

“UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN”

“FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y METALURGIA”

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica



**“EVALUACION DEL CIANURO DE SODIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
PROCESO METALÚRGICO DE LA PLANTA DE BENEFICIO SANTA FILOMENA II
DE LA EMPRESA SOTRAMI S.A”**

“TESIS”

**PARA OBTENER EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGICO**

AUTOR:

Bach. HUERTA SOLANO, Christian Rubén

ASESOR:

Mg. IPANAQUE ROÑA, Juan Manuel

CIP 66303

HUACHO – PERU

2019

**“EVALUACION DEL CIANURO DE SODIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL
PROCESO METALÚRGICO DE LA PLANTA DE BENEFICIO SANTA
FILOMENA II DE LA EMPRESA SOTRAMI S.A”**

PRESENTADO POR:

Bach. HUERTA SOLANO, Christian Rubén

TESIS

Dr. SALCEDO MEZA, Máximo Tomas

Registro CIP 15140

Presidente

M(o). ABARCA RODRIGUEZ, Joaquín José

Registro CIP 108833

Secretario

M(o). RODRIGUEZ ESPINOZA, Ronald Fernando

Registro CIP 95579

Vocal

M(o). IPANAQUE ROÑA, Juan Manuel

Registro CIP 66303

Asesor

DEDICATORIA

A mi padre Rubén Huerta por todo el sacrificio y esfuerzo realizado para poder cumplir con mis metas y a mi madre Marcelina Solano que desde el cielo siempre está conmigo en todo momento.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera profesional, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y por brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

A todas las personas de una u otra manera que siempre estuvieron apoyándome incondicionalmente para lograr todos mis objetivos.

A mi Asesor por su apoyo incondicional, dedicación y por compartir todos sus conocimientos.

INDICE

CARATULA	i
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE.....	v
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE TABLA	ix
INDICE DE ANEXO	x
GLOSARIO DE ABREVIATURA	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	16
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	16
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	16
1.2.1. Problema general	16
1.2.2. Problemas específicos.....	16
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.3.1. Objetivo general	17
1.3.2. Objetivos específicos.....	17
1.4. Justificación	17
1.5. DELIMITACIÓN DE ESTUDIO	18
1.5.1. Delimitación territorial	18
1.5.2. Delimitación tiempo y espacio	18
1.5.3. Delimitación de recursos	18
CAPITULO II.....	19
MARCO TEORICO	19
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
2.1.1. Investigaciones relacionadas con el estudio	19
2.1.2. Otras publicaciones.....	20
2.2. BASES TEORICAS	20
2.2.1. Características y propiedades del oro	20

2.2.2.	Ocurrencia mineralógica del oro	22
2.2.3.	Minerales auríferos	24
2.2.4.	Ocurrencias de oro	25
2.2.5.	Mineralogía de menas auríferas.....	25
2.2.6.	Yacimientos auríferos.....	26
2.2.7.	Principales aplicaciones del oro	26
2.2.8.	Métodos de Lixiviación	27
2.2.9.	Termodinámica de la cianuración.....	32
2.2.10.	Mecanismo electroquímico.....	34
2.2.11.	Cinética de la reacción.....	37
2.2.12.	Efectos aceleradores y retardadores	40
2.2.13.	Desintegración de las soluciones de cianuro de sodio.....	43
2.2.14.	Disolución de metales preciosos.....	45
2.2.15.	Variables del proceso de cianuración	45
2.3.	DEFINICIONES CONCEPTUALES	50
2.4.	FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	53
2.4.1.	Hipótesis general	53
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	53
CAPITULO III		54
METODOLOGÍA.....		54
3.1.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	54
3.1.1.	Tipo de Investigación.	54
3.1.2.	Nivel de Investigación.....	54
3.1.3.	Diseño de la Investigación.....	54
3.1.4.	Enfoque de la Investigación.	55
3.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	55
3.2.1.	Población	55
3.2.2.	Muestra	55
3.3.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES	56
3.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	56
3.4.1.	Técnicas a implementar	56
3.4.2.	Descripción de los instrumentos.....	57

3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	57
CAPITULO IV	58
RESULTADOS	58
4.1. PREPARACIÓN Y TOMA DE MUESTRA.....	58
4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	58
4.2.1. Análisis químico cuantitativo de cabeza	58
4.2.2. Determinación del porcentaje de humedad	58
4.2.3. Determinación de la gravedad especifica(Método del picnómetro).....	59
4.2.4. Análisis granulométrico.....	60
4.2.5. Moliendabilidad.....	61
4.3. DETERMINACIÓN DE PUREZAS DE NaCN	64
4.3.2. Concentración valorada del NaCN.....	65
4.4. PRUEBAS METALÚRGICAS DE CIANURACIÓN.....	65
4.4.1. Prueba metalúrgica de cianuración 1	65
4.4.2. Prueba metalúrgica de cianuración 2.....	67
4.4.3. Prueba metalúrgica de cianuración 3.....	69
CAPITULO V	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	72
5.1. CONCLUSIONES	72
5.2. RECOMENDACIONES.....	74
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXO	76

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proceso de lixiviación en pila-adsorción con carbón para minerales de baja ley de oro.....	29
Figura 2: Esquema del corte a través de una batea de lixiviación de minerales auríferos ...	30
Figura 3: Diagrama de flujo esquemático de una planta de lixiviación en bateas inundadas	31
Figura 4: Diagrama de estabilidad potencial – pH para el sistema Au-H ₂ O-CN- a 25°C. [CN ⁻]=10 ⁻³ M, concentración de todos los espacios solubles de oro = 10 ⁻⁴ M y p(O ₂) = p(H ₂) = 1 atm	33
Figura 5: Diagrama de estabilidad potencial – pH para el sistema Au-H ₂ O-Cl- a 25°C. [CN ⁻]=[Au(III)] = 10 ⁻³ M, [Cl] = 2M, PO ₂ = 0.1 atm, [HClO] = [ClO] = 6 x 10 ⁻³ M; PO ₂ = PH ₂ = 1 atm.....	33
Figura 6: Ilustración de la naturaleza electroquímica de la disolución de partículas de oro (120μ diam.) en KCN en presencia de oxígeno.	34
Figura 7: Representación esquemática de la disolución de oro en soluciones	35
Figura 8: Esquema de la estructura del carbón activado cargado.....	36
Figura 9: (A) para determinar la presión barométrica a varias altitudes. (B) para determinar los valores máximos de saturación en oxígeno de las soluciones a diferentes altitudes y temperaturas.....	40
Figura 10: Esquema de experimento y variable	55

INDICE DE TABLA

Tabla 1: Propiedades del oro	21
Tabla 2: Solubilidad de minerales de distintos metales en soluciones cianicidas	42
Tabla 3: Efecto de la cal sobre la pérdida de cianuro	45
Tabla 4: Oro disuelto en pruebas de 1 hora	46
Tabla 5: Velocidades relativas de disolución de oro, plata y aleaciones de oro-plata	47
Tabla 6: Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución de oro	49
Tabla 7: Operacionalización de variables e indicadores	56
Tabla 8: Análisis químico cuantitativo de cabeza por Au y Ag (Método Newmont)	58
Tabla 9: Análisis granulométrico	60
Tabla 10: Tiempo Vs. %-m200 (moliendabilidad)	63
Tabla 11: Tiempo de molienda	63
Tabla 12: Concentración valorada del NaCN	65
Tabla 13: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 1	66
Tabla 14: Consumo de reactivos P.M. 1	66
Tabla 15: Balance Metalúrgico de Au P.M. 1	66
Tabla 16: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 1	67
Tabla 17: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 2	68
Tabla 18: Consumo de reactivos P.M. 2	68
Tabla 19: Balance Metalúrgico de Au P.M. 2	68
Tabla 20: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 2	69
Tabla 21: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 3	70
Tabla 22: Consumo de reactivos P.M. 3	70
Tabla 23: Balance Metalúrgico de Au P.M. 3	70
Tabla 24: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 3	71

INDICE DE ANEXO

Anexo 1: Mapa de operaciones mineras en el Perú.....	77
Anexo 2:Resumen del derecho minero Santa Filomena.....	78
Anexo 3: Resumen del derecho minero Santa Filomena II.....	79
Anexo 4: Vista satelital de los derechos mineros Santa Filomena y Santa Filomena II	80
Anexo 5: Vista Satelital de la delimitación del derecho minero Santa Filomena	80
Anexo 6: Vista Satelital de la delimitación del derecho minero Santa Filomena II.....	81
Anexo 7:Soluciones al 10% de NaCN para hallar la concentración practica en la Planta de Beneficio Santa Filomena II.....	81
Anexo 8:Pruebas metalúrgicas de Cianuración con agitadores mecánicos en el laboratorio metalúrgico de la Planta de Beneficio Santa Filomena II	82

GLOSARIO DE ABREVIATURA

%	:	Porcentaje
Au	:	Oro
Ag	:	Plata
g/TM	:	Grano por tonelada métrica
kg/TM	:	Kilogramo por tonelada métrica
onz	:	Onza
TN	:	Tonelada
pH	:	Potencial de hidrogeno.
µm	:	Micra
mm	:	Milímetros
gr	:	Gramo
kg	:	Kilogramo
ml	:	Mililitro
mg	:	Miligramo
g/TM	:	Gramo por tonelada métrica
kg/TM	:	Kilogramo por tonelada métrica
g/m ³	:	Gramo por metro cubico
mg/l	:	Miligramo por litro
Onz/T.C	:	Onza por toneladas corta
° C	:	Grados Celsius
Has	:	Hectáreas

TMD	:	Toneladas Métricas por Dia
% -m200	:	Porcentaje menos malla 200
%	:	Porcentaje
cm ²	:	Centímetros cuadrados
cm ³	:	Centímetros cúbicos
>	:	Mayor
Fig.	:	Figura
Pag.	:	Pagina
S.A	:	Sociedad Anónima
S.A.C	:	Sociedad Anónima Cerrada

RESUMEN

Este presente trabajo de investigación se realizó en las instalaciones de la compañía minera SOTRAMI S.A., en la Planta de Beneficio Santa Filomena II. Los metales preciosos como el oro y la plata contenidos en el mineral son extraídos por el proceso metalúrgico denominado lixiviación con cianuro de sodio en tanques de agitación mecánica, el mineral es previamente chancado, y molido hasta convertirse en pulpa, el oro es lixiviado en los tanques de agitación con carbón activado, el oro es absorbido quedando impregnado en el carbón activado, pasando este a ser carbón cargado. El carbón cargado con oro y plata es cosechado de los tanques y es sometido a desorción por el proceso Zadra modificado, en este proceso el oro y la plata es evacuado del carbón mediante solución de cianuro, soda y alcohol, la solución resultante se le denomina solución rica en oro y plata, continuando el proceso la solución rica es bombeada a la electrodeposición, luego la filtración del lodo anódico y posterior fundición, teniendo como resultado la barra de dore (oro y plata). El carbón es reactivado químicamente con ácido clorhídrico y térmicamente en un regenerador térmico a 600° C, este carbón es recirculado al circuito de lixiviación en los tanques agitadores.

Se investigaron alternativas para el uso de cianuro de sodio por parte de otros proveedores, muy esencial en el proceso de lixiviación del oro, para luego elegir el más óptimo e idóneo para implementarlo en el proceso metalúrgico de la planta de Beneficio Santa Filomena II.

Palabras clave: metales, proceso, filtración, reactivado

ABSTRACT

This present research work was carried out in the facilities of the mining company SOTRAMI S.A., in the Santa Filomena II Benefit Plant. Precious metals such as gold and silver contained in the ore are extracted by the metallurgical process called leaching with sodium cyanide in mechanically stirred tanks, the ore is previously crushed, and ground into pulp, the gold is leached into the Agitation tanks with activated carbon, the gold is absorbed by being impregnated in the activated charcoal, passing this to be charged coal. The coal loaded with gold and silver is harvested from the tanks and is subjected to desorption by the modified Zadra process, in this process the gold and silver is evacuated from the coal by means of cyanide, soda and alcohol solution, the resulting solution is called rich solution in gold and silver, continuing the process the rich solution is pumped to the electrodeposition, then the filtration of the anode sludge and later casting, resulting in the gold bar (gold and silver). The coal is reactivated chemically with hydrochloric acid and thermally in a thermal regenerator at 600 ° C, this carbon is recirculated to the leaching circuit in the agitator tanks.

Alternatives for the use of sodium cyanide by other suppliers, very essential in the gold leaching process, were investigated, to then choose the most optimal and suitable to implement it in the metallurgical process of the Beneficio Santa Filomena II plant.

Palabras clave: metals, process, filtration, reactivated

INTRODUCCIÓN

En estos últimos años, Perú viene desarrollado su potencial minero con gran fuerza, por ello es importante los estudios de investigación, evaluación y análisis para optimizar y ajustar parámetros de operación que ayuden a la extracción del oro y la plata en la planta de beneficio Santa Filomena II de la empresa SOTRAMI S.A.

La Sociedad de Trabajadores Mineros S.A.- SOTRAMI S.A, cuenta actualmente con 166 socios y posee 2 títulos de Concesiones Mineras: Santa Filomena - Mina (1000 has.) y Santa Filomena II – Planta de beneficio (15 has.)

Este trabajo de investigación tiene como objetivo principal optimizar el proceso de cianuración del oro y la plata en la planta de beneficio Santa Filomena II, basada en la experiencia del día a día en la planta de beneficio, con el apoyo de todo el personal que conforman las diferentes áreas dentro de la compañía minera. El mineral que se trata en la planta de beneficio Santa Filomena II es de media a alta ley de oro y plata con un promedio de 20 gr/TM. La planta de beneficio está conformada por las operaciones de chancado, molienda, cianuración, desorción, electrodeposición, fundición y disposición de relaves con una capacidad de tratamiento de 150 TMD.

Con lo mencionado se presenta este trabajo de investigación titulado:
"EVALUACION DEL CIANURO DE SODIO PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO METALURGICO DE LA PLANTA DE BENEFICIO SANTA FILOMENA II DE LA EMPRESA SOTRAMI S.A

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Dentro de sus planes de desarrollo la planta de beneficio Santa Filomena II de la empresa SOTRAMI S.A. ha venido realizando una serie de investigaciones para poder optimizar el proceso metalúrgico y reducir los costos de operación de todo el procesamiento de minerales, centrándose en el cianuro sodio a utilizar, concentración, pH, granulometría, etc.

Por lo descrito anteriormente se plantea el siguiente problema, el mismo que será evaluado con el fin elegir el mejor cianuro de sodio con mejor recuperación y menor consumo para mejorar la productividad en la planta de beneficio Santa Filomena II.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. Problema general

¿En qué medida la evaluación del cianuro de sodio de los diferentes proveedores nos permitirá optimizar el proceso metalúrgico de la planta de beneficio Santa Filomena II de la empresa SOTRAMI S.A.?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿En qué medida la concentración de cianuro de sodio de diferentes proveedores influirá en la recuperación del oro en las pruebas metalúrgicas?
- ¿En qué medida la concentración de cianuro de sodio de diferentes proveedores influirá en la recuperación de la plata en las pruebas metalúrgicas?

- ¿En qué medida la lixiviación del oro y la plata en las pruebas metalúrgicas influirán en el consumo del de cianuro de sodio de los diferentes proveedores?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el proceso de cianuración para minerales de oro y plata de alta ley e incrementar el porcentaje de recuperación en la planta de beneficio Santa Filomena II de la empresa SOTRAMI S.A.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar la concentración de cianuro de sodio de los diferentes proveedores para la recuperación de oro en las pruebas metalúrgicas.
- Evaluar la concentración de cianuro de sodio de los diferentes proveedores para la recuperación de la plata en las pruebas metalúrgicas.
- Evaluar el consumo del cianuro de sodio de los diferentes proveedores en la lixiviación del oro y la plata en las pruebas metalúrgicas.

1.4. Justificación

La realización del presente trabajo de investigación realizado en la Planta de beneficio SOTRAMI S.A. sobre encontrar alternativas para el uso de cianuro de sodio por parte de otros proveedores de este insumo muy esencial en el proceso de lixiviación de oro, controlando los mismos parámetros de planta a nivel laboratorio, para luego elegir el más optimo e idóneo para implementarlo en el proceso metalúrgico de la planta; dicho estudio nos brindara información para realizar una evaluación técnica y económica para luego dimensionar a nivel industrial, así mismo se verificara la factibilidad de la operación en tema de costos de producción viendo si es económicamente rentable. Las técnicas, procedimientos

y métodos empleados en esta investigación una vez demostrada su confiabilidad podrán ser aprovechadas por los futuros estudiantes para sus trabajos de investigación.

Como es sabido actualmente el precio de oro y la plata en el mercado mundial se encuentra en un lugar expectante, sin embargo, en estos últimos meses descendieron de manera considerable, lo cual obliga a las empresas a realizar investigaciones para mejorar sus procesos metalúrgicos. o buscar alternativas para deducir el costo de operación los cuales le brinden mayores ingresos económicos.

Con este trabajo se desea buscar alternativas para deducir el costo de operación los cuales le brinden mayores ingresos económicos., obteniendo un doré (Oro y Plata) con menores costos de producción.

El logro de este propósito beneficiará a la empresa y para los investigadores será una ocasión para incrementar sus conocimientos en estos temas.

1.5. DELIMITACIÓN DE ESTUDIO

1.5.1. Delimitación territorial

- Departamento: Ayacucho
- Provincia: Lucanas
- Distrito: Sancos

1.5.2. Delimitación tiempo y espacio

Para realizar la investigación se toma como referencia el año 2018.

1.5.3. Delimitación de recursos

Falta de disponibilidad de recursos económicos para llevar a cabo el trabajo de investigación de manera más profunda y detalla con acceso a mayor tecnología o escala de pilotaje.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Investigaciones relacionadas con el estudio

(Alvarez). En su estudio de investigación metalúrgica concluye lo siguiente: que al utilizar sales de plomo oxida los minerales sulfurados, de esta manera las sales de plomo aceleran la cinética de la lixiviación de los metales preciosos, reduciendo el consumo del NaCN y de NaOH de esta manera se mejora la recuperación superando los 93 % de los metales como el oro y la plata en un menor tiempo de agitación. El costo del reactivo es cómodo y fácil de comprar sin mucha fiscalización, siendo este una alternativa para minimizar los costos de operación. (Alvarez, 2017, pág. 80).

(Aquise). En su estudio de investigación metalúrgica concluye lo siguiente: Que la utilización de solución barre es un factor demasiado importante porque reduce el consumo de reactivos en la operación y el costo de operación en el ahorro de agua fresca por la recirculación de la solución barren. La inyección de aire en los tanques permite la aceleración de la cinética de lixiviación y un aumento en la recuperación. (Aquise, 2014, pág. 85)

(Machaca). En su estudio de investigación metalúrgica concluye lo siguiente: que al ajustar la concentración de carbón activado por litro de pulpa ayuda a reducir costos de operación y a incrementar la recuperación de los metales preciosos como el oro y la plata, estas concentraciones oscilan entre 10 gr de carbón activado por litro de pulpa, 20 g de carbón activado por litro de pulpa y 30 g de carbón activado por litro de pulpa, teniendo mejores resultados este último. (Machaca, 2014, pág. 98)

(Morales). En su estudio de investigación metalúrgica concluye lo siguiente: que la recuperación de los metales preciosos aumenta en un porcentaje considerable con una molienda con granulometría superiores a 90% $m-200$ en sus pruebas experimentales. Concluye que la granulometría es uno de los factores con más importancia en la optimización de un proceso metalúrgico para la recuperación del oro y la plata. Otro factor igual de importante es el consumo de cianuro por su alto costo y el impacto que genera al medio ambiente. (Morales, 2014, pág. 111)

2.1.2. Otras publicaciones

(Punuera). En su estudio de investigación metalúrgica concluye lo siguiente: que se pueden llegar a tener altas recuperaciones en el proceso metalúrgico superiores a 92% si realizamos una buena evaluación del callar de billas y chaquetas del molino. Para tener buenos resultados en el circuito de molienda en cuanto a la granulometría es importante reducir a $-m 1/2$. No recomienda la utilización de cal para la estabilización del pH porque sus componentes saturan el carbón activado no absorbiendo los metales preciosos de forma eficiente bajando la recuperación del oro y la plata, para esto recomienda la utilización del hidróxido de sodio. (Punuera, 2016, págs. 69-70)

2.2. BASES TEORICAS

2.2.1. Características y propiedades del oro

2.2.1.1. Oro

El oro es uno de los metales preciosos que existen en la tierra con un aspecto amarillo brillante, cuando se lamina es de color verde o azul. Se considera oro puro de 24 quilates en estado natural y este es extremadamente maleable, en este estado no se puede

utilizar en joyerías por ser demasiado blando por lo que siempre se le alea con cobre y plata para aumentar su dureza. (Vargas, 2007, pág. 9)

2.2.1.2. Propiedades físicas

Referente a las propiedades podríamos definir que, “El oro es un metal demasiado dúctil y maleable en la que dependiendo de su grado de pureza refleja varios tonos de color amarillo, es un metal que no se empaña ni se corroe”. (Vargas, 2007, pág. 9)

Tabla 1: Propiedades del oro

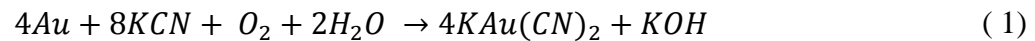
PROPIEDAD	VALOR/UNIDAD	PROPIEDAD	VALOR/UNIDAD
Símbolo	Au	Calor de fusión	16.3 cal/g
Color	Amarillo	Dureza	2.5-3(Mohs)
Peso atómico	197 g/mol	Radio atómico	1.46 Å°
Numero atómico	79	Radio iónico	1.37 Å°
Estado de oxidación	1.3	Potencial normal	1.498 voltios
Densidad Especifica	19.3 g/cm ³	Resistencia eléctrica	2.25 Ohm.
Punto de Fusión	1063 °C	Electronegatividad	2.4 Pauling
Punto de ebullición	2530°C	Conductividad térmica	2.7x10 Kcal/°Kms
Calor de vaporización	8108 kcal/g-átomo	Módulo de Elasticidad	7.6-8.16x10 ⁹ kg/m ³

Fuente: *Juan Vargas G. Metalurgia del oro, 2007, Pag 9.*

2.2.1.3. Propiedades químicas

Es imposible atacar al oro con ácidos corrientes, No se disuelve con ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, ácido nítrico, etc., solo se puede disolver con la mezcla de ácido clorhídrico concentrado y ácido nítrico concentrado denominado agua regia. El oro es un metal que a temperaturas normales ni extremas no sufre oxidación. El oro es el único metal que puede alearse con la mayor parte de los metales existentes, el oro se alea con el mercurio resultando este una amalgama de oro. (Vargas, 2007, pág. 10)

De la siguiente manera se expresa la reacción química que sufre el oro y el cianuro:



2.2.1.4. Propiedades mecánicas

El oro dentro de todos los metales que existen es el metal más dúctil que se lamina hasta hojas con espesor de 0.0001 milímetros, en donde la luz pasa teniendo este un color verde azulado, pero su color característico lo presenta con la luz reflejada. También se puede obtener con 1 gramo de oro hilos recontra finos de 2000 metros de longitud. (Vargas, 2007, pág. 10).

2.2.2. Ocurrencia mineralógica del oro

El oro se encuentra esparcido por todo el mundo en pequeñas proporciones. Se ha encontrado en varios materiales como la caliza, el carbón, las rocas acidas, la arcilla hasta en el agua de mar. También es encontrado con más frecuencia asociados en depósitos de minerales como los minerales con presencia de sulfuro de cobre. Es decir, el oro se encuentra en yacimientos de sulfuros u otro compuesto pero no en los teluros, también lo encontramos en su forma nativa de forma diseminada en la matriz de las partículas de mineral o en la superficie. (Dominic, 2001).

El metal precioso (oro) es agrupado en 7 categorías según su ambiente geológico en los que corresponden los depósitos epitermales, oro en cuarzo, placeres jóvenes, depósitos de oro diseminado, placeres fósiles, oro en agua de mar y oro en subproducto. (Dominic, 2001, pág. 188)

2.2.2.1. Minerales de oro nativo

Los minerales de oro nativo son minerales en donde el oro se encuentra en su estado elemental (Au^0) y no está encapsulado en otros minerales o en partículas de sulfuros. El oro grueso nativo después del proceso de molienda se pueden recuperar con equipos de separación gravimétrica. Para estos minerales se usaba frecuentemente también la amalgamación, aunque este proceso en estos tiempos se está descartando por los problemas ambientales que este genera. (Dominic, 2001, pág. 188)

2.2.2.2. Oro asociado con sulfuros

Mayormente, el oro se encuentra diseminado en sulfuros y en estado libre, frecuentemente se encuentra diseminado en la pirita. También se encuentra en otros sulfuros como es el caso de la pirrotita, la arsenopirita, la calcopirita, la estibnita y otros. La pirita en soluciones cianuradas es relativamente estable, pero en presencia de pirrotita el consumo de cianuro aumenta considerablemente por la descomposición de estos sulfuros. En efecto, la pirrotita reacciona con el cianuro para formar tiocianato; esto produce la proporción de cianuro remanente en la solución, disponible para disolución del oro. En estos casos se realiza la flotación de la pirita y la aireación con cal para oxidar la pirrotita antes de realizar la cianuración. También el oro se encuentra en pirritas auríferas, en las cuales el oro está a menudo finamente diseminado en su matriz en donde estos minerales requieren el proceso

de molienda, flotación, tostación, lavado de la calcina hasta llegar a la cianuración. Este tratamiento del mineral sulfurado denominado pre-oxidación puede realizarse a temperaturas y presiones normales o a presiones y temperaturas elevadas, dependiendo del grado de refractariedad y la naturaleza del mineral. (Dominic, 2001, págs. 188-189)

2.2.2.3. Teluros de oro

El tratamiento de estos tipos de minerales tiene buenos resultados económicos, en donde particularmente se encuentran asociados con sulfuros y oro nativo. En este grupo se encuentran la Krennerita y la calaverita en donde el 40% es oro y la silvanita una proporción de oro en un 25%. (Dominic, 2001, pág. 189)

2.2.2.4. Oro en otros metales

Como ya se ha ido discutiendo, las principales fuentes económicas del oro están dadas en minerales hasta aquí mencionadas; sin embargo, existen otros minerales que también contienen oro: asociado a minerales de arsénico y también de antimonio (por ejemplo, auroestibinita). Oro con cobres porfíricos (por ejemplo, la kostovita), minerales carbonáceos y oro contenido en minerales de plomo y zinc. (Dominic, 2001, pág. 189)

2.2.3. Minerales auríferos

El oro en la naturaleza se presenta en combinación con telurio y en estado nativo, este último casi siempre está acompañado de la plata alcanzando una proporción de hasta 39%, también suele tener cantidades pequeñas de hierro, plomo, cobre, mercurio y bismuto. (Vargas, 2007, págs. 21-22).

Estos tipos de minerales se agrupan en lo siguiente:

- **Aleaciones Naturales:** Oro argentífero (electrum) (Au, Ag), Oro cuprífero (cuproaururo) (Au, Cu), Oro platinífero (porpesita) (Au, Pd), Oro rodonífero (rodita) (Au, Rh), Oro irídico (Au, Ir), Oro platinífero (Au, Pt), Oro bismutífero (Au, Bi), Amalgama de oro (Au_2Hg_3), Maldonita (Au_2Bi), Auricúprico ($AuCu_3$) y Paladio cupriáurico $(Cu, Pd)_3Au_2$.
- **Sulfuros:** Uytembogarditita (Au_3AuS_2).
- **Teluros:** Calaverita (Au, Ag) Te_2 , Krennerita (Au, Ag) Te_2 , Montbrayita (Au, Sb) $_2Te_3$, Silvanita (Au, Ag) Te_4 , Kostavita (Au, Cu) Te_4 y Nagyagita (Pb_5Au (Te, Sb) $_4S_5$).
- **Antimoniuros:** Aurostibita ($AuSb_2$).
- **Seleniuros:** Fischesserita ($AuAg_2Se_2$).

2.2.4. Ocurrencias de oro

El oro se encuentra como en la naturaleza como oro grueso en donde su dimensión oscila entre 100 a 1000 μm , este tipo de material es adecuado para concentrarlo con equipos concentradores gravimétricos por su tamaño. También lo podemos encontrar como oro microscópico en donde su dimensión oscila entre 10 a 100 μm , este tipo de material es adecuado para tratarlo por flotación y/o cianuración. Por último el oro invisible más conocido como oro volador en la que su tamaño es inferior a los 10 μm , la recuperación de este tipo de oro depende de cómo está en la naturaleza. (Contreras, 1964)

2.2.5. Mineralogía de menas auríferas

Las menas auríferas se clasifican en 5 grandes grupos en donde tenemos a las menas de óxidos, aquí el oro se encuentra en la ganga de piedra caliza y el cuarzo en partículas muy finas de oro nativo. Por otro lado, se tiene a las menas de sulfuros simples en donde el oro se

encuentra asociado con pequeñas proporciones de arsenopirita y pirita. También está el material aluvial o de placer que están compuestos por grava no consolidada y areniscas que se encuentran en los cauces de los ríos. Las menas complejas refractarias se encuentran en el grupo siendo este un material difícil de cianurar porque el oro se encuentra en una matriz encapsulada. Por último, se tiene a las menas de metales comunes en la que el oro esta como subproducto del proceso metalúrgico realizado para la plata, cobre y plomo. (Vargas, 2007, págs. 13-14)

2.2.6. Yacimientos auríferos

Dentro de la clasificación de los yacimientos auríferos están las segregaciones magmáticas que están formadas por la consolidación de magmas fundidos, también conocidos como “oro magmático”. Los depósitos pirometasomáticos están formadas en rocas invadidas a temperaturas y presiones altas cerca de los contactos de intrusivos ígneos por fluidos térmicos que brotan de las rocas invasoras. Los depósitos hipertermales son depósitos y filones que están formados por fluidos térmicos generados en grandes profundidades a presiones y temperaturas altas. Los depósitos meso termales son depósitos y filones que están formados por fluidos térmicos generados a mínima profundidad a presiones y temperaturas bajas. Los depósitos originados por las soluciones frías que están formadas por aguas de principio atmosférico que corren por la superficie y disuelven en su camino los metales presentes en rocas para su precipitación posterior. Por último, están los depósitos sedimentarios que están formados por etapas de degradación referidos a los placeres de oro. (Vargas, 2007, pág. 22)

2.2.7. Principales aplicaciones del oro

Las principales aplicaciones del oro están en la joyería, componentes electrónicos y la odontología, entre otros. Mientras la tecnología avanza cada vez más, también incrementa

la demanda del oro, por otra parte, el oro puede servir como ahorro privado. Hoy en día el metal precioso es usado para pintar algunas partes críticas de los cohetes, los misiles y muchos más artefactos aeroespaciales. También es empleado en la medicina que sirve como componente de los remedios usados para el tratamiento de la artritis y del cáncer. Los dentistas emplean a gran escala las aleaciones de oro por su resistencia química, que usadas en forma de chapas de gran valor de hasta 20 a 22 quilates. Existen soldaduras que dentro de sus componentes tienen al oro en bajas proporciones aleado con Ag, Cu, Zn y Cd a proporciones mayores; es decir, con un punto de fusión más bajo, en donde se tiene presente que las soldaduras de oro tienen el mismo tono de color que la aleación de oro en donde se soldará. En la industria fotográfica, para el virado de las imágenes se emplean los cloruros de oro con contenido de 49.5 hasta 51.5 % de Au. Por otro lado, se tiene a las sales de cianuro de oro se usan para el dorado de los metales en la industria galvánica. El oro se expende en el comercio bajo la forma de barras, granalla, cintas, chapas, y alambres. (Vargas, 2007, págs. 22-23)

2.2.8. Métodos de Lixiviación

2.2.8.1. Lixiviación en pilas

Muchos depósitos pequeños de mineral, alguna vez considerados antieconómicos, ahora son económicamente factibles para ser procesados por los métodos de lixiviación en pilas. Recientemente, los precios elevados del oro y la plata han causado nuevo interés para el desarrollo de pequeñas minas. Para una exitosa operación el mineral tiene que tener partículas de oro y plata muy pequeñas, estos valores deben tener reacción con el cianuro ya sea por la exposición mediante sus poros naturales o por el resultado de la fricción del mineral para exponer al oro y la plata, el mineral no debe tener cianicidas y debe estar libre de sulfuros

para que no interfieran a la solubilidad del oro y la plata en contacto con el cianuro, el mineral no tiene que tener material carbonáceo porque este absorbe oro y plata en solución cianurada. Por último el mineral no debe tener exceso de fino o de arcillas porque estos impiden la percolación de la solución cianurada, como recomendación este problema se soluciona aglomerando el material. (Misari, 2010, págs. 79-80)

Para el ciclo XIX, los minerales de oro y plata eran lixiviados por diversos reactivos, sin embargo, la lixiviación en pila con cianuro de los minerales de oro y plata constituye un desarrollo hidrometalúrgico relativamente reciente. Los minerales de oro y plata de baja ley, los desechos de mina y los depósitos que son demasiado pequeños para justificar la construcción económica de plantas, pueden ahora ser procesados por este método. (Misari, 2010, pág. 87).

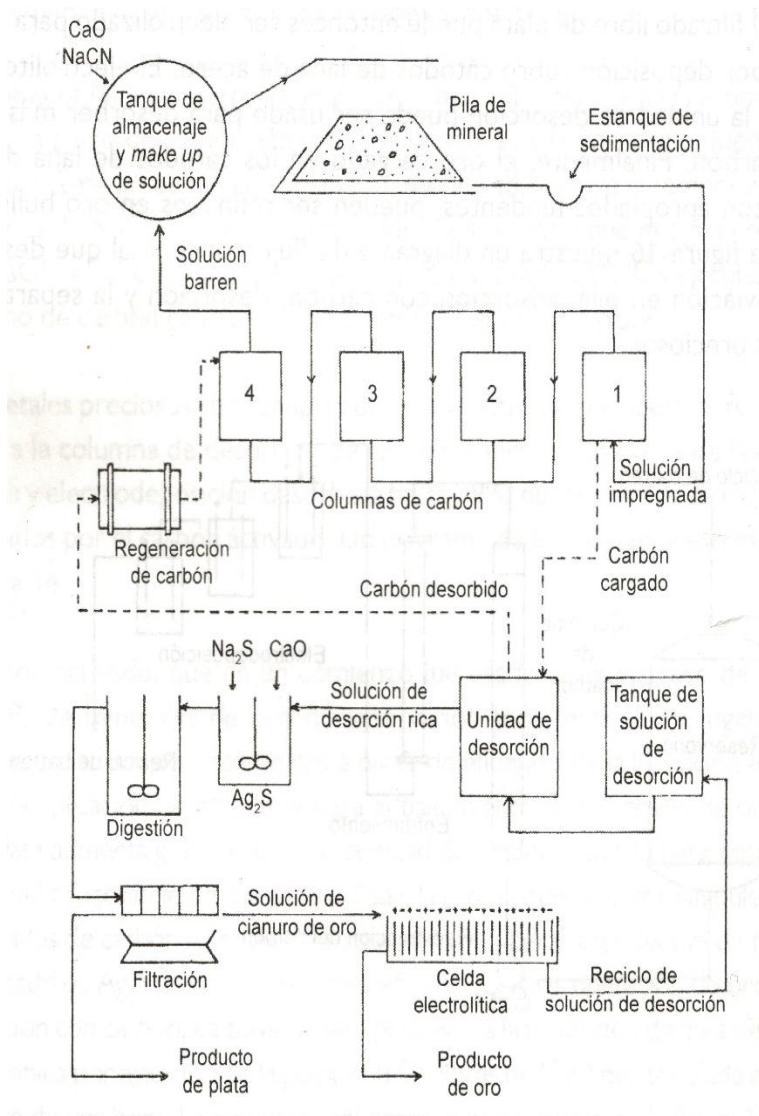
La lixiviación en pilas resulta económicamente realizar el tratamiento de chancado por lo menos primario y secundario. Cuando la granulometría es muy fina entre 100% -3/8 de pulgada o 100% -1/4 de pulgada se recomienda aglomerar los materiales finos para restituir la permeabilidad al lecho del mineral que se va a lixiviar. (Dominic, 2001, pág. 164)

Cuando la pila de lixiviación está formada se puede observar que el lecho mantiene la gran parte de su alta permeabilidad gaseosa y líquida con respecto a la aglomeración del producto poroso. En esta etapa se da inicio a la lixiviación por goteo o riego por aspersión. (Dominic, 2001, pág. 165).

Las pilas de lixiviación generalmente se forman de 3 a 8 metros de altura sobre una base impermeable generalmente con geomembrana de material polietileno de alta densidad(HDPE), de baja densidad(LDPE), de muy baja densidad(VLDPE) o de cloruro de

polivinilo (PVC), donde por espesor se tiene de 0.1 a 1.5 milímetros. Se usan canaletas abiertas y cañerías de drenaje con agujeros para mejorar la recolección de las soluciones. Este método de lixiviación de acuerdo con el tipo de mineral tratado, granulometría y leyes su tiempo de tratamiento es mayormente en varios meses. (Dominic, 2001, pág. 168)

Figura 1: Proceso de lixiviación en pila-adsorción con carbón para minerales de baja ley de oro



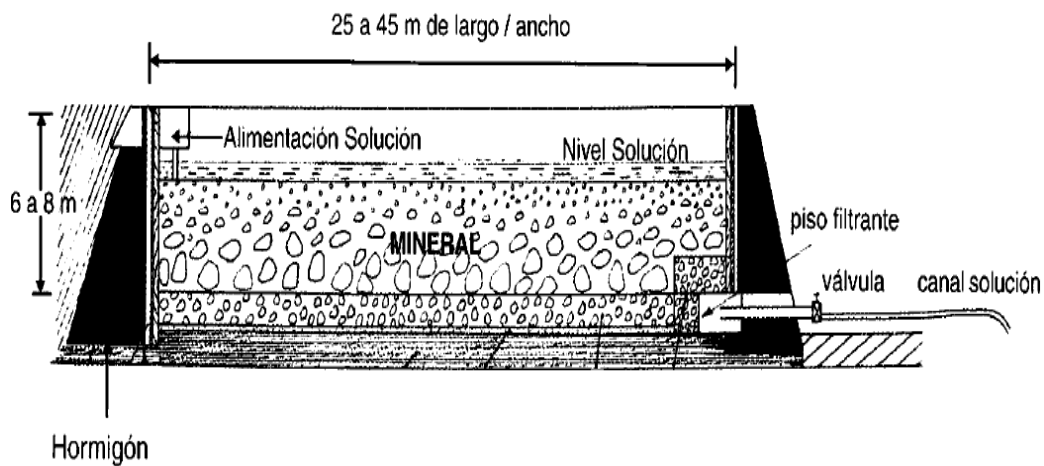
Fuente: Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pag 124.

2.2.8.2. Lixiviación en bateas inundadas

Este método de lixiviación también conocido como sistema de “lixiviación por percolación” o “vat leaching” se realiza en una estructura que tiene forma de paralelepípedo que esta echa de hormigón y está protegido en su interior con asfalto antiácidos con un fondo de madera cubierta de una tela filtrante donde es llenado con minera a granulometría que oscila entre 3/4" a 1/4", donde es inundado con soluciones de cianuro en donde estas soluciones es filtrada por el fondo, estas soluciones es recirculada y llevadas a la batea siguiente. (Dominic, 2001, págs. 174-175)

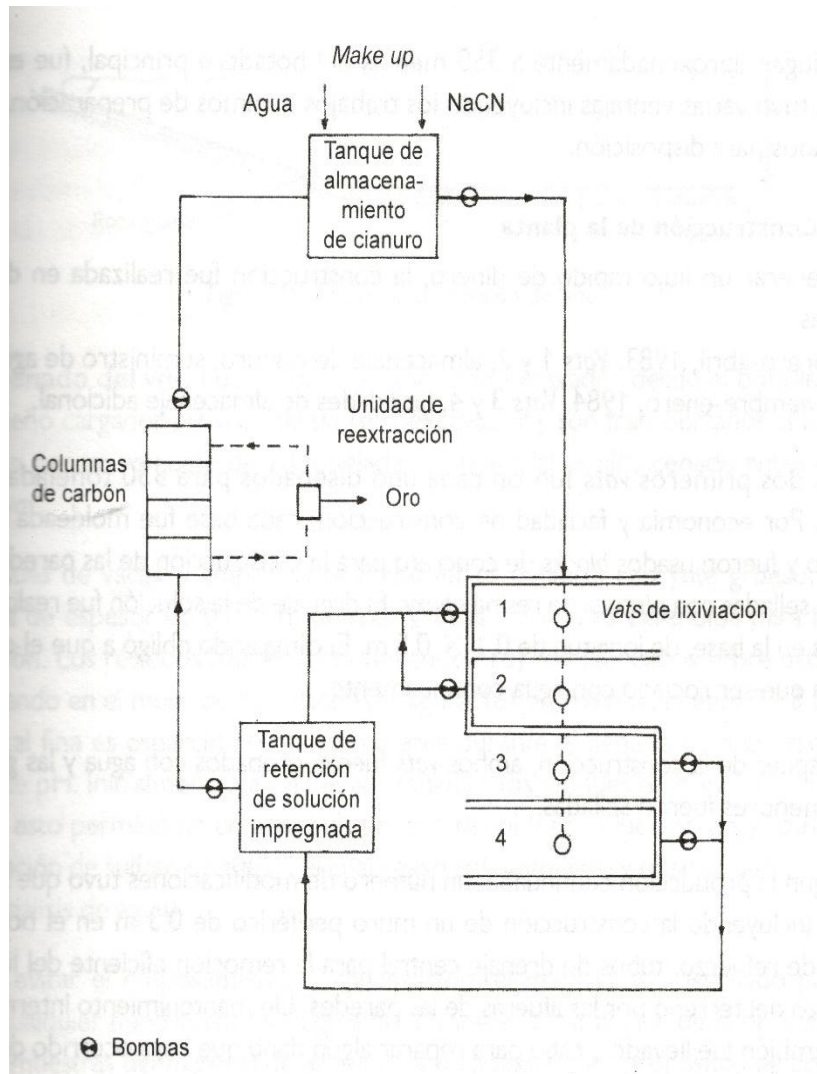
La operación de este método es demasiado dinámico y muy apropiadas para tratar minerales que cuentan con una cinética de disolución altamente rápidas. El tiempo de lixiviación en este sistema es demasiado corto con operaciones de 6 a 12 días. (Dominic, 2001, págs. 175).

Figura 2: Esquema del corte a través de una batea de lixiviación de minerales auríferos



Fuente: *Esteban Dominic M. Hidrometalurgia – Fundamentos, procesos y aplicaciones, 2001, Pag 177.*

Figura 3: Flujo esquemático de una planta de lixiviación en bateas inundadas



Fuente: Fidel Misari C. *Metalurgia del oro*, 2010, Pag 127.

2.2.8.3. Lixiviación por Agitación

La lixiviación por agitación es un método en donde necesita que el material a procesar este molido a una granulometría de 80% -m200 en donde es aplicado exclusivamente a minerales con leyes de oro muy elevadas, este método tiene una mayor recuperación y un menor tiempo de proceso a diferencia de los demás métodos, en donde esto justifica la implementación de una molienda húmeda. En cuanto al menor volumen a

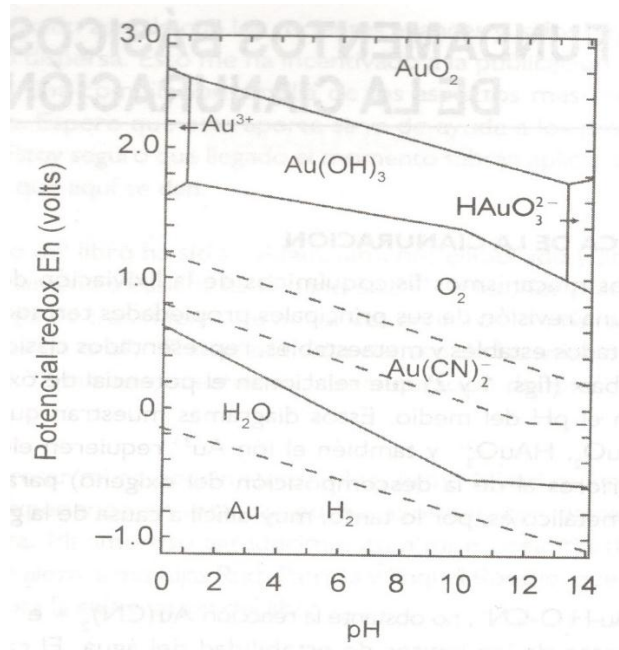
tratar permiten implementar la agitación en tanques en donde permite reducir el espesor de la capa limitante de difusión, al mismo tiempo que se aumenta el área de la interfase liquido gas. Como ya se mencionó este método se caracteriza por contar con altas recuperaciones de >80 hasta 95% y en tiempos menores de 24 horas. Este método tiene mayor costo de operación con diferencia a los demás. (Dominic, 2001, pág. 175)

2.2.9. Termodinámica de la cianuración

Se debe recurrir a las propiedades termodinámicas del oro para verificar los mecanismos físicos y químicos de lixiviación, en esencial los estados estables del oro plasmados clásicamente en los diagramas de Pourbaix (Fig. 4 y 5) que relacionan el pH del medio con el potencial de óxido- reducción (Eh) del oro. En el diagrama Au-H₂O-CN (Fig. 4), la reacción: $\text{Au}(\text{CN})_2^- + e^- = \text{Au} + 2\text{CN}^-$ se realiza en los límites de estabilidad del H₂O. (Misari, 2010, pág. 15)

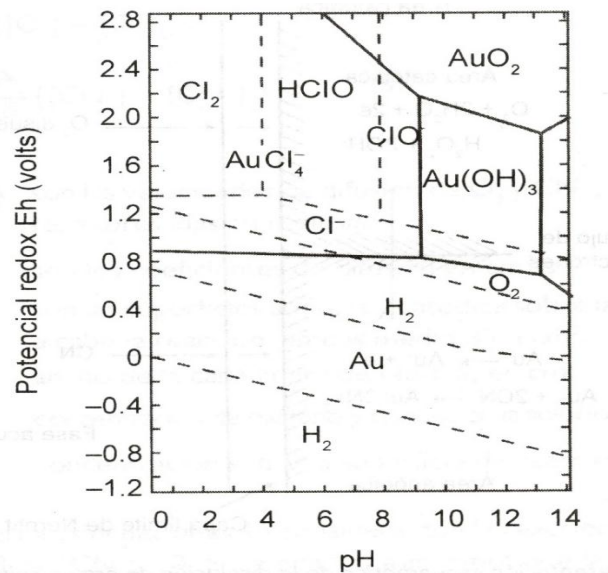
La limitación del campo de estabilidad del complejo aurocianuro es por una recta en donde se visualiza una pendiente pronunciada que es el efecto producido por la hidrólisis del CN a pH <9, formándose después casi horizontal por la acción del O⁺ en medio básico, con esto se realiza de forma efectiva la reacción de la lixiviación por la formación de aurocianuro. De igual manera en la figura se visualiza la reducción de los compuestos Au(OH)₃, Au⁺³ y HAuO₃²⁻ por la introducción del cianuro. Se añadió igualmente el diagrama AU-H₂O-Cl en donde puede mostrar el ambiente extremadamente ácido y oxidante que se necesita para la disolución del oro por iones cloro con formación de AuCl₄⁻. (Misari, 2010)

Figura 4: Esquema de estabilidad potencial – pH para el sistema Au-H₂O-CN- a 25°C. [CN⁻]=10⁻³M, los espacios solubles de oro tienen por concentración 10⁻⁴M y p(O₂) = p(H₂) = 1 atm



Fuente: Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pag 16.

Figura 5: Representación de Esquema de estabilidad potencial -pH para la estructura del Au-H₂O-Cl- a 25°C. [CN⁻]=[Au(III)] = 10⁻³M, [Cl] = 2M, PO₂ = 0.1 atm, [HClO] = [ClO] = 6 x 10⁻³ M; PO₂ = PH₂ = 1atm

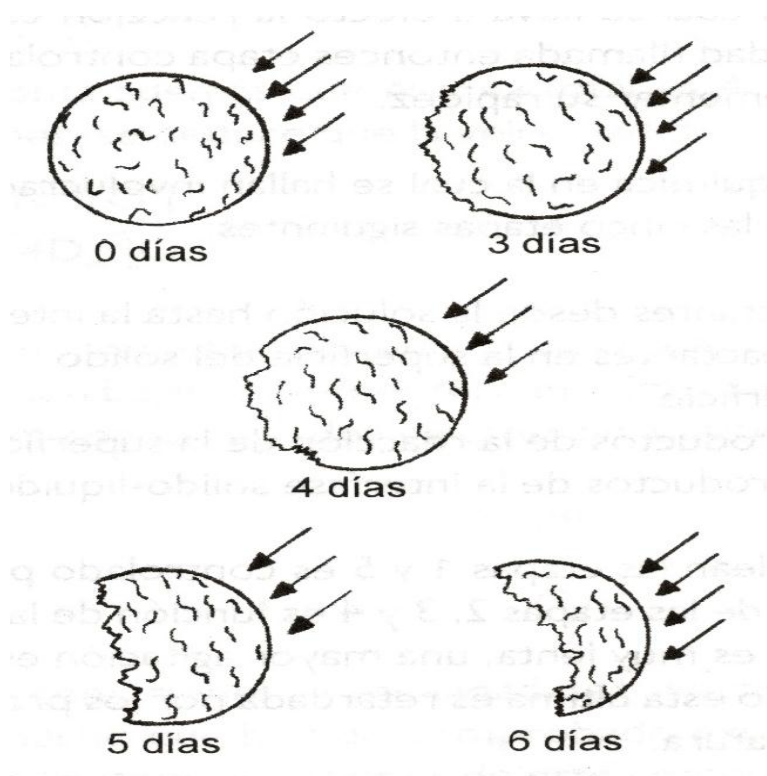


Fuente: Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pag 17.

2.2.10. Mecanismo electroquímico

La lixiviación se puede llevar a cabo por mecanismos químicos, físicos y electroquímicos. Los principios electroquímicos de la corrosión establecen los mecanismos de la cianuración en la disolución. Se demostró este hecho utilizando solución solidificada y pequeñas esferas de oro con una circulación de una corriente de cianuro de potasio en un ambiente sin aire, al pasar 3 días, al lado contrario del inicio del flujo se presencié un pequeño inicio de corrosión (Fig. 6); pasado 3 días más esta misma partícula de oro se redujo a la mitad de su tamaño original. (Misari, 2010, pág. 15)

Figura 6: Grafica referencia del comportamiento electroquímico de la disolución de partículas de oro con diámetro de 120μ en cianuro de potasio



Fuente: Fidel Misari C. *Metalurgia del oro*, 2010, Pag 17.

La Fig. 7 facilita la demostración esquemática de este fenómeno, en la zona catódica, la reducción del oxígeno acompaña a la oxidación del oro en la zona anódica justificando las siguientes reacciones químicas:

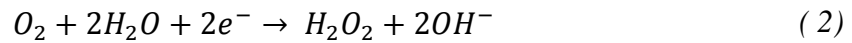
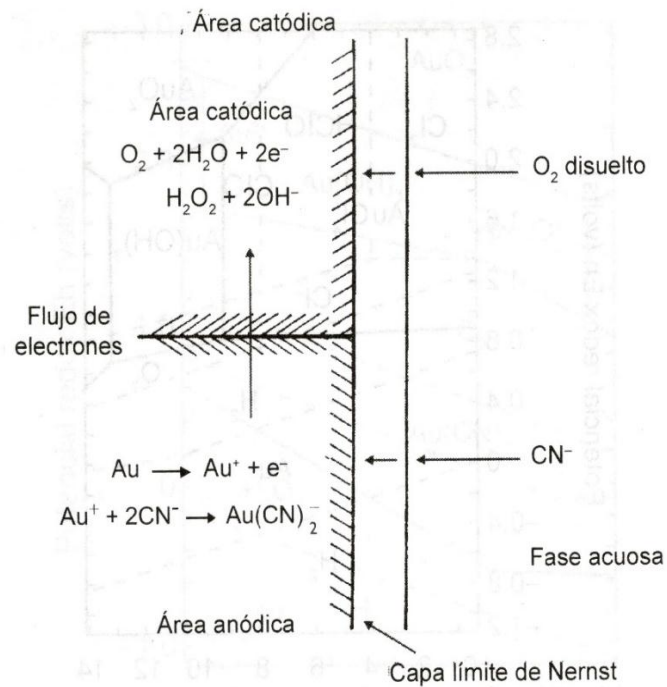


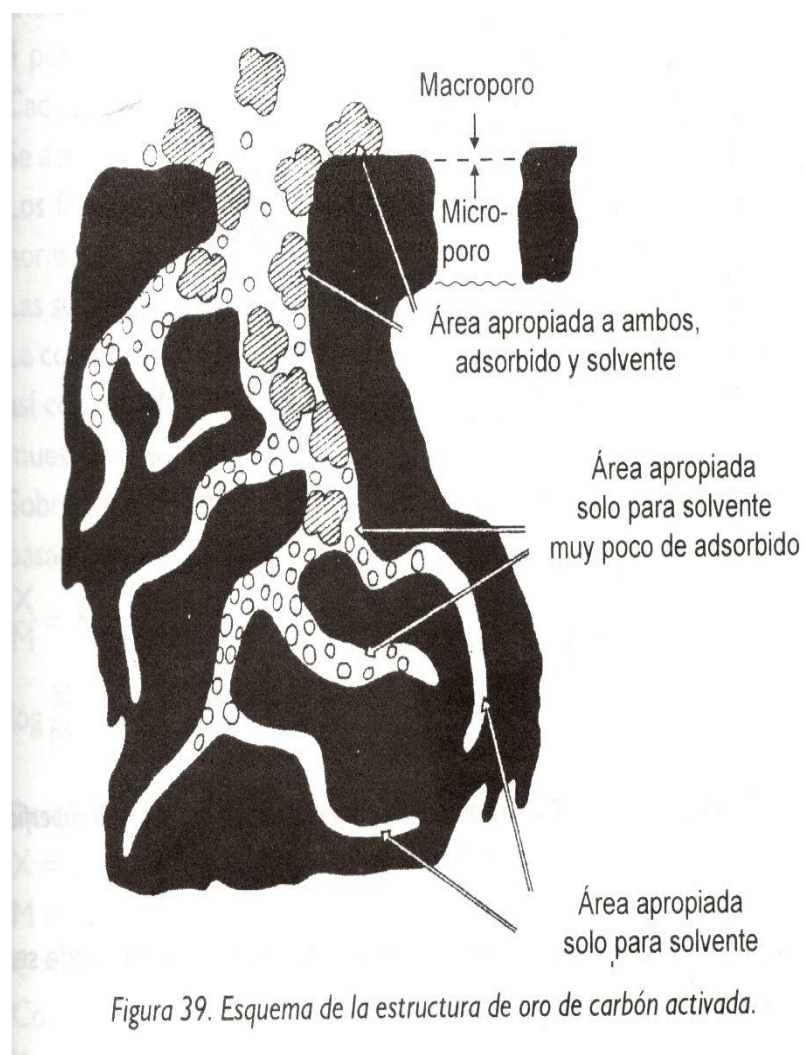
Figura 7: Disolución de oro en soluciones: representación esquemática



Fuente: Fidel Misari C. *Metalurgia del oro*, 2010, Pag 18.

Como resultado el experimento indica que entre la fase liquida hay un flujo de electrones, donde se localiza el cianuro, el oxígeno disuelto y la fase solida compuesta por el oro. Según el tipo de proceso de lixiviación y la velocidad de agitación, la capa límite de Nernst que se encuentra en ambas fases presencia un espesor variable. (Misari, 2010, pág. 16)

Figura 8: Esquema de la estructura del carbón activado cargado



Fuente: Fidel Misari C. *Metalurgia del oro*, 2010, Pag 171.

2.2.11. Cinética de la reacción

La reacción que se lleva a cabo en un determinado tiempo es en mayor parte la etapa que cuenta con menor velocidad denominada etapa controlante en donde es importante determinar su rapidez. Existen 5 etapas en donde se involucran la fase sólida y líquida en una reacción físico-química, dentro de estas etapas los reactantes se expanden por la solución hasta llegar a la interfase sólido-líquido, la absorción de los reactantes en la superficie del sólido, reacción en la superficie, la reacción de la superficie del sólido suelta los productos, expansión de los productos desde la interface sólido-líquido hacia la solución. (Misari, 2010, pág. 18)

Las velocidades de difusión controlan el tiempo que emplean las etapas 5 y 1, por lo tanto, la rapidez de los procesos químicos está en función a las etapas 2, 3 y 4. Cuando la difusión es demasiado lenta se necesita acelerar con la elevación de la agitación, pero si la difusión está atrasada se debe aumentar la temperatura. (Misari, 2010, pág. 18)

Las leyes de Fick gobiernan la cianuración con la siguiente expresión matemática:

$$\frac{d(O_2)}{dt} = D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} \{[O_2] - [O_2]_s\}$$
$$\frac{d(CN^-)}{dt} = D_{CN^-} \frac{A_2}{\delta} \{[CN^-] - [CN^-]_s\}$$

Donde:

$\frac{d(O_2)}{dt}$ y $\frac{d(CN^-)}{dt}$ = Velocidad de difusión de O_2 y CN^- , expresados en moles/s.

D_{O_2} y D_{CN^-} = Son los coeficientes de difusión en cm^2/s .

A_1 y A_2 = Son las superficies anódicas y catódicas donde ocurren la reacción, estas están en cm^2 .

δ = Ancho de la capa límite de Nernst, se encuentra en centímetros

$[O_2]$ y $[CN^-]$ = Concentraciones de O y CN en soluciones, moles/ml.

$[O_2]_s$ y $[CN^-]_s$ = Concentraciones en la superficie de reacción.

(Misari, 2010, pág. 19) Si la reacción química de las ecuaciones anteriores es muy veloz se considera $[O_2]_s = [CN^-]_s = 0$. Y cuando la rapidez de disolución del oro es la mitad de la del CN y el doble del O2 se considera la igualdad siguiente:

$$2D_{O_2} \frac{A_1}{\delta} [O_2] = \frac{1}{2} D_{CN} - \frac{A_2}{\delta} [CN^-]$$

Con respecto a la ecuación el valor A (área total) es igual a la suma de A_1 y A_2 . Cuando se resuelve esta ecuación se puede deducir que la velocidad del proceso de cianuración es de la siguiente manera:

$$V = \frac{2A D_{CN} - D_{O_2} [CN^-] [O_2]}{\delta \{D_{CN} - [CN^-] + 4 D_{O_2} [O_2]\}}$$

(Misari, 2010, pág. 19) Cuando se obtiene la ecuación anterior se considera 2 posibilidades; para que el denominador sea despreciable las concentraciones del CN tienen que ser muy bajas con respecto al 2do, en donde a través de la ecuación anterior se obtiene lo siguiente:

$$V = \frac{1}{2} D_{CN} - \frac{A}{\delta} [CN^-]$$

$$V = k_1 [CN^-]$$

(Misari, 2010, pág. 19) Con esto se entiende que la concentración del CN va en relación con la velocidad de la lixiviación de metal en donde se comprueba con los resultados ya obtenidos, en donde existe el caso que sean muy altas sus concentraciones. En esta

situación es depreciable el segundo término del denominador con respecto al primer término, convirtiendo la ecuación de la siguiente manera:

$$V = 2D_{O_2} \frac{A}{\delta} [O_2]$$

$$V = k_2 [O_2]$$

Los experimentos concluyen que la velocidad de disolución del oro estando a elevadas concentraciones de CN para una exitosa reacción depende exclusivamente de la concentración del O₂. Esto da aprobación a la teoría de la disolución del oro. Con la ecuación siguiente se calcula el límite donde resalta una de las concentraciones en la velocidad de lixiviación. (Misari, 2010, pág. 20)

$$D_{CN^-} [CN^-] = 4D_{O_2} [O_2]$$

o, lo que es lo mismo,

$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}}$$

Y se asume que: $\frac{D_{O_2}}{D_{CN^-}} = 1.5$ (Resultado promedio de las muchas pruebas

realizadas). Con este dato se determina que:

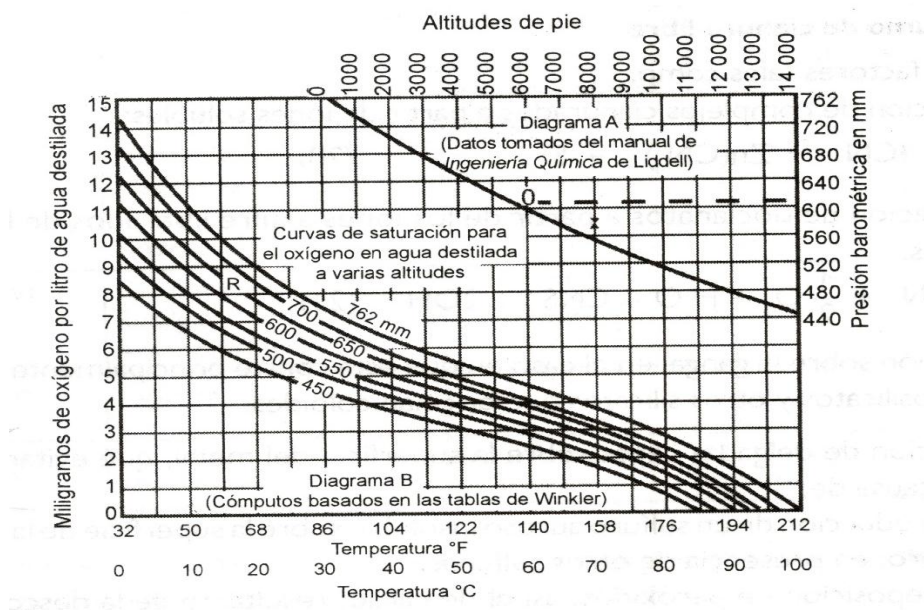
$$\frac{[CN^-]}{[O_2]} = 6$$

El resultado en la teoría es representativo porque los resultados en la práctica oscilan entre 4.6 y 7.4.

Estos resultados confirman la importancia de identificar las cantidades de oxígeno diluido durante el proceso de lixiviación. Se sabe que la altitud y la temperatura son factores

importantes en un experimento, la Fig. 9 representa la saturación del oxígeno en soluciones en sus valores máximos presentes a altitudes y temperaturas distintas. (Misari, 2010, pág. 20)

Figura 9: Grafico para determinar la presión barométrica a varias altitudes y cantidades máximas de la saturación del O₂ en las soluciones a altitudes y temperaturas distintas



Fuente: Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pag 21.

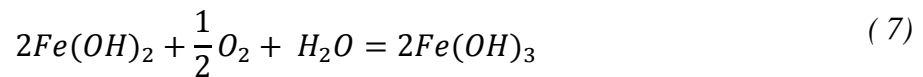
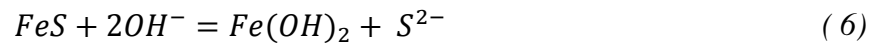
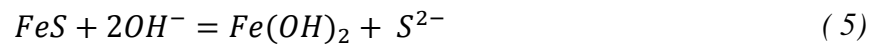
2.2.12. Efectos aceleradores y retardadores

Muchos investigadores como Haden confirman que existen elementos distintos que ayudan a la aceleración de la disolución del oro en solución de cianuro si se le adiciona mínimas proporciones de mercurio, sales de plomo, talio y sales de bismuto. Estos materiales alteran la capa límite de Nernst disminuyendo su espesor y acelerando, sabiendo que la difusión es la capa que controla al mecanismo de lixiviación con cianuro. Por lo tanto, se comprueba que al elevar las proporciones de plomo se puede retrasar el proceso. Esta acción de retardación en la lixiviación con cianuro existe la posibilidad que se deba por la presencia de cationes como Mn^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Ba^{2+} y Fe^{2+} . (Misari, 2010, pág. 20)

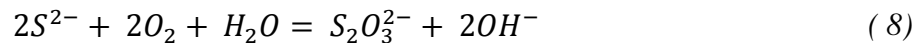
HABASHI da a conocer dos causas sobre la imputabilidad del efecto de retardación:

2.2.12.1. Consumo de oxígeno en la disolución

(Misari, 2010, pág. 21) Al estar presente el oxígeno en la disolución este hace que el consumo lo retarde, un ejemplo bien claro es que si el mineral presencia partículas de pirrotita, este muy fácilmente se descompone en hidróxidos ferrosos que luego pasan a oxidarse con el O₂ como se muestra en las siguientes reacciones:

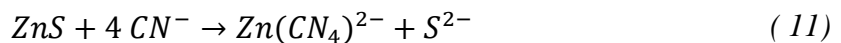


La producción de los thiosulfatos y polisulfuros se produce de la oxidación del ion azufre ocurriendo de la siguiente manera:



2.2.12.2. Consumo de cianuro libre

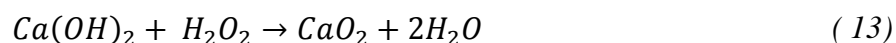
El consumo de cianuro libre se debe a 3 factores muy importantes, Uno de estos factores es que a partir de los iones solubles se formen complejos cianurados:



El tiocianato se genera por los iones de azufre cuando son separados de los sulfatos solubles.



Por último, existen capas delgadas que se forman sobre la superficie del oro donde dificultan su disolución como es el caso de la formación de sulfuros, la descomposición de peróxido según indica la reacción siguiente:



Al estar presentes el ozono con óxidos de oro este reacciona y oxida al cianuro de potasio como se muestra en la siguiente reacción:



Tabla 2: Solubilidad de minerales de distintos metales en soluciones cianicidas

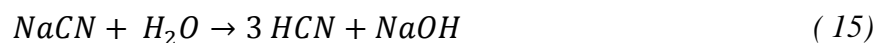
Oro	Calaverita	Rápidamente soluble	JOHNSTON (1933)
Plata	Argentita		LEAVER
	Cerargirita	Rápidamente Soluble	WOOLF Y
	Proustita	Moderadamente Soluble	KARCHMER
	Pirargirita		(1931)
Cobre	Azurita	94.5	
	Malaquita	90.2	
	Calcocita	90.2	
	Cuprita	85.5	
	Bornita	70.0	LEAVER Y WOOLF (1931)
	Enargita	65.8	
	Tetraedrita	21.9	
	Crisocola	11.8	
Zinc	Smithsonita	40.2	LEAVER Y WOOLF
	Zincita	35.2	(1931)

	Hidrozinca	35.1	
	Franklinita	20.2	
	Esfalerita	18.4	
	Hemimorfita	13.4	
	Willemita	13.1	
	Willomita		
	Pirrotita		
Hierro	Pirita	Rápidamente soluble	HEDLEY y TABACHNICK (1958)
	Hematita	Moderadamente soluble	
	Magnetita	Prácticamente insoluble	
	Siderita		
	Oropimente	73.0	
Arsénico	Rejalgar	9.4	
	Arsenopirita	0.9	
Antimonio	Estibina	21.1	
Plomo	Galena	Soluble a alta alcalinidad	LEMMON
			(1940)

Fuente: *Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Págs. 22-23.*

2.2.13. Desintegración de las soluciones de cianuro de sodio

La hidrólisis en agua de la solución de cianuro de sodio se representa en la siguiente reacción:



Para que las soluciones de cianuro de sodio no produzcan hidrólisis existen dos condiciones:

- La descomposición del cianuro de sodio es no considerable cuando el álcali es apreciable.
- Cuando el álcali libre presenta ausencia, con la adición de cal la hidrólisis puede ser retrasada.

(Misari, 2010, pág. 23) En las operaciones al adicionar cal en la pulpa en proceso de cianuración es común porque con esta práctica se evita la pérdida de la fuerza por hidrólisis como también sirve para poder neutralizar la acidez del mineral tratado, si en caso no se adicionaría cal se formaría ácido cianhídrico. El dióxido de carbono también es un factor muy importante para considerar porque al formarse ácido carbónico descompone al cianuro de sodio en solución de la siguiente manera:



En este caso al adicionar cal u otros álcalis ayudan para la no formación de gas cianhídrico porque ayudan a elevar el pH manteniendo la alcalinidad y formando carbonato de calcio el cual no perjudica y mantiene la fuerza del cianuro en la solución. (Misari, 2010, pág. 23)

Los resultados de esta prueba mostrados en la Tabla N°3, demuestran el efecto de la alcalinidad sobre la pérdida de cianuro por hidrólisis y; por la acción del dióxido de carbono del aire.

Para demostrar la alcalinidad en efecto a la pérdida de cianuro por hidrólisis se realizaron pruebas en donde los resultados se muestran en la tabla N° 3. Las soluciones fueron preparadas cada una conteniendo 0.051% de NaCN. A uno de ellos se adiciono 0.06% de cal hidratada; mientras que al otro fue dejado en su forma natural, levemente alcalino. Las soluciones, a una temperatura de 24°C, fueron agitadas en botellas de bocas amplias sobre rodillos durante 6 horas, después del cual ellos fueron titulados para determinar los contenidos de cianuro libre y cal. El pH de cada solución fue determinado antes y después de la prueba. A partir de estos resultados, puede ser visto que durante la prueba la solución sin cal vario en el pH desde 10.2 a 9.7; en 6 horas, esta solución perdió 33% de cianuro o 0.34 lb de NaCN

por tonelada. En caso de la otra solución donde el pH vario desde 11.6 a 11.2, la perdida de cianuro fue nula. (Misari, 2010, pág. 24)

Tabla 3: Efecto de la cal sobre la perdida de cianuro

EFEECTO DE LA CAL SOBRE LA PERDIDA DE CIANURO				
	SIN CAL		CON CAL	
	Inicial	Después de 6 horas	inicial	Después de 6 horas
NaCN %	0.051	0.034	0.051	0.051
CaO %	0.001	0.0005	0.061	0.015
pH	10.2	9.07	11.6	11.2
Perdida de NaCN(lb/ton)		0.34		nada

Fuente: *Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pags 22-23.*

2.2.14. Disolución de metales preciosos

Según a pasado el tiempo los investigadores han demostrado mediante ecuaciones las reacciones que ocurren para la disolución de oro en soluciones de cianuro. Estas ecuaciones son:

- 1) $4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 4\text{NaOH}$ (ecuación de Elsner)
- 2) $2\text{Au} + 4\text{NaCN} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 2\text{NaOH} + \text{H}_2$ (Ecuación de Janin)
- 3) $2\text{Au} + 4\text{NaCN} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 2\text{NaOH} + \text{H}_2\text{O}_2$ (Ecuación de Bodlaender)
- 4) $2\text{Au} + 4\text{NaCN} + \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2\text{NaAu}(\text{CN})_2 + 2\text{NaOH}$ (Ecuación de Bodlaender)

La ecuación total, sin embargo, es la misma ecuación de Elsner.

2.2.15. Variables del proceso de cianuración

2.2.15.1.Efecto de la concentración de cianuro sobre la velocidad de dilución

En los experimentos que realizan J. S. Maclaurin concluyen que con una solución de cianuro de sodio al 0.25% de una solución altamente concentrada a una solución de muy baja concentración logra una máxima velocidad de disolución de oro y plata. (Misari, 2010)

Para Christy el oro no se disuelve a concentraciones de 0.001% de cianuro de potasio. Por otro lado, Julián y Smart aumentan la concentración a un 0.1 % de cianuro de potasio teniendo un aumento en la velocidad de disolución del oro. White ya precisa las concentraciones para una velocidad máxima de disolución que está en 0.020% de cianuro de sodio y 0.027% de cianuro de potasio. La fuerza de la solución encontrada por Barsky, Swainson y Hedley para la rapidez en la disolución del oro fue de 0.05% de cianuro de sodio. (Misari, 2010, pág. 25)

Las diferentes concentraciones determinadas por los investigadores mencionados para lograr una mayor velocidad de disolución por los investigadores deben ser por la técnica empleada en donde existen factores como la velocidad de aereación, velocidad de agitación y radio de volumen de solución a la superficie del oro en donde el factor predominante es la cantidad de oxígeno presente en la solución que tiene contacto con el oro. (Misari, 2010, pág. 25)

Tabla 4: Oro disuelto en pruebas de 1 hora

NaCN en Solución	Au disuelto en 1 hora(mg/cm²)
0.500	2.943
0.250	3.007
0.100	2.986
0.050	3.251
0.025	2.513

0.010

0.338

Fuente: *Juan Vargas G. Metalurgia del oro, 2007, Pag 39.*

2.2.15.2. Velocidades relativas de disolución de oro, plata y sus aleaciones

Barsky muestra la tabla N°5 como resultado de las pruebas realizadas en donde usa solución de 100ml de NaCN al 0.10 % con una agitación constante y volumen determinado de aire en donde determina las velocidades relativas de disolución de oro, plata y dos aleaciones de oro-plata. A partir de estos, puede observarse que la plata se disolvió a la mitad de la velocidad a la cual se disolvió el oro; las velocidades de disolución de las aleaciones estuvieron entre los del oro y plata, casi en proporción a la composición de las aleaciones. Las cantidades de oro y plata disueltos de las aleaciones fueron prácticamente en la misma proporción como los porcentajes de esos metales en las aleaciones. (Misari, 2010, pág. 26)

Tabla 5: Velocidades relativas de disolución de oro, plata y aleaciones de oro-plata

ANÁLISIS DE METAL		VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN	ANÁLISIS DE METAL DISUELTO	
Au%	Ag%	mg/cm ² /h	Au%	Ag%
100	---	2.99	100	---
79.8	20.2	2.44	78.6	21.4
57.6	42.4	1.94	56.5	43.5
---	100	1.54	---	100

Fuente: *Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pags 26.*

2.2.15.3. Efecto del tamaño de partícula sobre la velocidad de disolución

Para tener un proceso eficiente de lixiviación del oro en el circuito de cianuración lo primero y antes de se tiene separar el oro libre mediante concentradores gravimétricos o centrífugos porque si no es el caso el oro no se disolvería en el tiempo establecido en este proceso. La molienda y clasificación es otro método que nos permite reducir el tamaño del mineral por medio de la recirculación. (Misari, 2010, pág. 27)

Barsky en sus investigaciones establece que $3.25\text{mg/cm}^2/\text{h}$ es la velocidad más alta de la disolución del oro. En donde refiere que se necesita 13 horas para disolver una pizca de oro de $44\ \mu\text{m}$ de espesor y para una pizca de oro de $1.19\ \mu\text{m}$ de espesor se necesitan 44 horas para disolverse. La velocidad de disolución de la plata a un mismo espesor con las mismas condiciones se necesita dos veces más del tiempo en relación con el oro. (Misari, 2010, pág. 27)

2.2.15.4.Efecto del oxígeno sobre la disolución de oro

Para una disolución eficiente del oro y la plata en el proceso de cianuración es primordial usar oxígeno o un agente oxidante. Antes se usaban agentes oxidantes arrojando buenos resultados en el proceso de cianuración como es el caso del peróxido de sodio, permanganato de bromo, permanganato de coloro y de potasio. Pero estos reactivos han sido desusados por sus altos costos. Al entender la reacción entre el cianuro y el oro con solo una previa aereacion en el proceso de cianuración se tiene buenos resultados en la recuperación del oro y la plata. (Misari, 2010, pág. 27)

Barsky, Swainson y Hedley al usar mezclas de oxígeno y nitrógeno como también por separado en 10 % de cianuro de sodio establecen la velocidad de disolución a 25°C de temperatura y 100 ml de volumen de solución con misma cantidad de volumen para cada gas. Los resultados que muestran la velocidad de disolución para la primera media hora de cada

prueba son mostrados en la tabla N°6. Con estos resultados, puede observarse que la velocidad de disolución de oro fue directamente proporcional al contenido de oxígeno y a la presión parcial del mismo. (Misari, 2010, págs. 27-28)

Tabla 6: Efecto del oxígeno sobre la velocidad de disolución de oro

OXIGENO	VELOCIDAD DE DISOLUCIÓN
	mg/cm ² /h
0	0.04
9.0	1.03
20.9	2.36
60.1	7.62
99.5	12.62

Fuente: *Fidel Misari C. Metalurgia del oro, 2010, Pags 28.*

2.2.15.5.Efecto de la alcalinidad sobre la disolución de oro

Al usar hidróxido de sodio o llamado comúnmente soda caustica no se genera perdida de cianuro por hidrolisis por su estabilidad en el pH, también no genera perdida por CO₂ presentes en el aire, en el agua existen bicarbonatos el cual nos ayuda a descomponerlo antes de entrar al proceso, también a las sales férricas, ferrosas y sulfatos lo neutraliza, como también a los elementos ácidos del mineral y a los compuestos ácidos resultantes de la desintegración de los minerales en las soluciones de CN. Ayuda en la recuperación de oro en telururos porque estos se desintegran con rapidez a pH altos. (Misari, 2010, págs. 28-29)

2.2.15.6.Efecto de la temperatura sobre la cianuración

Al aplicar calor a una pulpa con solución de cianuro se produce un incremento en la velocidad de disolución del oro y la plata por el aumento de actividad en la solución, por otro

lado, disminuye la cantidad de oxígeno en la pulpa teniendo efectos contrarios. (Misari, 2010, pág. 29)

Smart y Julián en sus investigaciones determinan la solubilidad del oro en solución con 0.25% de cianuro de potasio a temperaturas de entre 0°C y 100°C. Ellos determinan que a 85°C la velocidad de disolución llega al máximo la cantidad de oxígeno presentes en la solución de la mitad a diferencia en condiciones normales, y la solución llevada a 100°C no presenta oxígeno. (Misari, 2010, pág. 29)

Al calentar las soluciones en la práctica para la disolución del oro presenta desventajas porque previamente calentar el mineral antes de procesarlo implica un costo muy elevado, otro es que el consumo de cianuro de sodio aumentaría debido a al incremento de actividad entre los componentes cianicidas presentes en el mineral. (Misari, 2010, pág. 29)

2.3. DEFINICIONES CONCEPTUALES

- a. Mineral:** A parte de unas pocas excepciones notables (agua, mercurio, ópalo), los minerales son elementos sólidos inorgánicos o componentes elementales. Tienen estructura atómica y composición química definidas que varían entre unos términos fijos (Pellant, 1992, pág. 16).
- b. Roca:** Son los componentes esenciales de nuestro planeta. Se clasifican en tres grupos principales: Ígneas, metamórficas y sedimentarias. Las rocas son agregados de muchos granos minerales diferentes que se han fundido, cementado y se han endurecido juntos (Pellant, 1992, pág. 17).
- c. Óxidos:** Son minerales que se encuentran combinados con el oxígeno produciéndose así la oxidación (Pellant, 1992, pág. 20).
- d. Sulfuros:** Son minerales que se encuentran combinados con el azufre produciéndose la sulfatación (Pellant, 1992, pág. 20).

- e. **Elementos Nativos:** En este grupo se encuentran principalmente el oro, la plata y otros 5 metales. Estos elementos se encuentran libres sin estar combinados con otros elementos químicos. (Pellant, 1992, pág. 20)
- f. **Oro:** Es uno de los elementos de la tabla periódica que tiene por símbolo Au. Está considerado como el mejor metal en conducir la electricidad y el calor, relativamente maleable, dúctil y blando.
- g. **Metalurgia Extractiva:** Esta considerado como una ciencia que estudia la extracción o separación de los metales existentes en la tierra desde los minerales que lo componen mediante métodos o procesos fisicoquímicos. (Dominic, 2001, pág. 4)
- h. **Hidrometalurgia:** Es uno de los métodos que existen para separar los metales de desde los minerales que lo componen en un ambiente acuosos con procesos fisicoquímicos. (Dominic, 2001)
- i. **Lixiviación:** Es un método que se aplica para la disolución de metales específicos presentes en los minerales con la aplicación de ciertos disolventes en estado líquido. (Dominic, 2001, págs. 4-5)
- j. **Cianuración:** Es un método metalúrgico que se aplica para la disolución de oro y la plata mediante solución de cianuro. Este es un método lixiviación muy usado en estos tiempos.
- k. **Cianuro de sodio:** Es uno de los principales productos químicos que se usa para la extracción del oro y la plata desde sus minerales. Tiene por símbolo NaCN y es un producto altamente letal.
- l. **Soda Caustica:** Es un agente neutralizante de efluentes ácidos que no afecta la dureza del agua.

- m. Ión cianuro:** Es el término que está referido exclusivamente al anión CN^- en una solución.
- n. Soluciones ricas:** Son soluciones acuosas ricas en iones del metal valioso extraídos a partir del cual debe ser posible separar este metal y recuperarlo con un alto nivel de pureza, ya que también contiene una gama de impurezas.
- o. Beneficio:** Es el proceso metalúrgico denominado para la extracción de los metales de interés de sus minerales por medio de procesos químicos, físicos o los dos conjuntamente.
- p. Cabeza:** Es la denominación de la ley de un metal de interés antes de entrar al proceso dentro de una planta de tratamiento de minerales.
- q. Pulpa:** Es la mezcla de un conjunto de partículas diminutas de un material sólido de mena con agua.
- r. Ley:** Se denomina ley a la cantidad de un metal de interés con relación a la cantidad en peso de su mineral.
- s. Molienda:** Es uno de los procesos que se aplica dentro de una planta metalúrgica para reducir el tamaño del mineral aplicando molinos de barras o billas ya sea en medios secos o húmedos.
- t. Planta:** Se denomina planta a una instalación industrial.
- u. Recuperación:** Es el porcentaje que representa el grado de obtención en físico de un metal de interés después de un proceso metalúrgico con relación a antes de ingresar al proceso.
- v. Relave:** Es un producto del tratamiento metalúrgico de los minerales sin valor económico.

2.4. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

2.4.1. Hipótesis general

Realizando una evaluación en las pruebas de cianuración, nos permitirá incrementar el porcentaje de recuperación de la planta de beneficio santa filomena II de la empresa SOTRAMI S.A.

2.4.2. Hipótesis específicas

- La concentración de cianuro de sodio de los diferentes proveedores va influir en la recuperación de oro en las pruebas metalúrgicas.
- La concentración de cianuro de sodio de los diferentes proveedores va influir en la recuperación de plata en las pruebas metalúrgicas.
- El consumo del cianuro de sodio de los diferentes proveedores uno de ellos va tener mayor recuperación de oro y plata en las pruebas metalúrgicas

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1.1. Tipo de Investigación.

El tipo de investigación de este trabajo es experimental porque el investigador se centra exclusivamente en el objetivo principal y específicos que efectos de sus actos trata de comprobar las hipótesis mencionadas. (Bernal, 2010).

De acuerdo con su naturaleza: Experimental.

De acuerdo con el propósito o utilización: Investigación aplicada.

Se realiza investigación experimental y aplicada, en este trabajo ya que se realiza experimentos al nivel de laboratorio con un control mínimo para posteriormente aplicarlo en el proceso de cianuración por agitación en la Planta de Beneficio.

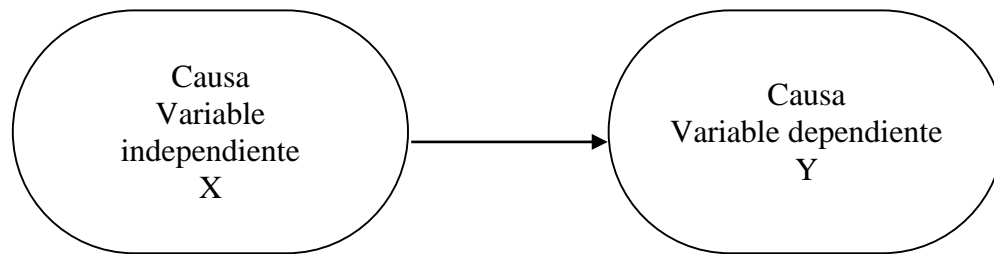
3.1.2. Nivel de Investigación.

Es una investigación de nivel predictiva o experimental por que se aplicara técnicas métodos que ayuden a dar solución a la realidad problemática que da inicio al presente estudio de investigación (Carrasco, 2005).

3.1.3. Diseño de la Investigación.

En este estudio de investigación se aplicará el diseño experimental, en donde manipularán variables independientes, y constatarse los efectos de esta manipulación en las variables dependientes en el estudio (Pimienta, 2012, pág. 57).

Figura 10: Esquema de experimento y variable



Fuente: Elaboración propia.

3.1.4. Enfoque de la Investigación.

El enfoque del presente estudio es cuantitativo, porque el estudio son variables o fenómenos cuantificables o fácilmente mensurables. Para probar la hipótesis se usa el análisis estadístico y la medición numérica recolectando datos con el propósito de probar la teoría.(Fernandez, 2014).

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1. Población

La población está representada por los minerales de la mina y provenientes de los mineros artesanales (Mineral y relave) de Localidad Santa Filomena, con contenido de oro y plata.

3.2.2. Muestra

La muestra para el trabajo de investigación es muestras que se tomó de la faja transportadora, al inicio del proceso de molienda y cianuración.

3.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES E INDICADORES

Tabla 7: Operacionalización de variables e indicadores

VARIABLES	INDICADORES
independientes	
<ul style="list-style-type: none">• Cianuración por agitación	<ul style="list-style-type: none">• Cianuro de sodio
Dependientes	
<ul style="list-style-type: none">• Extracción de oro y plata	<ul style="list-style-type: none">• Consumo• % de Recuperación

Fuente: Elaboración propia.

3.4. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.4.1. Técnicas a implementar

a. Observación sistemática Directa.

Esta técnica se aplicará para observar la investigación en presente trabajo mientras se viene ejecutando.

b. Observación Sistemática Indirecta.

Se aplicará esta técnica para estudiar y analizar otros documentos de investigación que tienen relación con el presente trabajo de investigación.

c. Observación experimental.

Se aplicará esta técnica para conocer cómo se están desarrollando las actividades con el fin de posteriormente procesar los datos extraídos.

d. Otras Técnicas.

Técnica de cuestionario.

3.4.2. Descripción de los instrumentos

- a. Ficha de observación.
- b. Lista de cotejo.
- c. Escalas libreta de notas.
- d. Filmadora, cámara fotográfica y grabadora.

3.5. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

En este trabajo de investigación se realizarán análisis estadístico con programa de cálculo Microsoft Excel en donde la información será mostrada con tablas y graficas entre otros.

CAPITULO IV

RESULTADOS

4.1. PREPARACIÓN Y TOMA DE MUESTRA

Se realizó un muestreo del mineral ingresante al proceso de molienda proveniente del blending(mineral y relave), la muestra tomada con peso aprox. de 30 kilogramos. Se realizaron cuarteos para realizar los siguientes ensayos:

- Análisis químico(Método Newmont)
- Determinación del porcentaje de Humedad
- Determinación de la gravedad especifica
- Análisis Granulométrico
- Moliendabilidad
- Pruebas experimentales de cianuración por agitación

4.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.2.1. Análisis químico cuantitativo de cabeza

Se realizo el análisis químico de la muestra por el método newmont para los valores de Au y Ag.

Tabla 8: Análisis químico cuantitativo de cabeza por Au y Ag(Método Newmont)

Malla	Peso acumulado	% Peso	Ley Au Onz/T.C	Ley Ag Onz/T.C
+140	15.26	89.83	0.737	0.923
-140	134.8	10.17	0.646	1.096
Cabeza calculada	150.06	100	0.655	1.079

Para convertir de Onz/T.C. a gr/T.M. solo basta multiplicar la ley por 34.2815.

4.2.2. Determinación del porcentaje de humedad

- Peso Húmedo : 568 g
- Peso Seco : 546 g

$$\% Humedad = \frac{(Peso\ humedo - Peso\ seco)}{Peso\ humedo} \times 100$$

$$\% Humedad = \frac{(568\ g - 546\ g)}{568\ g} \times 100$$

$$\% Humedad = 3.87\%$$

4.2.3. Determinación de la gravedad específica (Método del picnómetro)

Para realizar esta prueba se empleó un picnómetro de 50 cm³ de capacidad.

Primero se calculará la densidad del agua:

$$M_{(\text{Picnómetro})} : 28.85\ g$$

$$M_{(\text{Picnómetro} + \text{Agua})} : 79.27\ g$$

$$M_{(\text{Agua})} = M_{(\text{Picnómetro} + \text{Agua})} - M_{(\text{Picnómetro})} : 79.27\ g - 28.85\ g = 50.43\ g$$

$$Vol_{(\text{Picnómetro})} : 50\ ml = 50\ cm^3$$

$$\rho_{(H_2O)} = \frac{M_{(H_2O)}}{V_{(H_2O)}} = \frac{50.43\ g}{50\ cm^3}$$

$$\rho_{(H_2O)} = 1.0086\ g/cm^3$$

$$M_{(\text{Picnómetro})} : 28.85\ g$$

$$M_{(\text{Picnómetro} + \text{Agua})} : 79.27\ g$$

$$M_{(\text{Picnómetro} + \text{Mineral})} : 38.47\ g$$

$$M_{(\text{Picnómetro} + \text{Mineral} + \text{Agua})} : 85.16 \text{ g}$$

$$M_{(\text{Mineral})} = M_{(\text{Picnómetro} + \text{Mineral})} - M_{(\text{Picnómetro})} : 38.47 \text{ g} - 28.85 \text{ g} = 9.62 \text{ g}$$

$$Ge = \frac{M_{(\text{Mineral})}}{M_{(\text{Mineral} + \text{Agua})} + M_{(\text{Mineral})} - M_{(\text{Picnómetro} + \text{Mineral} + \text{Agua})}} \times \rho_{(\text{H}_2\text{O})}$$

$$Ge = \frac{9.62}{79.27 + 9.62 - 85.16} \times 1.0086$$

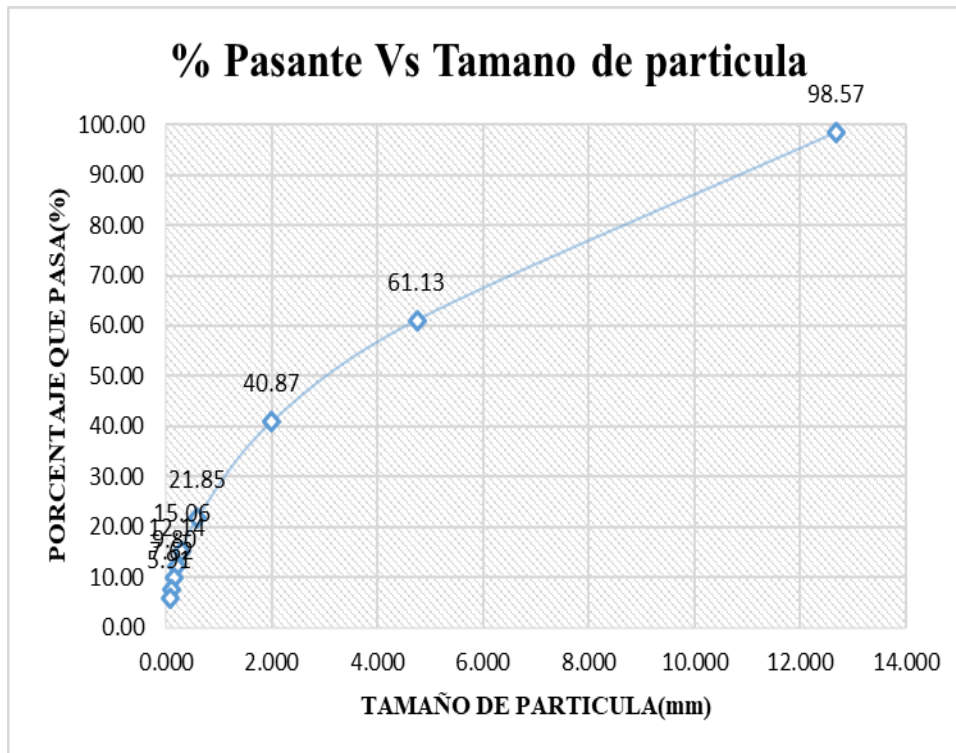
$$Ge = 2.6013 \text{ g/cm}^3 = 2.6 \text{ g/cm}^3$$

4.2.4. Análisis granulométrico

Tabla 9: Análisis granulométrico

Tamiz	Abertura (mm)	Peso	%Parcial	%Acumulado	
		retenido g	Retenido f(x)	Retenido G(x)	Pasa F(x)
1/2"	12.700	8.60	1.43	1.43	98.57
N°04	4.750	225.50	37.45	38.87	61.13
N°10	2.000	122.00	20.26	59.13	40.87
N°30	0.600	114.50	19.01	78.15	21.85
N°50	0.300	40.90	6.79	84.94	15.06
N°70	0.212	17.60	2.92	87.86	12.14
N°100	0.150	14.10	2.34	90.20	9.80
N°140	0.106	13.10	2.18	92.38	7.62
N°200	0.074	10.30	1.71	94.09	5.91
-200		35.60	5.91	100.00	
Total		602.2			

Figura 11: Porcentaje pasante Vs. Tamaño de partícula(mm)



4.2.5. Moliendabilidad

Para estas pruebas se realizaron moliendas de muestras de 2 Kg a tiempos determinados, se efectuaron en un molino estándar de laboratorio a un porcentaje de sólidos de 50%, luego realizar su respectivo análisis granulométrico empleando el agitador de tamices Ro-Tap.

Con los datos del análisis granulométrico de las moliendas e incluyendo también el análisis granulométrico a tiempo 0 minutos, se elabora la curva característica de moliendabilidad.

Figura 12: Análisis granulométrico(moliendabilidad)

N° malla	Tiempo 0 min		Tiempo 10 min		Tiempo 20 min		Tiempo 30 min		Tiempo 40 min	
	Peso ret. (g)	F(x)	Peso ret. (g)	F(x)	Peso ret. (g)	F(x)	Peso ret. (g)	F(x)	Peso ret. (g)	F(x)
4	234.1	61.13	0	100.00	0	100.00	0	100.00	0	100.00
10	122	40.87	14.3	97.16	0	100.00	0	100.00	0	100.00
30	114.5	21.85	89.4	79.40	0.7	99.86	0.3	99.94	0.1	99.98
50	40.9	15.06	119.5	55.67	10.5	97.77	4.3	99.10	1.3	99.72
70	17.6	12.14	58.9	43.97	21.8	93.42	9.6	97.22	2.6	99.21
100	14.1	9.80	43.1	35.41	49.1	83.62	17.8	93.74	4.8	98.25
140	13.1	7.62	34.7	28.52	73.2	69.01	30.2	87.83	16.2	95.04
200	10.3	5.91	22.8	23.99	87.5	51.56	67.2	74.67	27.5	89.59
-200	35.6	0.00	120.8	0.00	258.4	0.00	381.5	0.00	451.7	0.00
Total	602.2		503.5		501.2		510.9		504.2	

Figura 13: Curvas de Análisis granulométricos(moliendabilidad)

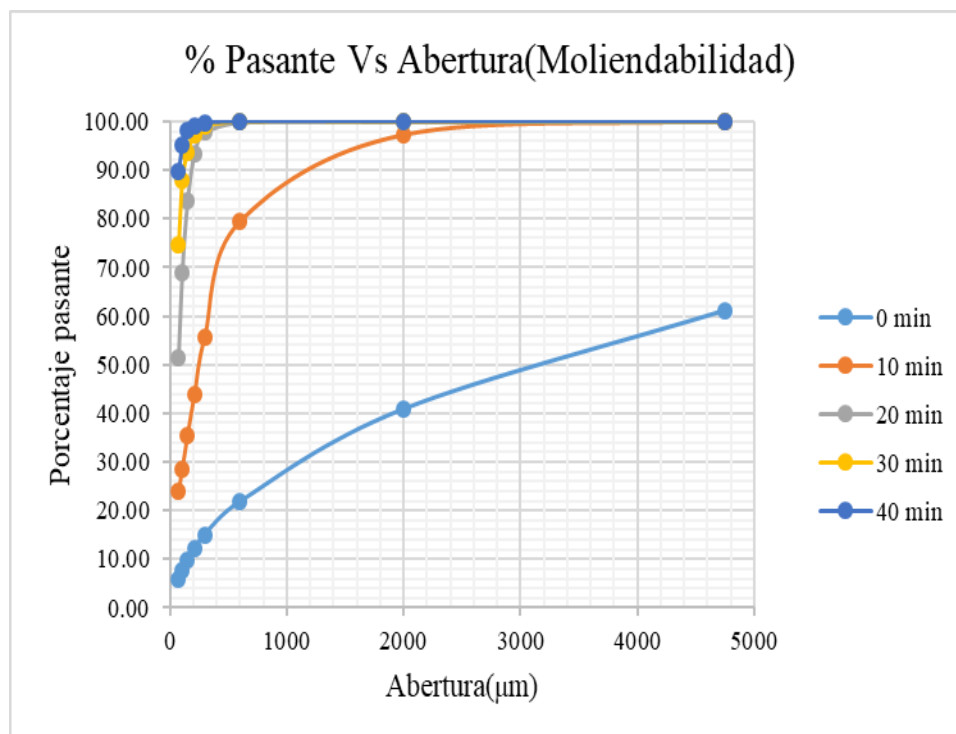


Tabla 10: Tiempo Vs. %-m200(moliendabilidad)

Tiempo (min) X	%-m200 Y
0	5.91
10	23.99
20	51.56
30	74.67
40	89.59

Figura 14: Curva de prolongación a 85% -m200

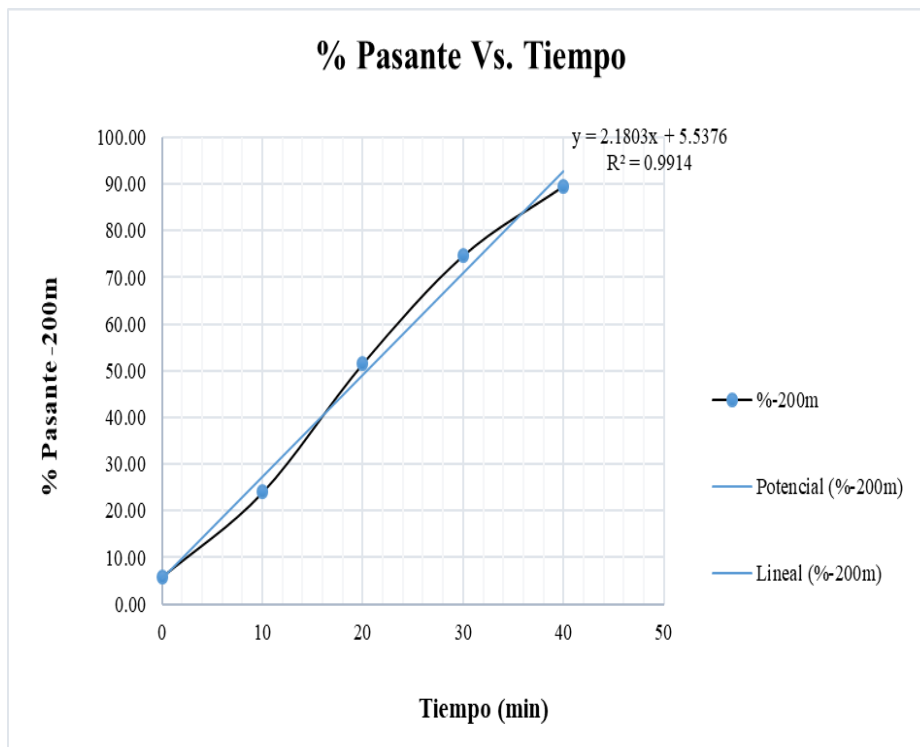


Tabla 11: Tiempo de molienda

RESULTADOS	
Ecuación lineal	$y = 2.1803x + 5.5376$
% -m200(Y)	85
Tiempo de molienda	36.45 min

4.3. DETERMINACIÓN DE PUREZAS DE NaCN

Se preparo 3 soluciones de 100 ml cada una con 1.00 gr de NaCN de los distintos proveedores.

Su determinación se realiza titulando con nitrato de plata al 4.33 gr/l (0.0255M) y yoduro de potasio como indicador al 10 %; basado en la siguiente reacción:



Dos moles de cianuro libre consumen un mol de plata:

$$M_{NaCN} = \frac{2 \times (ml_{AgNO_3})_{gastados} \times (M_{AgNO_3})}{ml_{muestra}}$$

Con el exceso de plata se detecta un cambio repentino de color amarillo opalescente por el indicador.

4.3.1. Concentración teórica de NaCN

El porcentaje de pureza lo compráramos al 100% respecto a la molaridad teórica. Teniendo en cuenta que los fabricantes reportan aproximadamente 98% de pureza.

$$M = \frac{n_{sto}}{V_{(Lt) sol}} = \frac{m}{\overline{PM} V_{(lt) sol}}$$

Donde:

M : Concentración molar

n_{sto} : Moles de soluto

$V_{(Lt) sol}$: Volumen de la solución en litros (100 ml = 0.1 lt)

m : peso del soluto en gramos (1gr)

PM : Peso molecular del soluto (NaCN = 49.004)

$$M_{NaCN(Teorico)} = \frac{1}{\frac{49.004}{0.1}} = 0.20406$$

4.3.2. Concentración valorada del NaCN

Se realizó la titulación con $AgNO_3$ (0.0255 M), indicador al 10% y 25 ml de solución NaCN al 10% de cada proveedor, teniendo los siguientes resultados:

Tabla 12: Concentración valorada del NaCN

REACTIVO	ml $AgNO_3$ (ml)	CONC. MOLAR	PUREZA
NaCN _(Teórico)	-	0.20406 M	100.00 %
NaCN _(PETRO S.A.C.)	96.5	0.19686 M	96.47 %
NaCN _(Mercantil S.A.C.)	96.9	0.19768 M	96.87 %
NaCN _(CUSA S.A.C.)	96.8	0.19747 M	96.77 %

4.4. PRUEBAS METALÚRGICAS DE CIANURACIÓN

4.4.1. Prueba metalúrgica de cianuración 1

Condiciones:

- Proveedor NaCN : Petro S.A.C.
- Peso de la muestra : 4000 g
- Relación L/S : 2 a 1
- Fuerza de Cianuro : 0.14 a 0.16%
- Ph : 11
- Tiempo : 24 horas

Tabla 13: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 1

Fecha	Hora	Hras Acum.	Control de parámetros				Adición de reactivos		Ley g/m ³	
			pH		ml	CN ⁻	NaCN	NaOH		
			I	F	AgNO ³	Libre				
2/11/18	8:00	0	7	12			-	4	-	
2/11/18	8:20	0	12	12			6.4	-	-	
2/11/18	9:20	1	12	12	1.9	0.152	0.3	-	-	
2/11/18	10:20	2	12	12	1.6	0.128	1.3	-	3.84	
2/11/18	12:20	4	12	12	1.7	0.136	1	-	-	
2/11/18	16:20	8	12	12	1.9	0.152	0.3	-	7.6	
2/11/18	20:20	12	12	12	1.8	0.144	0.6	-	-	
3/11/18	00:20	16	12	12	1.9	0.152	0.3	-	9.23	
3/11/18	4:20	20	12	12	1.8	0.144	0.6	-	-	
3/11/18	8:20	24	12	12	1.8	0.136	-	-	11.3	
		Total					10.8	4		

Tabla 14: Consumo de reactivos P.M. 1

REACTIVO	CONSUMO POR TONELADA	
NaCN	3.36	kg/TM
NaOH	2	kg/TM

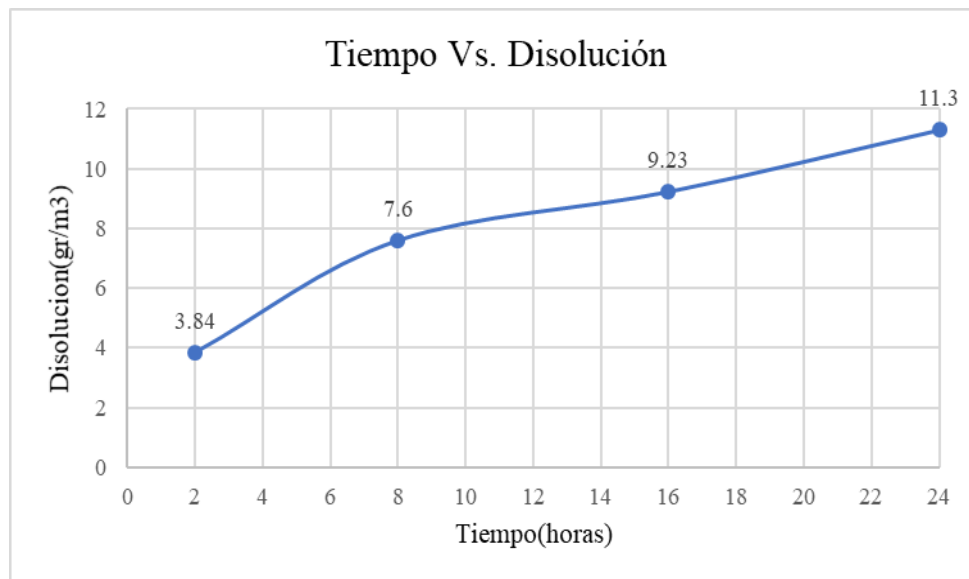
Tabla 15: Balance Metalúrgico de Au P.M. 1

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (g)/ VOLUMEN (ml)	LEY Au (g/TM) ò (g/m ³)	CONTENIDO FINIOS Au(mg)	% REC.
CABEZA	2000	22.457	44.914	94.36
SOL. RICA	4000	11.3	45.200	
RELAVE	2000	1.35	2.700	
Cabeza calculada		23.950	47.900	

Tabla 16: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 1

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (g)/ VOLUMEN (ml)	LEY Ag (g/TM) ò (g/m3)	CONTENIDO FINIOS Ag(mg)	% REC.
CABEZA	2000	36.990	73.979	36.97
SOL. RICA	4000	7.610	30.440	
RELAVE	2000	25.951	51.902	
Cabeza calculada		41.171	82.342	

Figura 15: Tiempo Vs. Disolución del Au P.M. 1



4.4.2. Prueba metalúrgica de cianuración 2

Condiciones:

- Proveedor NaCN : Mercantil S.A.C.
- Peso de la muestra : 4000 g
- Relacion L/S : 2 a 1

- Fuerza de Cianuro : 0.14 a 0.16%
- Ph : 11
- Tiempo : 24 horas

Tabla 17: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 2

Fecha	Hora	Hras Acum.	Control de parámetros				Adición de reactivos		Ley g/m ³
			pH		ml	CN ⁻	NaCN	NaOH	
			I	F	AgNO ³	Libre			
2/11/18	8:00	0	7	12			-	4	-
2/11/18	8:20	0	12	12			6.4	-	-
2/11/18	9:20	1	12	12	1.9	0.152	0.3	-	-
2/11/18	10:20	2	12	12	1.7	0.136	1	-	4.11
2/11/18	12:20	4	12	12	1.8	0.144	0.6	-	-
2/11/18	16:20	8	12	12	1.8	0.144	0.6	-	7.36
2/11/18	20:20	12	12	12	1.7	0.136	1	-	-
3/11/18	00:20	16	12	12	1.9	0.152	0.3	-	9.64
3/11/18	4:20	20	12	12	1.9	0.152	0.3	-	-
3/11/18	8:20	24	12	12	1.8	0.144	-	-	11.43
		Total					10.5	4	

Tabla 18: Consumo de reactivos P.M. 2

REACTIVO	CONSUMO POR TONELADA	
NaCN	3.09	kg/TM
NaOH	2	kg/TM

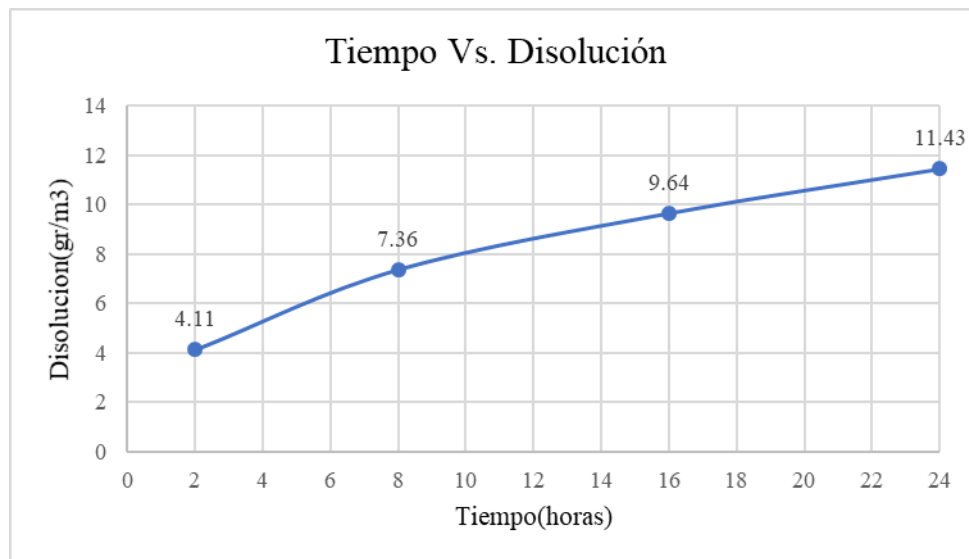
Tabla 19: Balance Metalúrgico de Au P.M. 2

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (g)/ VOLUMEN (ml)	LEY Au (g/TM) ò (g/M3)	CONTENIDO FINIOS Au(mg)	% REC.
CABEZA	2000	22.457	44.914	96.01
SOL. RICA	4000	11.43	45.720	
RELAVE	2000	0.95	1.900	
Cabeza calculada		23.810	47.620	

Tabla 20: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 2

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (g)/ VOLUMEN (ml)	LEY Ag (g/TM) ò (g/m3)	CONTENIDO FINIOS Ag(mg)	% REC.
CABEZA	2000	36.990	73.979	46.03
SOL. RICA	4000	9.620	38.480	
RELAVE	2000	22.557	45.114	
Cabeza calculada		41.797	83.594	

Figura 16: Tiempo Vs. Disolución del Au P.M. 2



4.4.3. Prueba metalúrgica de cianuración 3

- Proveedor NaCN : CUSA S.A.C.
- Peso de la muestra : 4000 gr
- Relacion L/S : 2 a 1
- Fuerza de Cianuro : 0.14 a 0.16%
- Ph : 11
- Tiempo : 24 horas

Tabla 21: Control de pruebas metalúrgicas de cianuración 3

Fecha	Hora	Hras Acum.	Control de parámetros				Adición de reactivos		Ley g/m ³
			pH		ml	CN ⁻	NaCN	NaOH	
			I	F	AgNO ³	Libre			
2/11/18	8:00	0	7	12			-	4	-
2/11/18	8:20	0	12	12			6.4	-	-
2/11/18	9:20	1	12	12	1.9	0.152	0.3	-	-
2/11/18	10:20	2	12	12	1.6	0.128	1.3	-	4.34
2/11/18	12:20	4	12	12	1.7	0.136	1	-	-
2/11/18	16:20	8	12	12	1.8	0.144	0.6	-	7.24
2/11/18	20:20	12	12	12	1.9	0.152	0.3	-	-
3/11/18	00:20	16	12	12	1.9	0.152	0.3	-	9.46
3/11/18	4:20	20	12	12	1.8	0.144	0.6	-	-
3/11/18	8:20	24	12	12	1.6	0.128	-	-	11.29
		Total					10.8	4	

Tabla 22: Consumo de reactivos P.M. 3

REACTIVO	CONSUMO POR TONELADA	
NaCN	3.48	kg/TM
NaOH	2	kg/TM

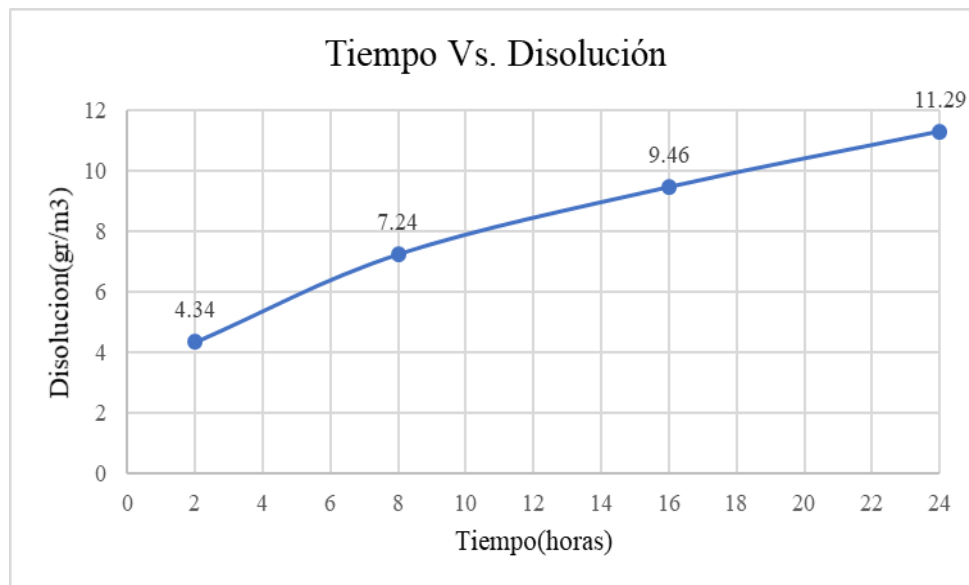
Tabla 23: Balance Metalúrgico de Au P.M. 3

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (gr)/ VOLUMEN (ml)	LEY Au (g/TM) ò (gr/m3)	CONTENIDO FINIOS Au(mg)	% REC.
CABEZA	2000	22.457	44.914	93.77
SOL. RICA	4000	11.29	45.160	
RELAVE	2000	1.5	3000	
Cabeza calculada		24.080	48.160	

Tabla 24: Balance Metalúrgico de Ag P.M. 3

BALANCE METALURGICO				
COMPONENTES	PESO (gr)/ VOLUMEN (ml)	LEY Ag (g/TM) ò (gr/m3)	CONTENIDO FINIOS Ag(mg)	% REC.
CABEZA	2000	36.990	73.979	41.79
SOL. RICA	4000	8.800	35.200	
RELAVE	2000	24.511	49.023	
Cabeza calculada		42.111	84.223	

Figura 17: Tiempo Vs. Disolución del Au P.M. 3



CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Al término del estudio de evaluación del cianuro de sodio para la optimización del proceso metalúrgico de la planta de beneficio Santa Filomena II de la empresa SOTRAMI S.A., se llegó a las siguientes conclusiones:

En el estudio de investigación la muestra fue tomada del blending formado antes de entrar al proceso de cianuración y se tomó los mismos parámetros para reflejar con exactitud la operación en Planta.

En la evaluación del porcentaje de pureza de los distintos cianuros de sodio de cada proveedor, se tiene como resultado que el NaCN de la empresa Mercantil S.A.C lidera con un 96.87 % de pureza, luego sigue la empresa CUSA S.A.C. con un 96.77% y por último la empresa con la cual se viene trabajando actualmente en la planta Santa Filomena II; PETRO S.A.C. con un 96.47%.

La prueba metalúrgica 1 se dosifico con el reactivo (NaCN) de la empresa PETRO S.A.C por un tiempo de agitación de 24 horas teniendo un consumo de NaCN de 3.36 kg/TM y NaOH de 2 kg/TM con una recuperación de 94.36 %(Au) y 36.97%(Ag).

La prueba metalúrgica 2 se dosifico con el reactivo (NaCN) de la empresa Mercantil S.A.C por un tiempo de agitación de 24 horas teniendo un consumo de NaCN de 3.09 kg/TM y NaOH de 2 kg/TM con una recuperación de 96.01 %(Au) y 46.03%(Ag).

La prueba metalúrgica 3 se dosificó con el reactivo (NaCN) de la empresa CUSA S.A.C por un tiempo de agitación de 24 horas teniendo un consumo de NaCN de 3.48 kg/TM y NaOH de 2 kg/TM con una recuperación de 93.77 % (Au) y 41.79% (Ag).

Con los resultados obtenidos al desarrollar las pruebas metalúrgicas se concluye que el cianuro de sodio de la empresa Mercantil S.A.C. es el más eficiente a comparación de los demás, tiene una mayor pureza (96.87), un menor consumo de NaCN (3.09 kg/TM) y una mayor recuperación tanto para el Oro (96.01 %) como para la Plata (46.03%).

5.2. RECOMENDACIONES

En el presente estudio de investigación se recomienda realizar pruebas metalúrgicas de cianuración a tiempos de 36 y 48 horas con la misma fuerza del NaCN controlados en la Planta Metalúrgica.

Realizar una prueba piloto con los mismos parámetros de la planta de cianuración para tener mejores resultados y poder realizar mejor la evaluación.

Realizar un estudio técnico-económico para implementar el mejor reactivo a las operaciones metalúrgicas en la Planta para tener un mejor costo de operaciones y una mayor recuperación de los metales preciosos.

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, E. (2017). *Estudio de la investigación metalúrgica para la recuperación de oro y plata a partir de minerales acopiados en la compañía minera Jerusalen S.A.C.* Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5338>
- Aquise, L. (2014). *Ampliación de la capacidad y optimización de la planta de beneficio Laytaruma.* Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2647>
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación*. Chía: Pearson.
- Carrasco, S. (2005). *Metodología de la investigación científica*. Lima: San Marcos.
- Cegarra, J. (2004). *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Barcelona: Díaz de Santos.
- Contreras, D. (1964). *Metalurgia del Oro y de la Plata*. México: Comisión de Fomento Minero.
- Dominic, E. (2001). *Hidrometalurgia "Fundamentos, procesos y aplicaciones"*. Chile: Andros Impresores Ltda.
- Fernandez, C. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico D.F: Mc Gram Hill .
- Machaca, E. (2014). *Investigación para la optimización de la recuperación de oro y plata por el proceso de cianuración intensiva en la planta Antapite.* Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2695>
- Misari, F. (2010). *Metalurgia del oro*. Lima: San Marcos E.I.R.L.
- Morales, D. (2014). *Optimización de la recuperación de oro y plata de las arenillas en Century Mining Perú S.A.C.* Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2709>
- Pellant, C. (1992). *Manual de identificación de rocas y minerales*. Barcelona: Omega S.A.C.
- Pimienta, J. (2012). *Metodología de la investigación*. Mexico: Pearson Educación.
- Punuera, F. (2016). *Evaluación de la planta de beneficio de minerales auríferos, en la unidad minera Century Mining Perú S.A.C.* Arequipa. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3366>
- Vargas, J. (2007). *Metalurgia del oro y la plata*. Lima: San Marcos.

ANEXO

Anexo 2: Resumen del derecho minero Santa Filomena

RESUMEN DEL DERECHO MINERO

Datos Generales			
Código	010028492	Nombre	SANTA FILOMENA
Fecha de Formulación	22/09/1992	Situación	VIGENTE
Procedimiento	TITULADO(CONCESION)	Tipo	PETITORIO (D.LEG. 708)
Has. Formuladas	1,000.00	Sustancia	METALICA
Has. Rectificadas		Has. Formadas	
Has. Reducidas		Has. Disponibles	
Ubicación	ARCHIVO CENTRAL desde el 08/11/2018		

Titular Referencial			
Tipo	Nombre de Razón Social	Dirección	% Participación
JURIDICO	MINERA SOTRAMI S.A.	AV. SEPARADORA INDUSTRIAL # 147 URB.MONTEERRICO LIMA/LA MOLINA/LIMA	100

Demarcaciones			
Departamento	Provincia	Distrito	
AYACUCHO	LUCANAS	SANCOS	

Cartas			
Código	Descripción	Zona UTM	
31-1	JAQUI	18	

Vertice	Coordenadas UTM PSAD56		Coordenadas WGS84		
	Norte	Este	Norte	Este	
1	8,301,000.00	581,000.00	8,300,629.48	580,777.32	
2	8,301,000.00	578,000.00	8,300,629.48	577,777.37	
3	8,302,000.00	578,000.00	8,301,629.48	577,777.34	
4	8,302,000.00	576,000.00	8,301,629.47	575,777.37	
5	8,303,000.00	576,000.00	8,302,629.48	575,777.35	
6	8,303,000.00	579,000.00	8,302,629.49	578,777.30	
7	8,304,000.00	579,000.00	8,303,629.49	578,777.27	
8	8,304,000.00	581,000.00	8,303,629.49	580,777.23	

Pagos					
Nro. Recibo	Monjo	Fecha Pago	Nro. Cuenta	Banco	Concepto

Resoluciones				
Nro. Resolución	Fec. Resolución	Decisión	Plazo	
DCM	25/06/2013	CARECE DE OBJETO INGEMMET		
DCM	25/06/2013	PONGASE EN CONOCIMIENTO DEL INTERESADO LO RESUELTO		
DCM	27/03/2013	PONGASE EN CONOCIMIENTO DEL INTERESADO LO RESUELTO		
INACC	20/06/2001	TENGASE PRESENTE	0 días	
RPM	07/03/2001	CARECE DE JURISDICCION ADMINISTRATIVA	0 días	
- -OCM	21/02/2000	HAGASE EFECTIVO APERCIBIMIENTO	0 días	
- -OCM	13/01/2000	PAGO DE PLANILLAS - DILIGENCIA PERICIAL	0 días	
- -OCM	13/01/2000	POSICIONAMIENTO DE HITOS-Admisión	0 días	
- -OCM	13/01/2000	REQUERIMIENTO DE REQUISITOS-VARIOS	10 días	

Fecha de emisión: martes 27 de noviembre del 2018

Fuente: INGEMMET.

Anexo 3: Resumen del derecho minero Santa Filomena II

RESUMEN DEL DERECHO MINERO

Datos Generales			
Código	P0000101	Nombre	SANTA FILOMENA II
Fecha de Formulación	27/12/2001	Situación	VIGENTE
Procedimiento	TITULADO(CONCESION)	Tipo	PLANTAS DE BENEFICIO
Has. Formuladas	15.00	Sustancia	METALICA
Has. Rectificadas		Has. Formadas	
Has. Reducidas		Has. Disponibles	
Ubicación	DIRECCIÓN DE CATASTRO MINERO desde el 07/08/2015		

Titular Referencial

Tipo	Nombre de Razón Social	Dirección	% Participación
JURIDICO	SOCIEDAD DE TRABAJADORES MINEROS S.A.		100

Demarcaciones

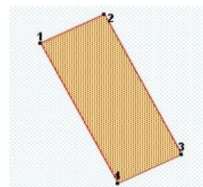
Departamento	Provincia	Distrito
AYACUCHO	LUCANAS	SANCOS

Cartas

Código	Descripción	Zona UTM
31-1	JAQUI	18

Coordenadas WGS84

Vertice	Norte	Este
1	8,296,092.45	573,973.56
2	8,296,204.45	574,196.55
3	8,295,666.45	574,465.56
4	8,295,555.45	574,241.57



Pagos

Nro. Recibo	Monto	Fecha Pago	Nro. Cuenta	Banco	Concepto
-------------	-------	------------	-------------	-------	----------

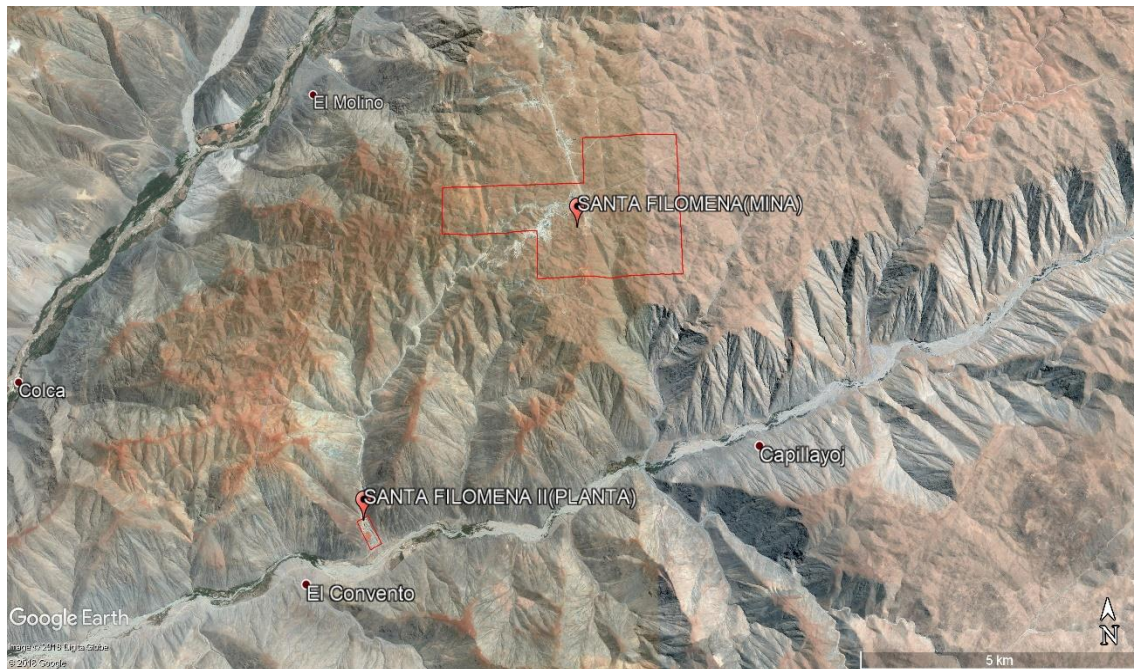
Resoluciones

Nro. Resolución	Fec. Resolución	Decisión	Plazo
0082-2009-MEM/DGM	15/04/2009	TITULO	15 dias

Fecha de emisión: martes 27 de noviembre del 2018

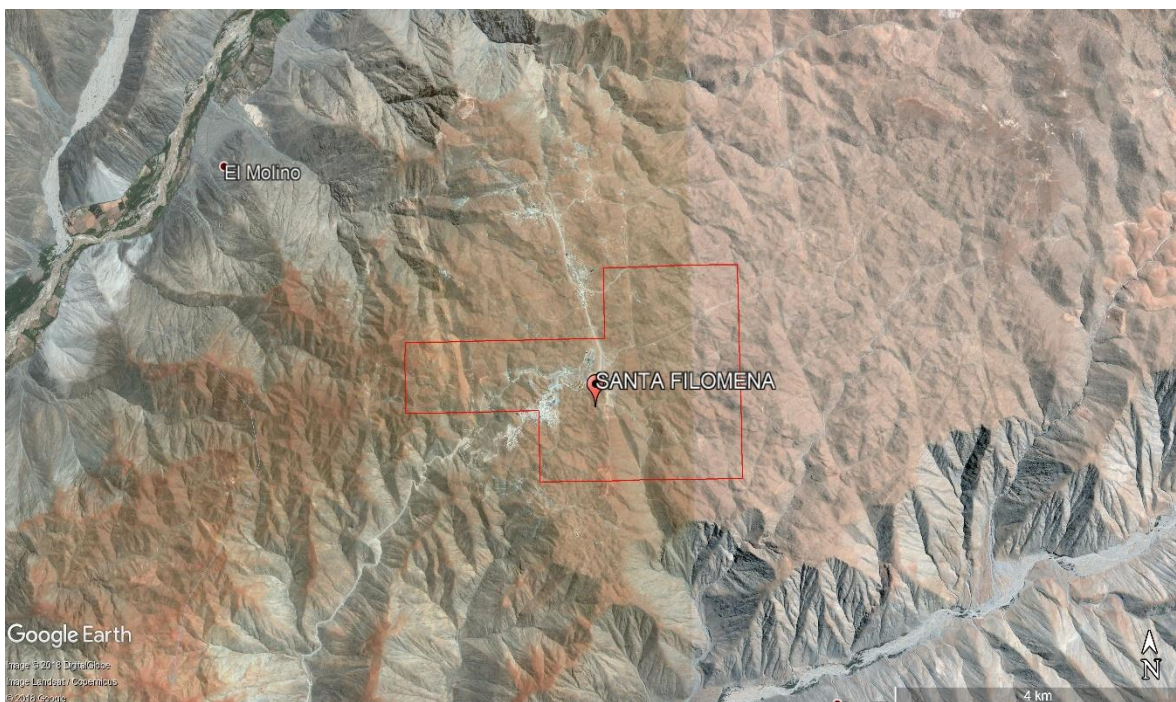
Fuente: INGEMMET.

Anexo 4: Vista satelital de los derechos mineros Santa Filomena y Santa Filomena II



Fuente: *Google Earth - Elaboración Propia.*

Anexo 5: Vista Satelital de la delimitación del derecho minero Santa Filomena



Fuente: *Google Earth - Elaboración Propia.*

Anexo 6: Vista Satelital de la delimitación del derecho minero Santa Filomena II



Fuente: *Google Earth - Elaboración Propia.*

Anexo 7: Soluciones al 10% de NaCN para hallar la concentración practica en la Planta de Beneficio Santa Filomena II



Fuente: *Foto Propia.*

Anexo 8: Pruebas metalúrgicas de Cianuración con agitadores mecánicos en el laboratorio metalúrgico de la Planta de Beneficio Santa Filomena II



Fuente: *Foto Propia.*