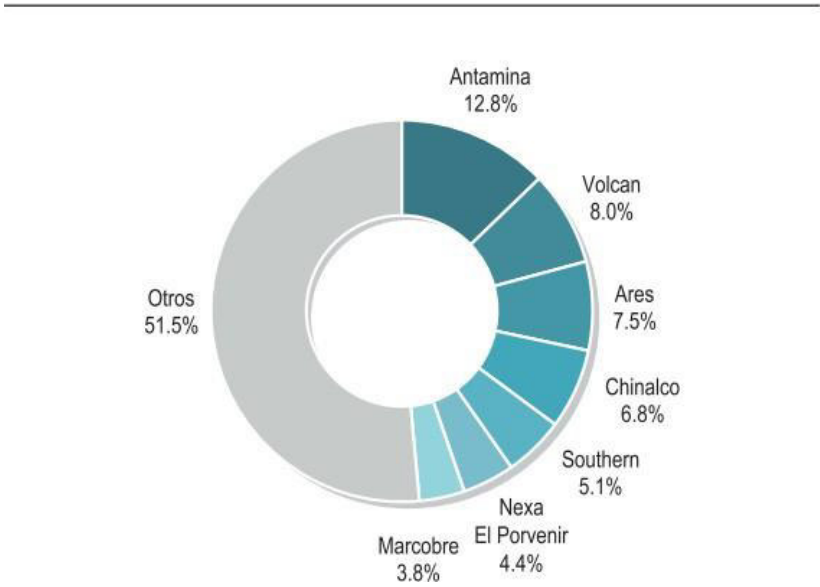


Nota: Recuperado de Dirección de Promoción Minera (2023).

Figura 8

Producción de plata según empresas (2023)

2023: Estructura de la producción de plata por empresas, enero – noviembre
Reporte: 2022: 94 titulares mineros, 2023: 91 titulares mineros



Nota: Recuperado de Dirección de Promoción Minera (2023).

CAPÍTULO IV: Metodología de la Investigación

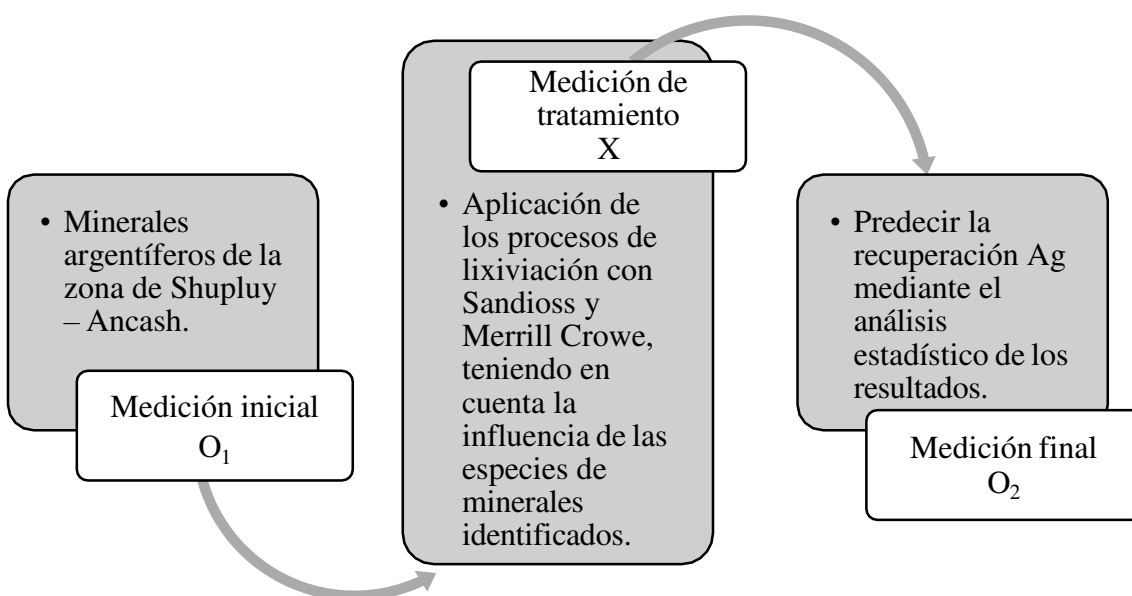
4.1. Tipo y Diseño de Investigación

La investigación realizada fue del tipo experimental, dado que se aplicaron los conocimientos de mineralogía, procesos de lixiviación y precipitación con polvo de zinc, para recuperar plata en minerales argentíferos, teniendo en cuenta la contribución de las variables independientes en los distintos procesos metalúrgicos de recuperación de ag.

La investigación fue de tipo deductiva, cualitativa, dado que la caracterización de las especies minerales con el microscopio óptico obedece a la interpretación descriptiva de las especies observadas, y cuantitativa porque se realizó la manipulación de variables cuantitativas en los procesos de lixiviación y Merrill Crowe.

Figura 9

Metodología de la investigación



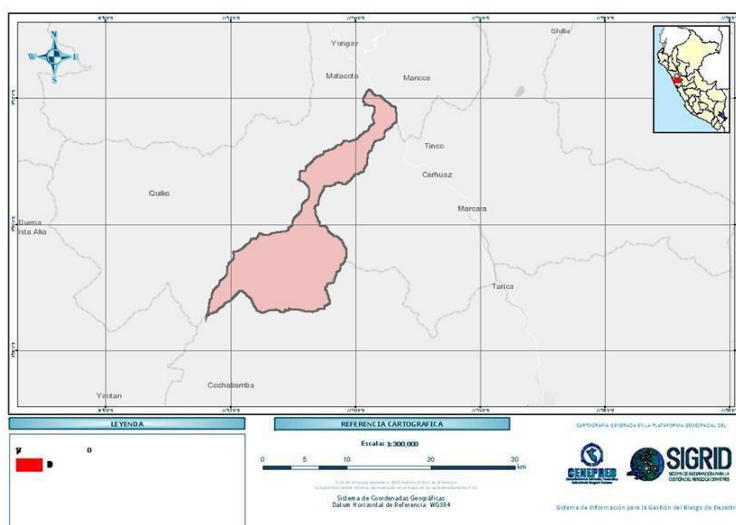
4.2. Unidad de Análisis

La unidad de análisis en esta investigación está constituida por los recursos minerales del distrito de Shupluy, en la región Áncash, los cuales serán evaluados a través de las técnicas de lixiviación y recuperación de plata. Esta área geográfica es relevante debido a su riqueza en minerales argentíferos, lo que la convierte en un punto de interés para la aplicación de procesos metalúrgicos como el Merrill-Crowe.

4.2.1. Ubicación

El distrito de Shupluy, situado en la región central-oriental de Perú, es uno de los ocho distritos que conforman la provincia de Yungay, en el departamento de Ancash. Sus fronteras limitan al norte con los distritos de Mancos y Matacoto, al sur con las provincias de Huaraz y Carhuaz, al este con la provincia de Carhuaz, y al oeste con el distrito de Cascapara. Su extensión territorial alcanza los 166.77 kilómetros cuadrados.

Las coordenadas geográficas del distrito son las siguientes: Latitud Sur: 9°13'0.51", Longitud Oeste: 77°41'37.25". En cuanto a las coordenadas UTM, en el Datum WGS84, la Coordenada Este es 204001.40 y la Coordenada Norte es 8980063.51 metros al sur.

Figura 10*Ubicación de Shupluy*

Nota: Recuperado de Gobierno Distrital de Shupluy (2022).

4.2.2. Vías de Acceso

Desde la ciudad de Huaraz, el distrito de Shupluy se sitúa al norte, a una distancia estimada de unos 42 kilómetros, con un tiempo de viaje aproximado de 48 minutos. La principal ruta de acceso es a través de la Red Vial Nacional, específicamente la Carretera de Penetración Pativilca – Huaraz – Caraz – Huallanca, la cual conecta la carretera Panamericana con la ruta longitudinal de la sierra.

Tabla 4*Acceso a Shupluy*

Desde	A	Tipo de vía	Estado de la vía	Medio de transporte	km	Tiempo
Huaraz	Tingua	Asfalto	Bueno	Combi	40.5	45 min
Tingua	Shupluy	Pavimentado	Bueno	Combi	1.5	3 min
Total					42	48 min

Nota: Recuperado de Gobierno Distrital de Shupluy (2022).

4.3. Población de Estudio

La población de estudio de la presente investigación proviene del mineral de cabeza, extraído y muestreado de los yacimientos de minerales argentíferos en el distrito de Shupluy, departamento de Ancash.

4.4. Tamaño de Muestra

La investigación y las pruebas metalúrgicas del proyecto se llevarán a cabo en los laboratorios de la E.P de Ingeniería Metalúrgica de la UNMSM, mientras que la caracterización del mineral se realizará en el laboratorio de GEOXINPESAC. Se estima que se necesitarán 100 Kg de muestra para los estudios de investigación.

4.5. Procedimiento Metodológico de la Investigación

- Recopilación de antecedentes sobre la problemática en estudio.
- Obtener una muestra representativa de mineral de cabeza del distrito de Shupluy – Ancash.
- Preparación mecánica de la muestra y muestreo de testigo.
- Pruebas de moliendabilidad del mineral de cabeza.
- Ensayos químicos y mineralogía de muestras representativas.
- Pruebas preliminares y definitivas de lixiviación con Sandioss.
- Pruebas preliminares y definitivas de precipitación con polvo de zinc a partir de las soluciones ricas de lixiviación
- Sistematizar los resultados obtenidos, mediante balances metalúrgicos en hojas de cálculo y análisis estadísticos en Minitab 19.
- Proponer en base a los resultados obtenidos a nivel de laboratorio, pruebas a nivel de planta piloto.

CAPÍTULO V: Resultados

5.1. Microscopia del Mineral de Cabeza

El lote de mineral muestreado se redujo de tamaño mediante operaciones de chancado primario con un equipo de quijadas, y chancado secundario con equipo de rodillos hasta alcanzar una granulometría de 100% - 10 Malla. El material de tamaño uniforme fue cuarteado para almacenar una muestra testigo, y la otra fracción de muestra se utilizó para el desarrollo de las pruebas de investigación. Se muestreo un kilo de mineral y se redujo de tamaño en un molino de bolas de laboratorio con una relación S/L de 2/1, alcanzando una granulometría de 81.44% - 200 Malla, la cual fue filtrada y secada en una estufa a 120 °C por 2 horas.

El mineral molido seco fue muestreado y se envió a laboratorio de microscopia óptica de minerales con luz reflejada, logrando identificar minerales de Ag nativa, de esfalerita, galena, pirita, marcasita, rutilo, y gangas.

Se pudo identificar trazas de plata nativa, además de ef con una distribución de 0.76% y 50% de especies libres, especies de plomo como gn ocupando una distribución de 2.55 % y 87.04% de grados de liberación. Así también las especies sulfuradas de hierro Py ocupó un volumen de 25.92% y las gangas 67.47%, tal y como se puede observar en la tabla 5.

Tabla 5

Especies mineralógicas del mineral de cabeza

Minerales	Abreviatura	Volumen porcentual (%)	Grado de liberación (%)
Plata nativa	Ag	0.05	-
Esfalerita	ef	0.76	50.00
Galena	gn	2.55	87.04
Pirita	py	25.92	92.71

Magnetita	mt	1.27	92.59
Rutilo	rt	1.98	95.24
Gangas	GGs	67.47	95.52
Total		100.00	

Nota: Reportado por el laboratorio Geoexploración Ingenieros Perú S.A.C.

Se puede observar que los valores económicos de Zn y Pb son bajos para ser recuperados a pequeña escala, sin embargo, la Ag nativa representa el principal atractivo económico recuperable. La figura 11 representa un gráfico circular que representa la distribución del total de minerales identificados en el microscopio, y la figura 12 los grados de liberación de las distintas especies.

Figura 11

Distribución volumétrica de las especies mineralógicas

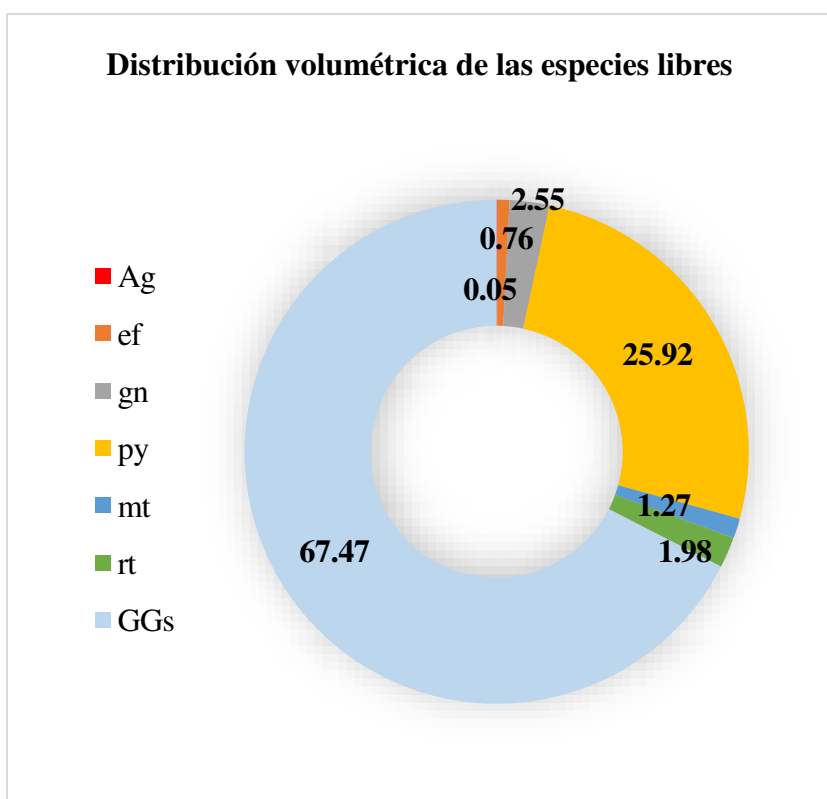
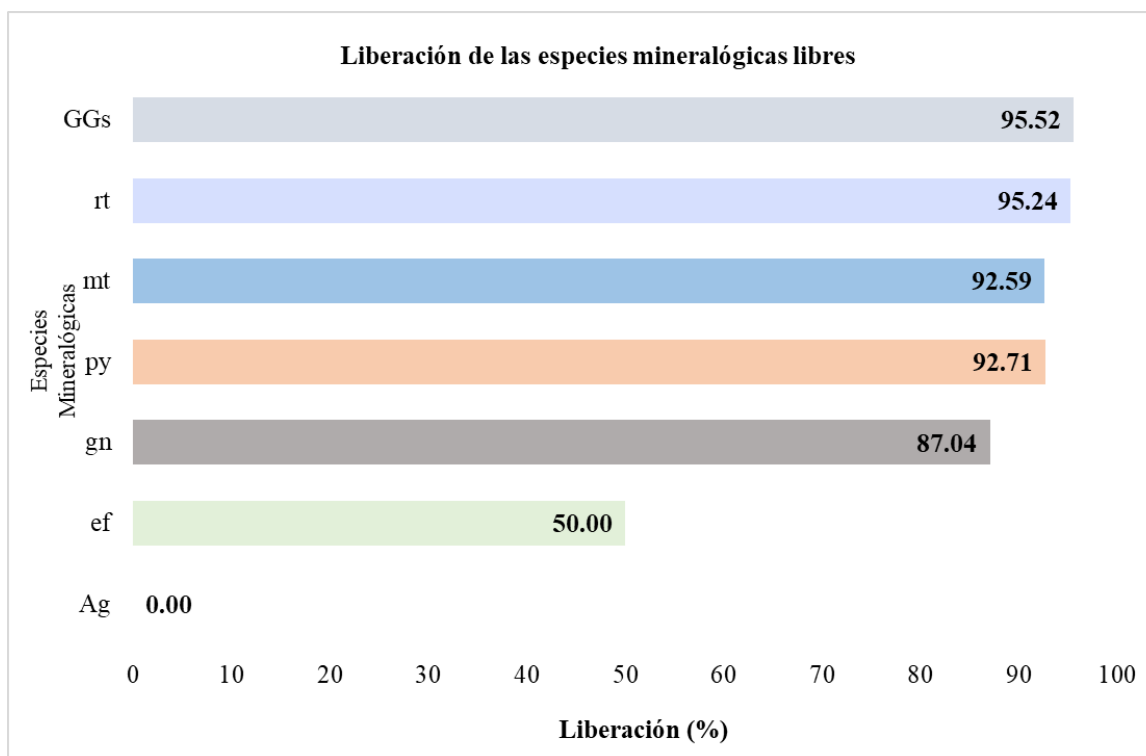


Figura 12*Liberación de las especies mineralógicas***5.1.1. Tipos de Enlaces y Posibilidades de Liberación**

Se contabilizaron 1994 partículas libres y 124 entrelazadas, de las cuales se identificaron 0.27 % de enlaces Ag-gn. Los tipos de enlaces observados fueron del tipo ameboide, concéntrico y simple, tal y como se observa en la tabla 6. En la figura 13 se representa la distribución del total de enlaces identificados en el microscopio óptico.

Tabla 6*Entrelazamientos y su posibilidad de liberación*

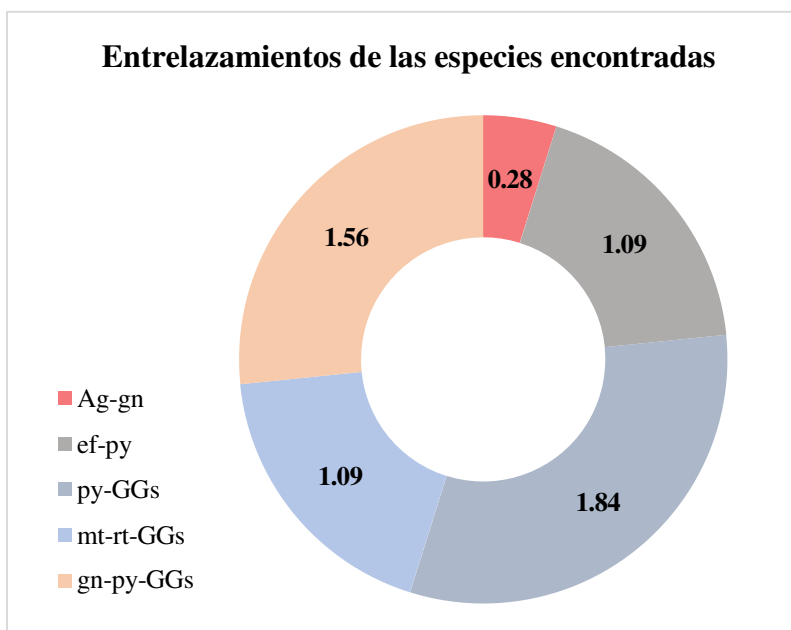
Minerales entrelazados	Tipo entrelazamiento	Número de partículas	Distribución porcentual (%)	Liberación
Partículas libres		1994	94.15	
Ag-gn	Ameboide	2	0.09	Moderadamente fácil
	Concéntrico	4	0.18	Muy difícil a imposible

ef-py	Simple	3	0.14	Fácil
	Sándwich	7	0.33	Moderadamente fácil a difícil
	Sub-corona	5	0.24	Muy difícil
	Concéntrico	8	0.38	Muy difícil a imposible
py-GGs	Simple	7	0.33	Fácil
	Ameboide	4	0.19	Moderadamente fácil
	Sándwich	9	0.42	Moderadamente fácil a difícil
	Sub-corona	6	0.28	Muy difícil
mt-rt-GGs	Concéntrico	8	0.38	Muy difícil a imposible
	Corona	5	0.24	Muy difícil a imposible
	Sándwich	3	0.14	Moderadamente fácil a difícil
	Borde compuesto	7	0.33	Muy difícil
gn-py-GGs	Concéntrico	9	0.43	Muy difícil a imposible
	Gráfico	4	0.19	Imposible
	Ameboide	7	0.33	Moderadamente fácil
	Sándwich	8	0.38	Moderadamente fácil a difícil
	Sub-corona	5	0.24	Muy difícil
	Concéntrico	9	0.43	Muy difícil a imposible
	Corona	4	0.19	Muy difícil a imposible
TOTAL		2118	100.00	

Nota: Reportado por el laboratorio Geoexploración Ingenieros Perú S.A.C.

Figura 13

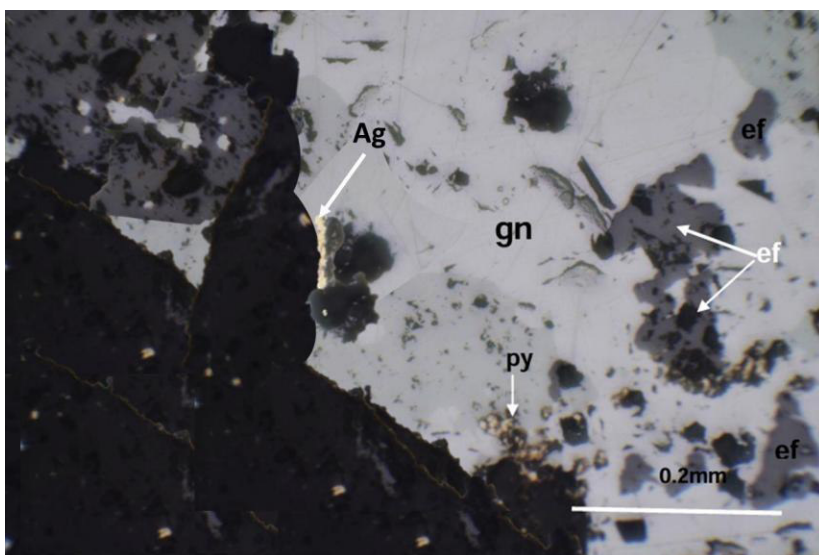
Distribución volumétrica de los entrelazamientos



Las figuras 14 y 15 representan las principales micrografías que se obtuvieron en la observación al microscopio de una muestra representativa.

Figura 14

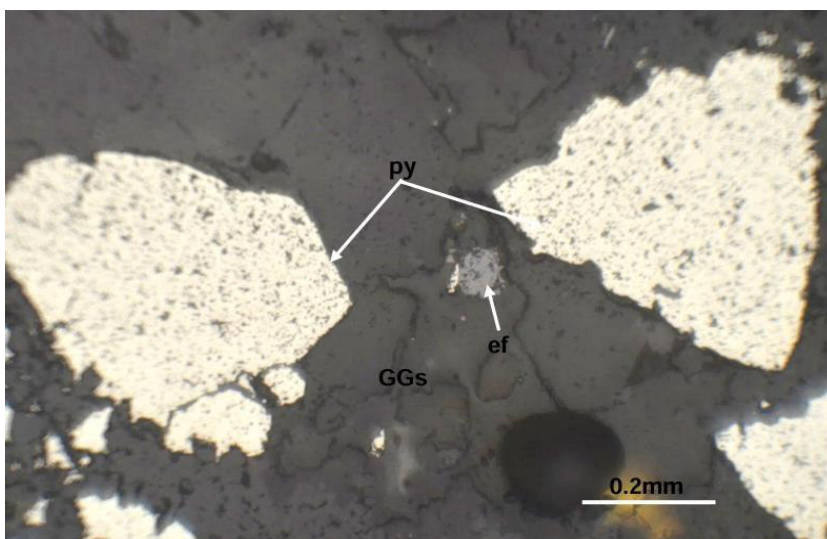
Micrografía con presencia de Ag, gn, ef y py



Nota: Reportado por el laboratorio Geoexploración Ingenieros Perú S.A.C.

Figura 15

Micrografía con presencia de py, ef y GGs



Nota: Reportado por el laboratorio Geoexploración Ingenieros Perú S.A.C.

5.2. Análisis Químico de la Muestra de Cabeza

Una muestra representativa del lote de mineral argentífero se ensayó al fuego para determinar las leyes de Au y Ag, así también, se analizó por métodos volumétricos la ley de Pb y Zn, cuyos resultados se representan en la tabla 7.

Tabla 7

Leyes reportadas en el análisis químico

Elemento	Au (g/TM)	Ag (Oz/TC)	Pb (%)	Zn (%)
Ley	1.02	5.23	0.5	0.9

Nota: Reportado por el laboratorio H&F Laboratorios SAC.

5.3. Moliendabilidad

Con muestras representativas del lote, se desarrollaron pruebas de moliendabilidad en un molino de bolas de laboratorio, para tiempo de 4, 8, 12, 16 y 20 minutos. Las pruebas de molienda se realizaron con 1000 g de mineral con una relación S/L de 2/1, y los resultados se describen en la tabla 8, así también, la figura 16 representa la curva de moliendabilidad, determinada por el modelo $\% - \text{Malla } 200 = 35.969 \ln(\text{tiempo}) - 20.869$, con un coeficiente de correlación de 0.9901.

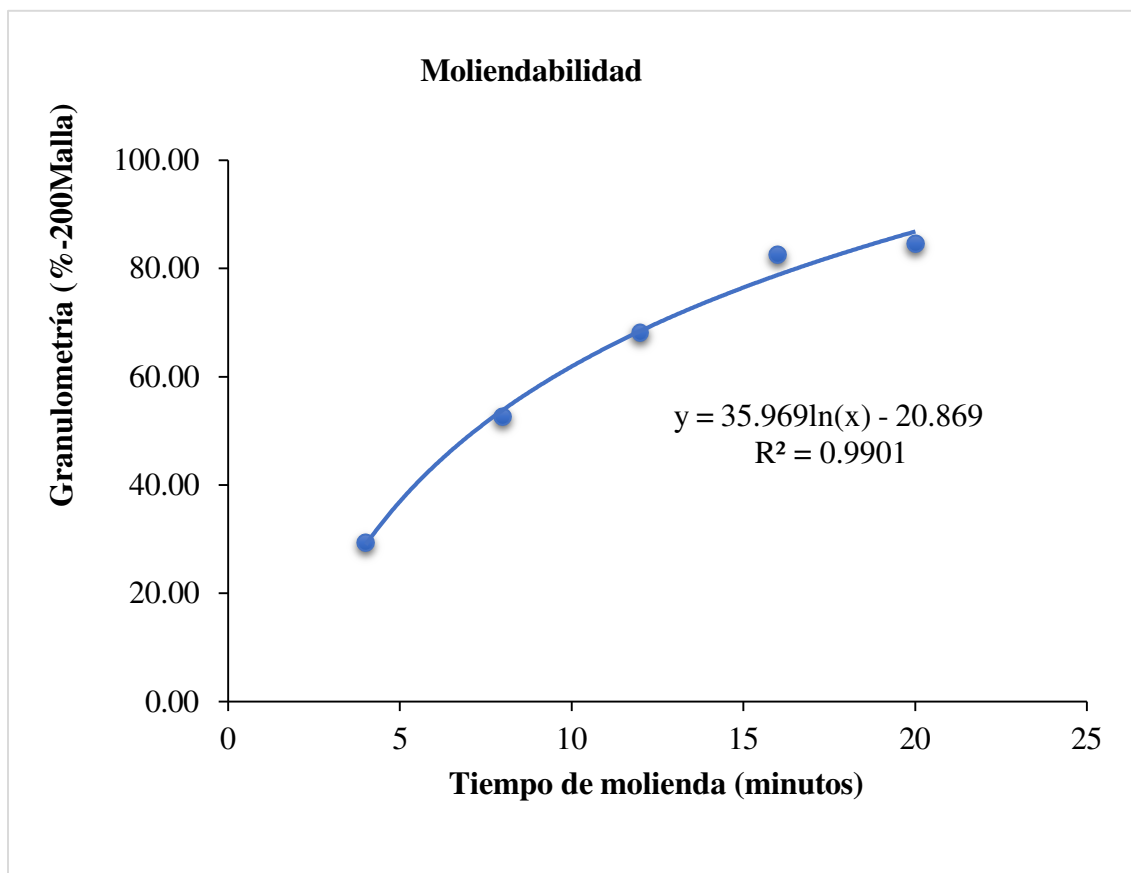
Tabla 8

Variación de la granulometría en función del tiempo de molienda

Tiempo (minutos)	Granulometría (%-200Malla)
4	29.33
8	52.67
12	68.11
16	82.53
20	84.54

Figura 16

Tendencia de la gráfica de moliendabilidad

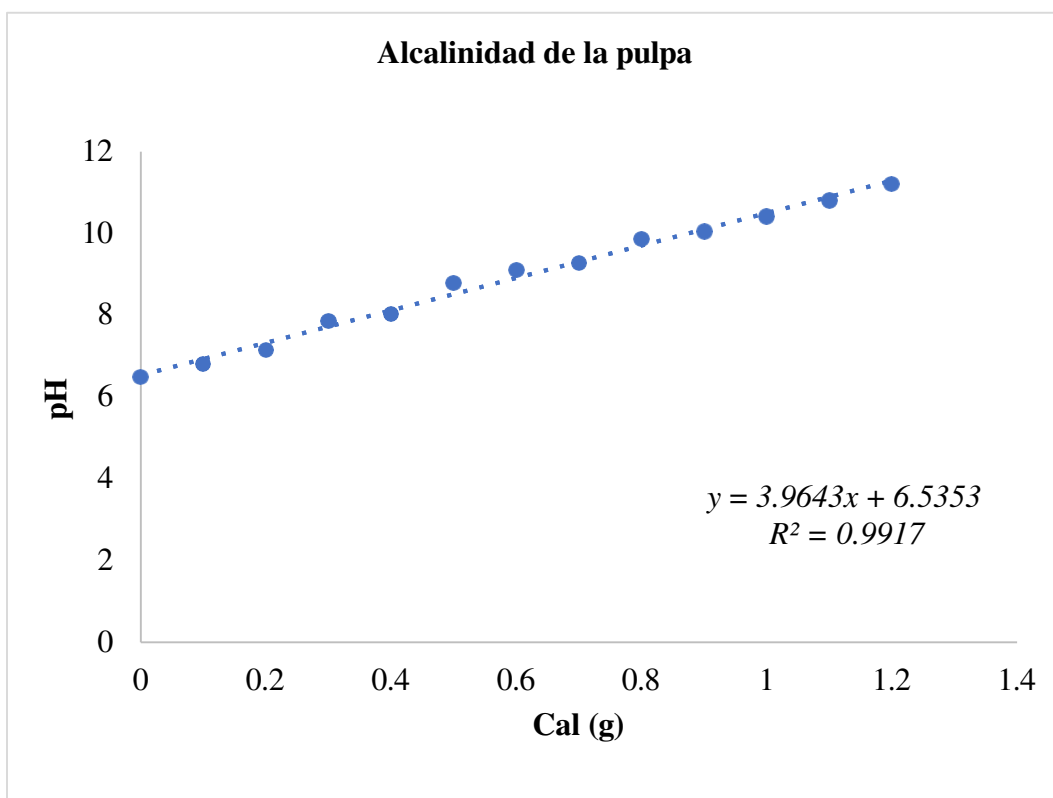


5.4. Pruebas de alcalinidad de la pulpa

Para el desarrollo de las pruebas de lixiviación fue necesario determinar la cantidad de cal necesaria para alcalinizar la pulpa a un pH mayor a 10.5, para lo cual se empleó 200 g de mineral y 600 ml de H₂O mezclados homogéneamente en un vaso de precipitados, y agitados por un magneto, en la cual se determinó que la cantidad de cal necesario para tener un pH de 10.81 fue de 1.1 gramos, tal y como se observa en la tabla 9, además, se ajustó el modelo $\text{pH} = 3.9643(\text{masa de cal}) + 6.5353$, con un coeficiente de correlación de 0.9917, tal y como se presenta en la figura 17.

Tabla 9*pH del medio según el consumo de cal*

Cal(g) Total	pH
0	6.5
0.1	6.8
0.2	7.15
0.3	7.86
0.4	8.03
0.5	8.79
0.6	9.11
0.7	9.28
0.8	9.87
0.9	10.05
1	10.41
1.1	10.81
1.2	11.22

Figura 17*Gráfica de la alcalinidad de la pulpa*

5.5. Lixiviación con Reactivo Sandioss

5.5.1. Evaluación de la granulometría de Lixiviación con Sandioss

Se realizaron pruebas metalúrgicas de lixiviación con reactivo Sandioss, cuyo componente activo de ferricianuro se encuentra en mínimas concentraciones y es considerado reactivo ecoamigable. Las pruebas de lixiviación con reactivo ecológico se llevaron a cabo a distintas granulometrías del mineral a un tiempo de 36 horas, y empleó 200 g de mineral, 600 ml de H₂O, 300 RPM de agitación, y un pH de 11, alcanzando los mejores resultados de recuperación de Ag a una granulometría de 95% - 200 Malla, con un valor de 85.17% de Ag y 88.46% de Au, recuperados en solución. Los resultados de las pruebas se detallan en los balances metalúrgicos de las tablas del 10 al 13.

Tabla 10

Balance de la lixiviación a 80% - Malla 200

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.19	40.45	114.00	24270.00	71.25	75.42	4.25	1
Relave	200	0.23	39.54	46.00	7908.00	28.75	24.58		
Cabeza Cal.		0.80	160.89						

Tabla 11*Balance de la lixiviación a 85% - Malla 200*

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.20	42.64	120.00	25584.00	74.07	80.36	5.11	1.22
Relave	200	0.21	31.26	42.00	6252.00	25.93	19.64		
Cabeza Cal.		0.81	159.18						

Tabla 12*Balance de la lixiviación a 90% - Malla 200*

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.22	45.61	132.00	27366.00	86.84	84.49	6.45	1.53
Relave	200	0.10	25.12	20.00	5024.00	13.16	15.51		
Cabeza Cal.		0.76	161.95						

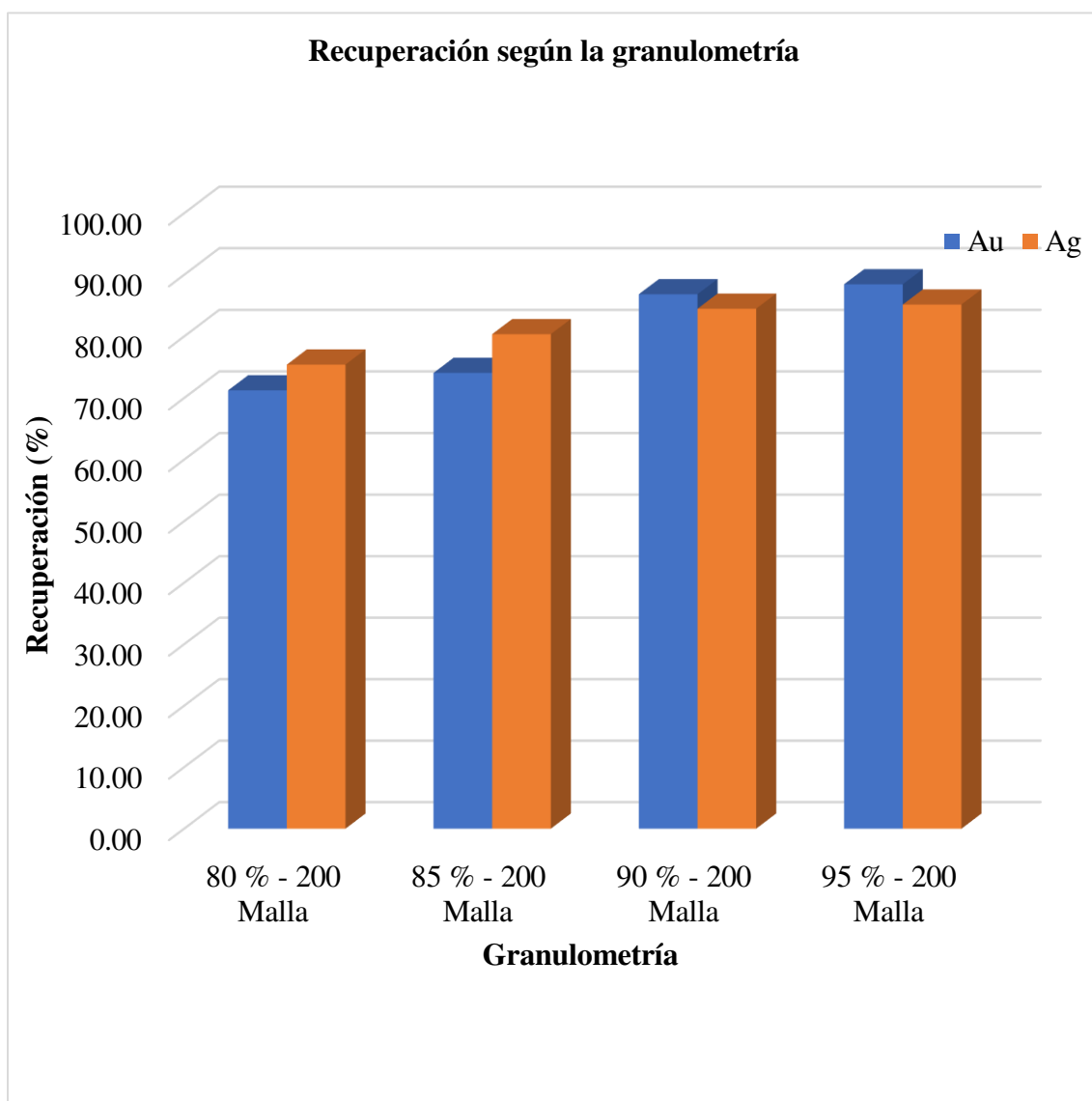
Tabla 13*Balance de la lixiviación a 95% - Malla 200*

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.23	44.31	138.00	26586.00	88.46	85.17	6.53	1.60
Relave	200	0.09	23.14	18.00	4628.00	11.54	14.83		
Cabeza Cal.		0.78	156.07						

En la figura 18 se puede observar un gráfico de barras comparativos que fue necesario para determinar la granulometría óptima de lixiviación, en la cual se observó que la recuperación de los valores metálicos aumenta hasta una granulometría de 95% - 200 Malla, y luego se mantiene casi constante.

Figura 18

Gráfico comparativo de las recuperaciones de Au-Ag en función de la granulometría



5.5.2. Cinética de Lixiviación con Sandioss

Teniendo en cuenta la granulometría óptima de lixiviación, se evaluó la cinética de la recuperación de Ag, desarrollando pruebas en botella para tiempos de 12, 24, 36, 48, y 60 horas de proceso bajo las mismas condiciones de operación de las pruebas anteriores, determinado la mayor recuperación de 86.14% de Ag y en un tiempo de 48 horas. El total de los resultados se detallan en los balances metalúrgicos de las tablas del 14 al 18, además, la cinética de lixiviación en la figura 19 demuestra que, a partir de las 24 horas de proceso, la recuperación de Au aumenta lentamente desde 88.46% a 88.89%, valor donde la pendiente de la curva se hace casi horizontal.

Tabla 14

Balance de la lixiviación a 12 horas

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.18	26.45	108.00	15870.00	70.13	49.81	3.11	0.72
Relave	200	0.23	79.96	46.00	15992.00	29.87	50.19		
Cabeza Cal.		0.77	159.31						

Tabla 15

Balance de la lixiviación a 24 horas

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.22	44.60	132.00	26760.00	86.84	82.28	6.33	1.27
Relave	200	0.10	28.82	20.00	5764.00	13.16	17.72		
Cabeza Cal.		0.76	162.62						

Tabla 16*Balance de la lixiviación a 36 horas*

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.23	45.56	138.00	27336.00	88.46	85.70	6.91	1.33
Relave	200	0.09	22.81	18.00	4562.00	11.54	14.30		
Cabeza Cal.		0.78	159.49	156.00	31898.00				

Tabla 17*Balance de la lixiviación a 48 horas*

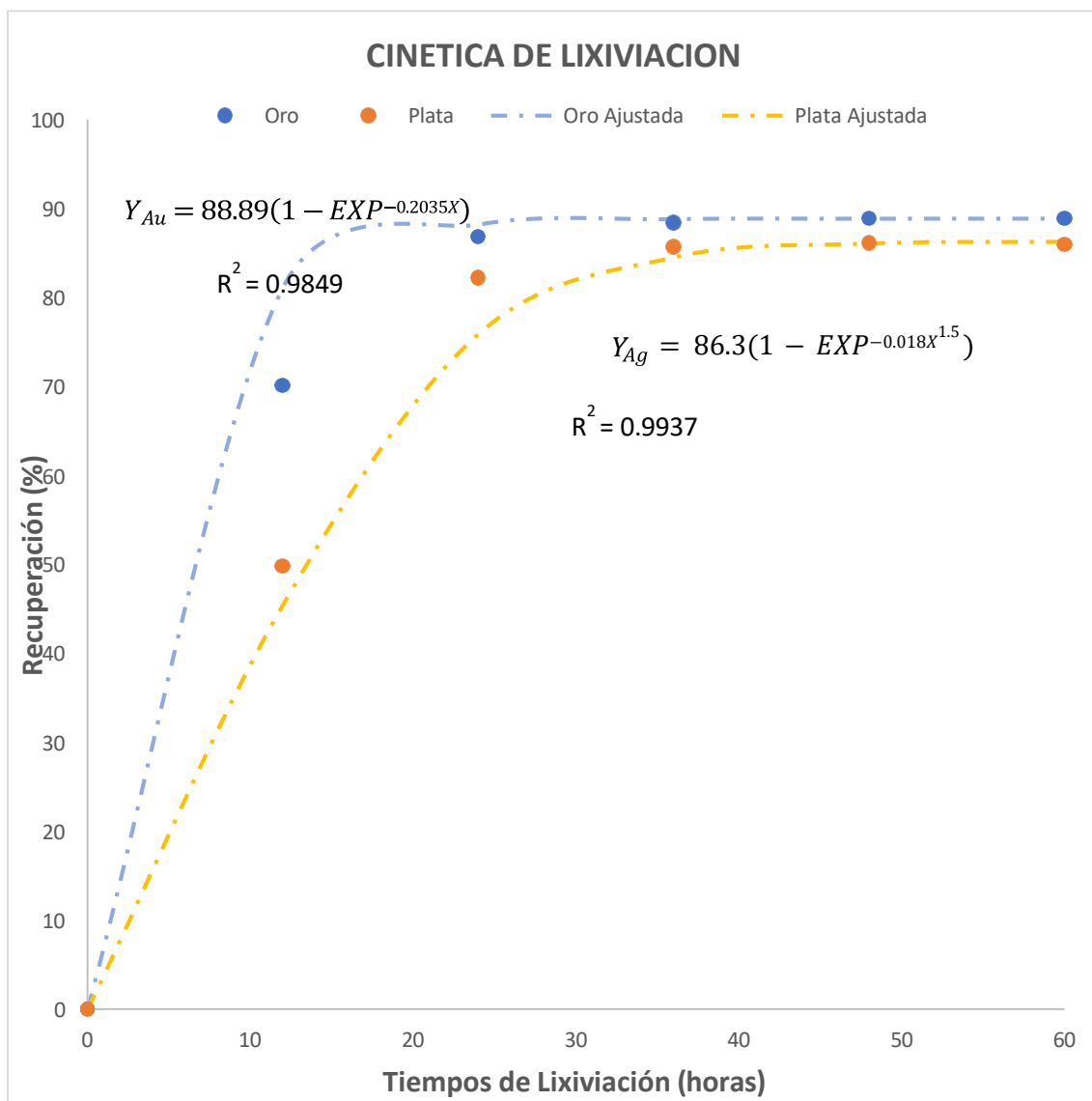
Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.24	45.86	144.00	27516.00	88.89	86.14	6.97	1.35
Relave	200	0.09	22.14	18.00	4428.00	11.11	13.86		
Cabeza Cal.		0.81	159.72						

Tabla 18*Balance de la lixiviación a 60 horas*

Componentes	Peso ó Volumen (g ó ml)	Ley (mg/lit ó g/TM)		Contenido Fino		Recuperación (%)		Consumo de reactivos (kg/TM)	
		Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Sandioss	Cal
Cabeza	200	1.02	5.23						
Solución rica	600	0.24	44.88	144.00	26928.00	88.89	85.97	7.01	1.42
Relave	200	0.09	21.97	18.00	4394.00	11.11	14.03		
Cabeza Cal.		0.81	156.61						

Figura 19

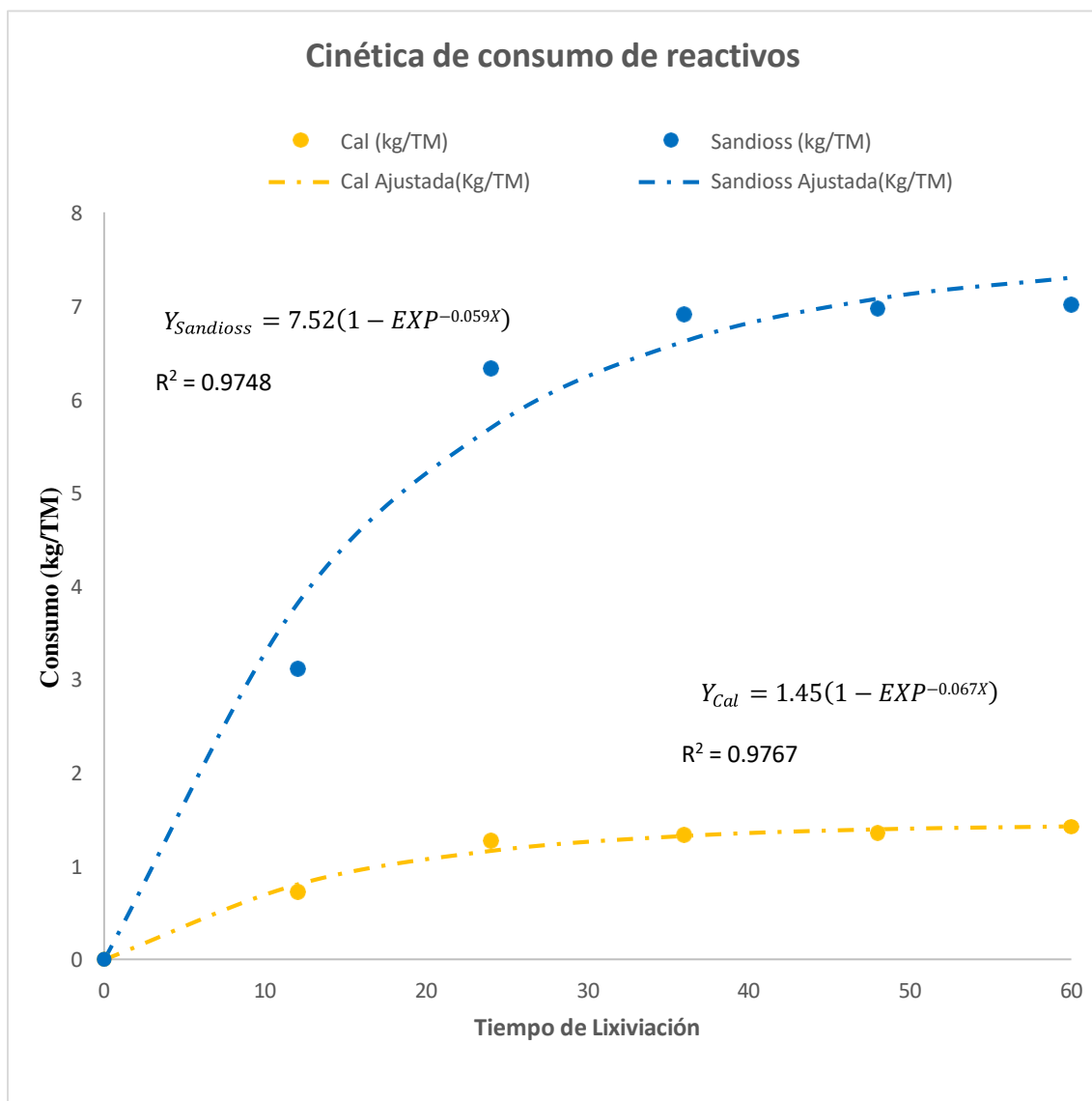
Gráfico comparativo de las recuperaciones de Au-Ag en función del tiempo de lixiviación



La figura 20 representa el consumo de los reactivos Sandioss y cal, determinados para cada prueba de lixiviación en botella, en la cual se ajustaron los modelos que describen los consumos para Sandioss: $y_{\text{Sandioss}} = 7.52(1 - \text{Exp}^{-0.059x})$, con un coeficiente de correlación de 0.9748, y consumo de cal: $y_{\text{Cal}} = 1.45(1 - \text{Exp}^{-0.067x})$, con un coeficiente de correlación de 0.9767.

Figura 20

Gráfico comparativo de los consumos de reactivos en la lixiviación



5.6. Precipitación de Au-Ag con Polvo de Zinc

Se investigó el proceso de precipitación de Ag y Au con polvo de Zn, a partir de los licores ricos de lixiviación de Ag, llevando a cabo por las etapas de clarificación, desoxigenación, precipitación con polvo de zinc y filtración.

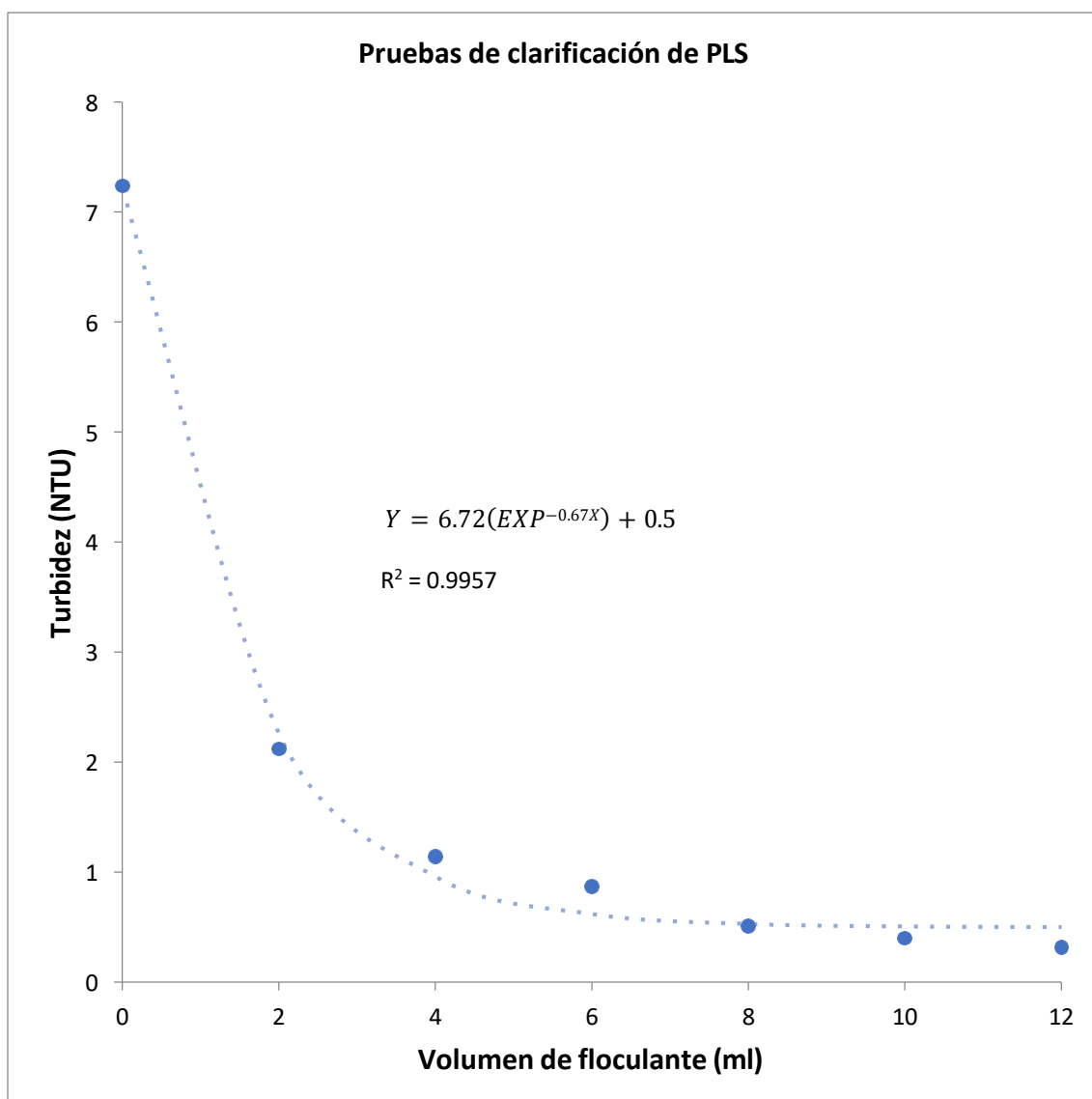
5.6.1. Clarificación del PLS

Para garantizar la clarificación de la solución rica de lixiviación con Sandioss, se desarrollaron pruebas de clarificación de la solución en función a la dosificación de floculante a una concentración de 0.1%, con la finalidad de determinar la dosificación necesaria para alcanzar valores de turbidez menores a 1 NTU. Las pruebas se desarrollaron en un agitador magnético a 300 RPM y 300 ml de solución rica de lixiviación, agitando la mezcla por 10 minutos y luego dejándola reposar por 10 minutos; y los resultados de las pruebas determinaron que una dosis de 6 ml de floculante preparado a una concentración de 0.1% generó una turbidez de 0.87 NTU, tal y como se describe en la tabla 19. La figura 21 gráfica la medida de la turbidez en función del volumen de floculante dosificado.

Tabla 19

Nivel de turbidez según la dosis del floculante

Dosificación de floculante (ml)	Turbidez (NTU)
0	7.24
2	2.12
4	1.14
6	0.87
8	0.51
10	0.4
12	0.32

Figura 21*Gráfico comparativo de las pruebas de clarificación***5.6.2. Desoxigenación del PLS**

Luego de establecer los niveles de turbidez menor a 1 NTU se desoxigeno el PLS empleando una bomba de vacío y un matraz Kitasato de 2 lt, analizándose la concentración de oxígeno luego de 5 minutos de la presión de vacío. Se determinó que a una presión de 25 PSI se logró una concentración de oxígeno en solución de 0.95 mg/lit, tal y como se puede observar en la tabla 20, así también, la figura 22 representa la

concentración de oxígeno en función de la presión de vacío, la cual obedeció al modelo:

$[O_2] = -0.14 * (\text{Presión (PSI)}) + 4.47$, con un coeficiente de correlación de 0.975.

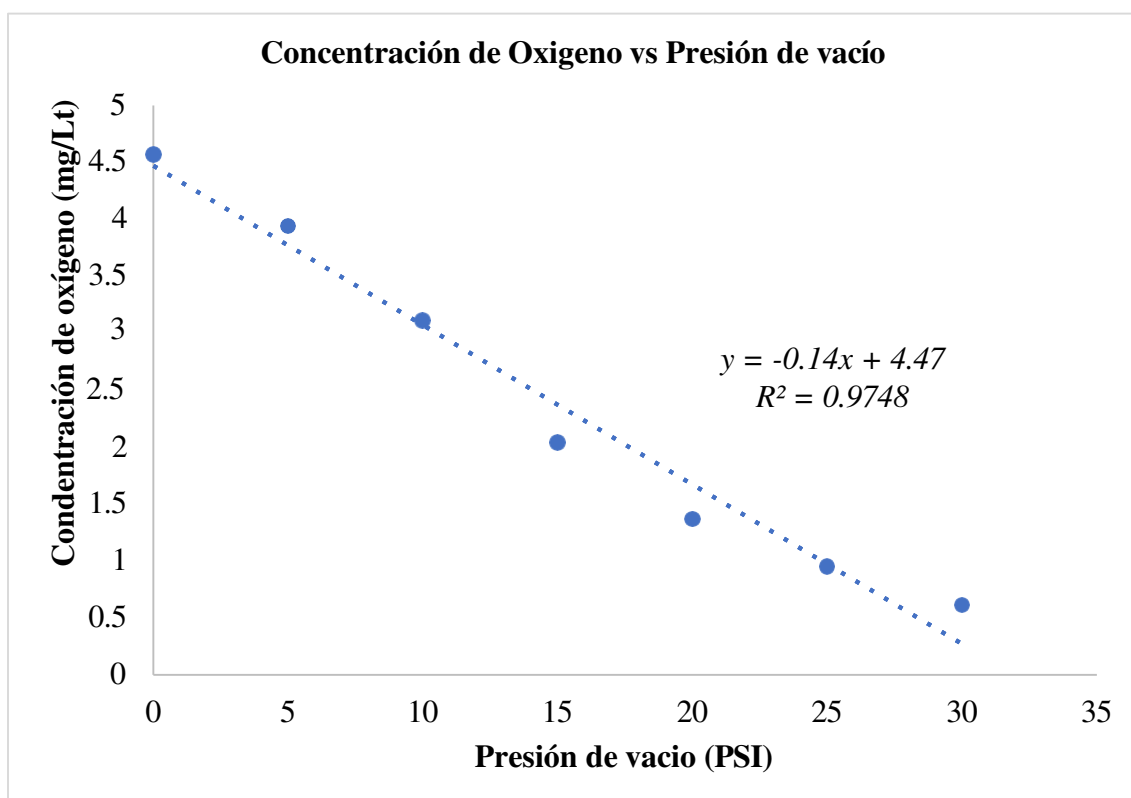
Tabla 20

Concentración de oxígeno gaseoso según el PSI

Presión de vacío (PSI)	[O ₂] en (mg/l)
0	4.57
5	3.94
10	3.11
15	2.04
20	1.37
25	0.95
30	0.61

Figura 22

Gráfico comparativo de las pruebas de desoxigenación



5.6.3. Precipitación con Polvo de Zinc

Habiendo establecido los niveles de presión de vacío, se evaluó la precipitación de Ag con distintas masas de polvo de zinc, para concentraciones de oxígeno en solución de 0.61 y 0.95 mg/lit. Las pruebas se realizaron para una solución con una ley de 45.86 mg-Ag/lit y 0.24 mg-Au/lit, de las cuales se proyectó el consumo inicial de polvo de Zn, teniendo en cuenta que un mol de Ag u Au precipita con un mol de Zn, además de asignarle un exceso por la concentración de otros elementos.

Las pruebas de precipitación con polvo de Zn a una concentración de 0.61 ppm de O₂, determinó la mayor precipitación del 99.89% de Ag y 99.58% de Au para una masa de 140.57 mg de polvo de zinc, por otro lado, los resultados más bajos fueron con una masa de 100.24 mg, con valores de 95.14 % de Ag y 95.83% de Au, tal y como se puede observar en la tabla 21.

Tabla 21

Recuperación de Au y Ag con precipitación de polvo de zinc (O₂ = 0.61 ppm)

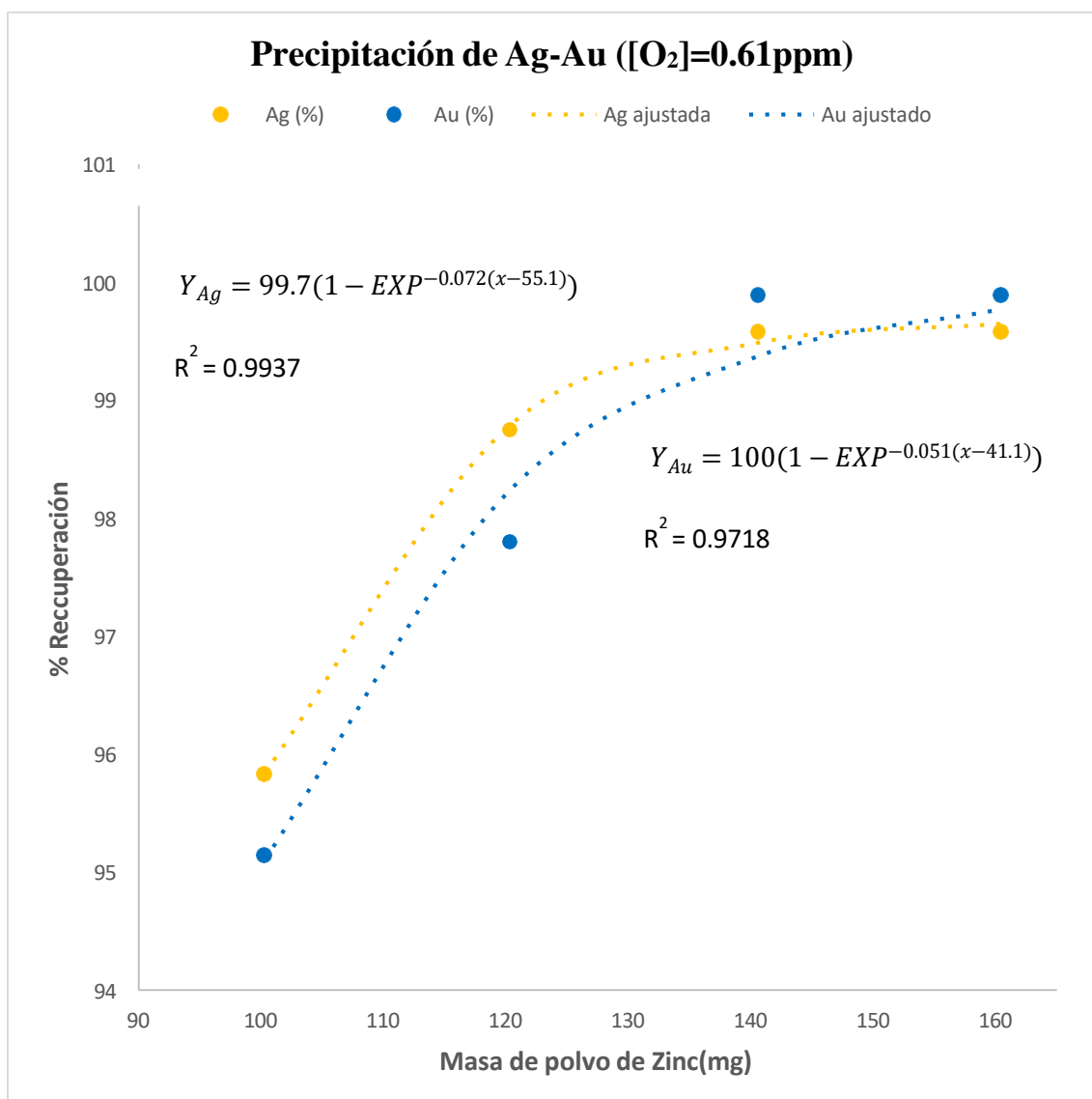
Polvo de Zinc (mg)	Ley Sol. Rica(mg/lit)		Ley Sol. Barren (mg/lit)		% Recuperación	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
100.24	0.24	45.86	0.01	2.23	95.83	95.14
120.33	0.24	45.86	0.003	1.01	98.75	97.80
140.57	0.24	45.86	0.001	0.05	99.58	99.89
160.41	0.24	45.86	0.001	0.05	99.58	99.89

Nota: Leyes reportadas por el laboratorio H&F Laboratorios SAC.

En la figura 23 se gráfica los resultados de la precipitación de la Ag en función de la masa de polvo de Zn, dosificado a una [O₂] en solución de 0.61 ppm, demostrando que se alcanzan los mismos valores de precipitación de Ag con masas de polvo de Zn superiores a 140.57 gramos.

Figura 23

Comparativa de la precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.61$ ppm)



Las pruebas de precipitación con polvo de Zn a una concentración de 0.95 ppm de O_2 , determinó la mayor precipitación de 98.80% de Ag y 99.17% de Au para una masa de 160.07 mg de polvo de zinc, por otro lado, los resultados más bajos fueron con una masa de 100.11 mg, con valores de 93.72 % de Ag y 91.67% de Au, tal y como se puede observar en la tabla 22.

Tabla 22

Recuperación de Au y Ag con precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.95$ ppm)

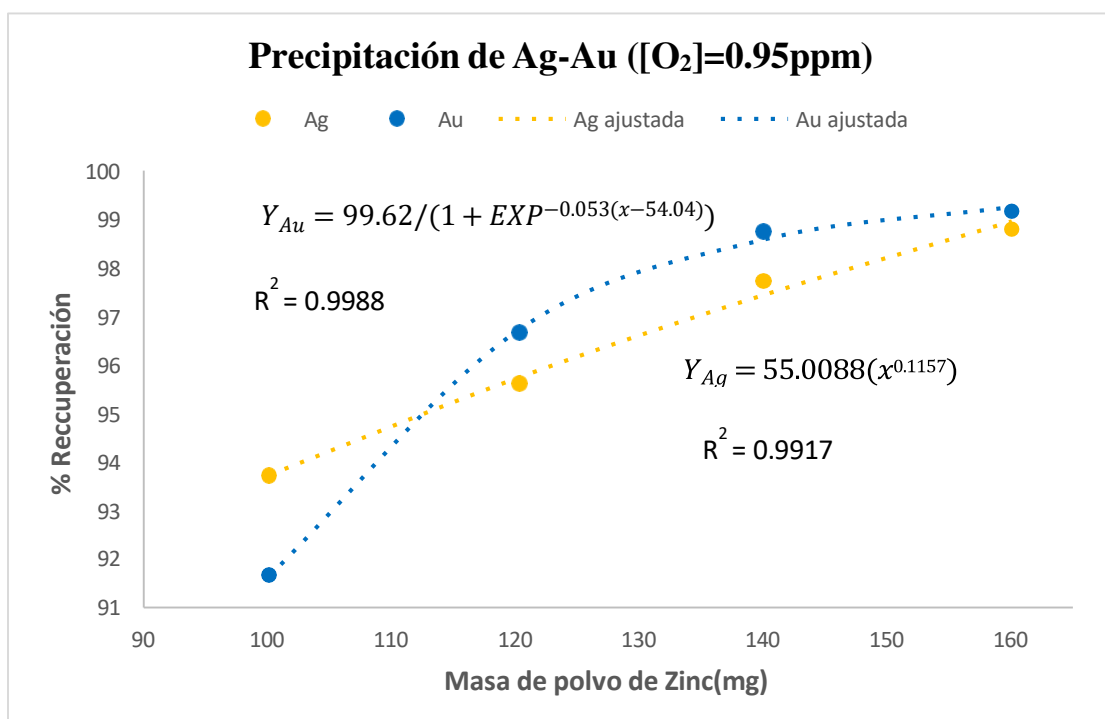
Polvo de Zinc (mg)	Ley Sol. Rica (mg/lit)		Ley Sol. Barren (mg/lit)		% Recuperación	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
100.11	0.24	45.86	0.020	2.88	91.67	93.72
120.37	0.24	45.86	0.008	2.01	96.67	95.62
140.02	0.24	45.86	0.003	1.04	98.75	97.73
160.07	0.24	45.86	0.002	0.55	99.17	98.80

Nota: Leyes reportadas por el laboratorio H&F Laboratorios SAC.

Los resultados de la precipitación de la Ag en función de la masa de polvo de Zn, dosificado a una $[O_2]$ en solución de 0.95 ppm, demostrando que se alcanzaron los máximos valores de precipitación de Ag con una masa de polvo de Zn de a 160.07 gramos, sin embargo, los valores reportados bajo estas condiciones son menores y se puede observar en el gráfico comparativo de la figura 24.

Figura 24

Comparativa de la precipitación de polvo de zinc ($O_2 = 0.95$ ppm)



CAPÍTULO VI: Discusión de Resultados

Un lote de mineral representativo del yacimiento de minerales argentíferos se redujo de tamaño empleando una chancadora de quijadas, hasta una granulometría de 100% - 10 Malla, la cual fue cuarteada para almacenar un lote de pruebas, y un lote de muestra testigo. Para identificar las especies de minerales presentes en la muestra, se realizó un ensayo de microscopía óptica a una granulometría de 81.44% - 200 Malla, la cual determinó la presencia de Ag nativa con una distribución volumétrica del 0.05 %, además de 25.92 % de py, y 67.47% de gangas. Así también, se pudo identificar partículas mixtas de Ag-gn del tipo ameboide y concéntrico, y los ensayos químicos correlacionaron los datos de la microscopía, con leyes de 1.02 g-Au/TM, 5.23 Oz-Ag/TC, 0.5% de Pb y 0.5% de Zn, ensayándose por método de vía seca para metales preciosos, y métodos volumétricos para Pb y Zn. Posterior a la caracterización física y química del mineral, se desarrollaron pruebas metalúrgicas de moliendabilidad, la cual determinó que a los 16 minutos se alcanzó una granulometría de 82.53%, ajustando el modelo cinético de reducción de tamaño: $\% - \text{Malla } 200 = 35.969 \ln(\text{tiempo}) - 20.869$, con un coeficiente de correlación de 0.9901, además, las pruebas de alcalinidad determinaron que para obtener un pH de 10.81 en una solución de 200 ml, fue necesario agregar 1.1 gramos de cal, y se ajustó el modelo de alcalinidad igual a : $\text{pH} = 3.9643(\text{masa de cal}) + 6.5353$, con un coeficiente de correlación de 0.9917.

Teniendo en cuenta a la mineralogía, se desarrollaron pruebas de lixiviación con Sandioss para recuperar Ag y Au, a distintas granulometrías, logrando los mejores resultados a una granulometría de 95% - 200 Malla, posterior a ello, se llevaron a cabo pruebas de cinética de lixiviación en botella para tiempo de 12, 24, 36, 48, y 60 horas, alcanzando la mayor recuperación de 86.14 % de Ag y 88.89 % de Au con un consumo

de 6.97 Kg/TM de sandioss y 1.35 Kg/TM de cal, en un tiempo de 48 horas, observándose un ligero aumento en la recuperación de los valores pasando las 24 horas de proceso. Las pruebas de lixiviación se desarrollaron en una mesa de rodillo y empleando una botella tipo “mamajuana”, en la cual se mezcló 200 gramos de mineral con 600 ml de H₂O, dando vuelta a razón de 300 RPM.

Las pruebas de investigación de la lixiviación con Sandioss a partir de un mineral argentífero presentaron una mineralogía similar a la muestra de investigación sustentada por **Ramos (2019)**, sin embargo, la diferencia es que ellos investigaron un tipo de relave de flotación, cuyas mejores pruebas apenas sobrepasaron el 50 % de recuperación de Ag, además de ello, la principal diferencia radica en el empleo del cianuro como reactivo de lixiviación.

Un trabajo similar fue el propuesto por **Calcina (2019)**, quien desarrolló pruebas de precipitación con polvo de Zinc a nivel de laboratorio, sin embargo, además de la variable de cantidad de polvo de zinc dicho autor investigó la alcalinidad de la solución, y cantidad de acetato de plomo, siendo estas últimas variables la principal diferencia con respecto a la presente investigación. En general, en ambos casos, la recuperación fue superior al 99%.

Con relación al trabajo sustentado por **Zapana (2019)**, se mantiene una similitud de que el autor investigó la optimización de la masa de polvo de Zinc dosificado en el proceso, además concluyó que realizó una dosificación óptima del 320% en exceso del valor estequiométrica, valor en exceso similar al presentado en nuestra investigación. Con respecto a la recuperación de los valores, logró obtener recuperaciones del 99%, valor muy similar al obtenido en la presente investigación.

En comparación con el trabajo realizado por **Chambi (2018)**, se tiene la diferencia de que dicho autor investigó un relave con alto contenido de Ag, mediante el proceso de

cianuración, además de ello, sustentaron una recuperación menor de Ag, con valores cercanos a 65%.

La evaluación del proceso de precipitación con polvo de Zinc a partir de los licores ricos de lixiviación con Sandioss, permite evaluar la performance metalúrgica de precipitación de metales preciosos a partir de las soluciones con reactivos sintéticos, la cual sigue manteniendo el ion cianuro como ferrocianuro, como ligando, además que existe la presencia de otros iones metálicos que se espera se solubilicen en el PLS, como es el caso del Na, K, Ca, entre otros. La literatura de los procesos de recuperación de metales a partir de soluciones con reactivos sintéticos sigue siendo escasa, sin embargo, en los últimos años se ha venido desarrollando no solo a nivel académico, inclusive se conoce de operaciones que se vienen desarrollando a escala piloto en el Perú. Los resultados obtenidos son bastantes alentadores, y las bondades que proponen estos reactivos es sin duda uno de los motores de la presente investigación, la cual enfatiza en establecer parámetros para recuperar metales preciosos en solución, contribuyendo con el medioambiente, minimizando notoriamente los riesgos medioambientales que son inherentes a los procesos convencionales.

CONCLUSIONES

- El proceso Merrill-Crowe demuestra ser efectivo para la recuperación de plata a partir de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash, logrando una recuperación de 99.89% de Ag y 99.58% de Au, a partir de un PLS con leyes de 45.86 mg-Ag/lit y 0.24 mg-Au/lit, con una turbidez de 0.32 NTU que se alcanzó con la dosificación de 12 ml de floculante al 0.01%, 0.61 mg/lit de [O₂] que se alcanzó con 5 minutos de presión de vacío a 30 PSI, y 160.07 mg de polvo de Zn, validando la hipótesis planteada y cumpliendo con el objetivo de la investigación.
- La caracterización de la muestra representativa del mineral de cabeza identificó la presencia de 0.05% de Ag nativa, además de ef, gn, py, mt, rt, y GGs, así también se determinó que las mayores distribuciones correspondieron a la py, y GGs, con distribuciones de 25.92%, y 67.47%, respectivamente. También halló partículas mixtas de Ag-gn, con tipos de enlaces ameboide y concéntrico, con distribuciones de 0.09% y 0.18%, respectivamente.
- Las pruebas de cinética de lixiviación con Sandioss, determinaron la mayor recuperación de solución de 86.14% de Ag y 88.89% de Au con un consumo de 6.97 Kg/TM de Sandioss, y 1.35 Kg/TM de cal, en un tiempo de 48 horas de proceso, trabajando con 200 g. de mineral, 600 ml de H₂O, pH =11, 300 RPM, y a una granulometría de 95% - 200 Malla.
- Los resultados obtenidos demuestran que la concentración de oxígeno tiene una influencia significativa en la precipitación de plata con polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe. Se evidenció que una concentración de oxígeno de 0.61 ppm favorece una mayor precipitación de plata en comparación con una concentración

de 0.95 ppm, se concluye, a menor concentración de oxígeno mayor la recuperación.

- Teniendo en cuenta los mejores resultados, la recuperación total de Ag en las pruebas de lixiviación con Sandioss y precipitación con polvo de Zn alcanzó un 86.05% de Ag, y 88.51% de Au.

RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas metalúrgicas comparativas con el proceso convencional de cianuración, además de estimar una evaluación económica comparativa.
- Realizar pruebas a escala piloto para determinar el comportamiento del reactivo a nivel semi industrial.
- Realizar la lixiviación con Sandioss con los diferentes proveedores de este reactivo y comparar su efectividad
- Evaluar los impactos medioambientales generados por la descomposición del reactivo en los relaves.
- Realizar un estudio termodinámico detallado de las reacciones de formación de complejos con respecto a los reactivos sintéticos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ascuña, V., Zela, J., Bolaños, H., Mamani, R., & Huanca, P. (2018). Tratamiento de soluciones de cianuro y precipitación de metales cianicidas por reacción con peróxido de hidrógeno y soda caústica, el método perso; obtención de lodos económicamente útiles. *Revista Boliviana de Química*, 35(5), 161-167. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602018000500005&lng=es&tlng=es
- Ayala, J. (2015). *Evaluación del proceso Merrill Crowe en la planta de la unidad minera Tucari S.A.C.* Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2702>
- Barreto, J. A., Rojas, V. S., Salazar, L. A., Ugarte, J. R., Figueroa, L. S., Perez, W. L., & Zevallos, S. E. (2023). *Caracterización y lixiviación ecológica para recuperar metales preciosos en relaves de amalgamación – Puno* (Vol. 26). Lima: Rev. Inst. InvestIg. Fac. Minas, Metal, Cienc, Geogr. Obtenido de <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25358>
- Bustanza, V. (2019). *Estudio del uso de nitrato de plomo para optimizar la recuperación de oro en el proceso de cianuración.* Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9102>
- Calcina, I. (2019). *Propuesta de mejora de la recuperación de oro a través del proceso de Merrill Crowe en el área de desorción de la planta La Joya Mining S.A.C.* Arequipa: Universidad Tecnológica del Perú. Obtenido de <https://repositorio.utp.edu.pe/handle/20.500.12867/1979>
- Chambi, E. (2018). *Estudio del procedimiento de cianuración por agitación para la extracción de plata en relaves de Villa De Pasco – Tinyahuarco – 2017.* Tesis de

- licenciatura, Universidad Alas Peruanas, Pasco. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12990/3273>
- Chavez, A. (2018). *Evaluación y Mejora de la Etapa de Clarificación en el Proceso Merrill Crowe usando una Tierra diatomea de Menor Densidad*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8532>
- Dirección de Promoción Minera. (2023). *Boletín Estadístico Minero, Edición N° 12*. Boletín, Ministerio de Energía y Minas, Lima.
- Gobierno Distrital de Shupluy. (2022). *Plan de prevención y reducción del riesgo de desastres del distrito de Shupluy 2022-2023*. Shupluy: Gobierno Distrital de Shupluy. Obtenido de <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/14082>
- Goldfarb, R., Marsh, E., & Monecke, T. (2010). *The Challenge of Finding New Mineral Resources: Global Metallogeny, Innovative Exploration, and New Discoveries* (Primera ed., Vol. XV). Society of Economic Geologists. Obtenido de <https://doi.org/10.5382/SP.15.1>
- Huaco, M. (2017). *Evaluación del porcentaje de disolución de oro en la lixiviación con sandioss mediante diseños experimentales*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3361>
- Lara, M. (2016). *Empleo del sulfuro de sodio e hidróxido de sodio para la disminución de la concentración de antimonio de un mineral refractario de oro y plata como pre tratamiento del proceso de lixiviación*. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3754>
- Lescano, M., & Oyarce, E. (2015). *Proceso de lixiviación a nivel artesanal para la obtención de los parámetros óptimos en la recuperación de plata y oro en el*

- distrito de Simbron de la provincia de Gran Chimú*. Trujillo: Universidad Nacional de Trujillo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14414/3633>
- Lovera, D., Peralta, B., Chang, E., & Arias, V. (2018). Lixiviación de plata de minerales sulfurados argentíferos del complejo Maraón empleando el reactivo SANDIOSS. *Revista de Investigación: Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 4(1), 42-54. Obtenido de <https://doi.org/10.17162/rictd.v4i1.1071>
- Mamani, V. (2022). *Optimización de la recuperación de minerales sulfurados de plata mediante el control de la densidad de pulpa en tanques de lixiviación*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15717>
- Palyanova, G. (2020). Gold and Silver Minerals in Sulfide Ore. *Geology of Ore Deposits*, 62, 383-406. Obtenido de <https://doi.org/10.1134/S1075701520050050>
- Ramos, A. (2019). Lixiviación de plata a temperatura alta en mineral complejo de pirita. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 85(1), 97-108. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2019000100010&lng=es&tlng=es
- Ramos, A. (2019). *Recuperación de plata de los relaves de flotación, mediante la lixiviación en la Empresa Administradora Cerro SAC*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/15717>
- Sandioss vs Cianuro*. (2015). Obtenido de Nature Business Bioper : <https://www.bioper.com.pe/>
- Snyders, C., Bradshaw, S., Akdogan, G., & Eksteen, J. (2014). The effect of temperature, cyanide and base metals on the adsorption of Pt, Pd and Au onto activated carbon. *Hydrometallurgy*, 149, 132-142. doi:10.1016/j.hydromet.2014.07.012

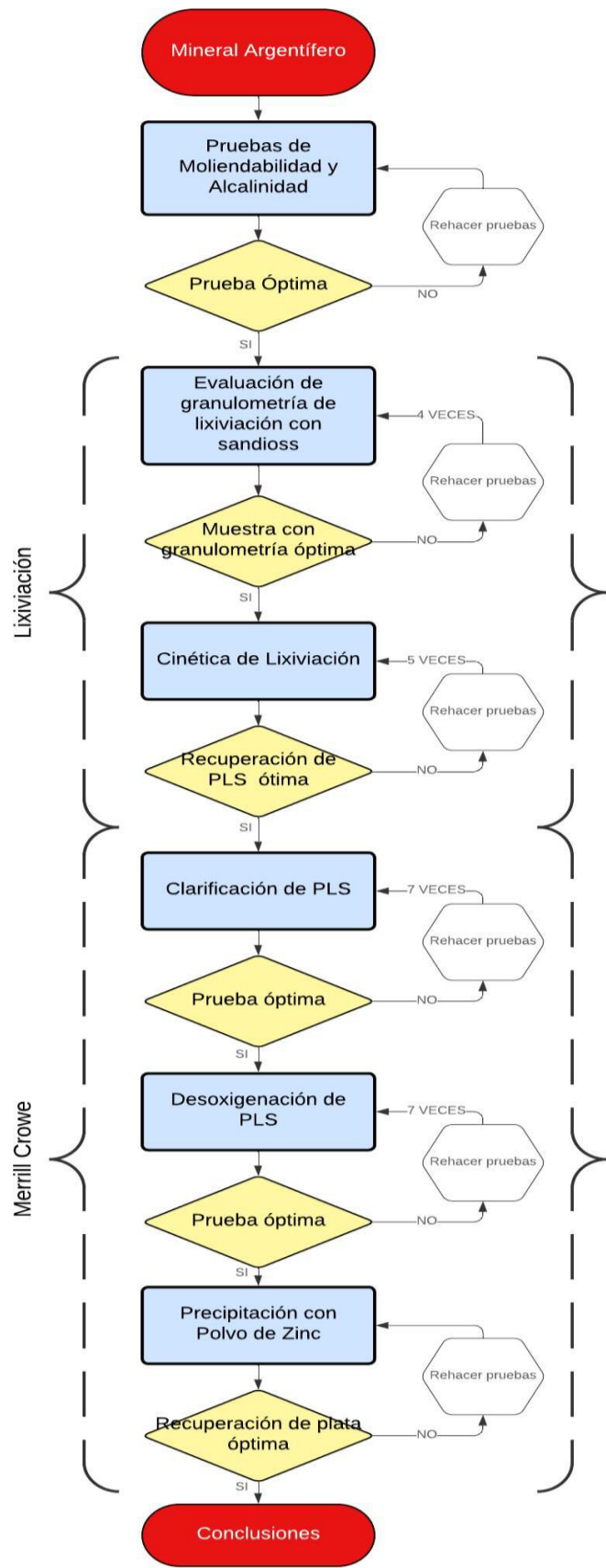
- Weigang, K., & Jingyu, C. (2022). *Experimental Research on Environmental Friendly Gold Leaching of a Refractory Gold Ore in Laos*. Tianjin, China: Tianjin Huakan Group Co. Obtenido de <http://en.cgsjournals.com/article/doi/10.3969/j.issn.1000-6532.2022.03.023>
- Zaldaña, E., & Zavaleta, G. (2016). *Influencia de la temperatura y de la granulometría en el pre-tratamiento por lixiviación alcalina (Na₂S y NaOH) de un mineral refractario con contenido de arsénico(As) procedente de Sayapullo, para incrementar la recuperación de oro mediante cianuración*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.14414/8793>
- Zapana, A. (2019). *Adecuamiento y optimización del consumo de zinc en la etapa de Merrill Crowe de la unidad minera Arasi - Puno*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín. Obtenido de <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13075>

ANEXOS

ANEXO 1 Matriz de consistencia

"RECUPERACIÓN DE PLATA MEDIANTE EL PROCESO MERRILL-CROWE DE UNA SOLUCIÓN LIXIVIADA DEL MINERAL ARGENTÍFERO CON SANDIOSS, SHUPLUY - ANCASH"				
Problema general	Objetivo general	Hipótesis		
		Hipótesis general	Variables de la hipótesis general	
			Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué forma el proceso Merrill-Crowe permitirá recuperar plata a partir de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash?	Recuperar plata mediante el proceso Merrill-Crowe de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash.	El proceso Merrill-Crowe permitirá recuperar plata de una solución lixiviada del mineral argentífero con Sandioss en el distrito de Shupluy, Ancash.	Granulometría	Se reportan en % - Malla 200
			Tiempo de lixiviación	Se reportan en horas
			Concentración de oxígeno	Se reportan en % de oxígeno disuelto (OD)
			Masa de polvo de zinc	Se reportan en g/lit
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variables de las hipótesis específicas	
Problema específico N°1	Objetivo específico N°1	Hipótesis específica N°1	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué manera la caracterización identificará los minerales de valor económico, su distribución, grados de liberación y enlaces presentes en el mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash?	Identificar los minerales, su distribución, grados de liberación y enlaces presentes, mediante la microscopía óptica del mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.	La caracterización del mineral argentífero permitirá identificar las especies involucradas, grados de liberación, distribución y enlaces presentes en el mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.	Especies y enlaces presentes	Se observan en el microscopio óptico de luz reflejada
			Distribución volumétrica	Se reportan en porcentaje
			Grados de liberación	Se reportan en porcentaje
Problema específico N°2	Objetivo específico N°2	Hipótesis específica N°2	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo podemos recuperar solución de plata empleando el proceso de lixiviación con Sandioss del mineral argentífero proveniente del distrito de Shupluy, Ancash?	Recuperar solución de plata mediante el proceso de lixiviación con Sandioss del mineral argentífero proveniente del distrito de Shupluy, Ancash.	La lixiviación con Sandioss permitirá recuperar solución de plata del mineral argentífero del distrito de Shupluy, Ancash.	Granulometría	Se reportan en % - Malla 200
			Tiempo de lixiviación	Se reportan en horas
Problema específico N°3	Objetivo específico N°3	Hipótesis específica N°3	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿Cómo influye la concentración de oxígeno en la precipitación de plata con polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe?	Determinar la influencia de la concentración de oxígeno en la precipitación de plata mediante el uso de polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe.	La concentración de oxígeno influye significativamente en la precipitación de plata con polvo de zinc en el proceso Merrill-Crowe, siendo posible que concentraciones más bajas de oxígeno favorezcan una mayor precipitación de plata en comparación con concentraciones más altas	Masa de polvo de zinc	Se reportan en g/lit
			Concentración de oxígeno	Se reportan en ppm
Problema específico N°4	Objetivo específico N°4	Hipótesis específica N°4	Nombre de la variable	Técnicas de recolección de datos
¿De qué forma podemos tener una recuperación total mayor al 85% de plata empleando el proceso Merrill-Crowe de la solución lixiviada de la primera etapa?	Recuperación total mayor al 85% de plata mediante el proceso Merrill-Crowe de la solución lixiviada de la primera etapa.	El proceso Merrill Crowe permitirá tener una recuperación total mayor al 85% de plata de la solución lixiviada de la primera etapa.	Concentración de oxígeno	Se reportan en % de oxígeno disuelto (OD)
			Masa de polvo de zinc	Se reportan en g/lit

ANEXO 2 Diagrama de flujo del proyecto



ANEXO 5 Imágenes de las soluciones obtenidas en las pruebas en el laboratorio

