



UNIVERSIDAD
NACIONAL
AUTÓNOMA DE
NICARAGUA,
MANAGUA
UNAN - MANAGUA

RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CARRERA QUÍMICA INDUSTRIAL

**SEMINARIO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
LICENCIADAS EN QUÍMICA INDUSTRIAL.**

TÍTULO:

Optimización del proceso de recuperación de oro, a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales, en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020.

Autores.

Br. Bonilla Paredes Hazel Walkiria
Br. Martínez Blandón Adriana María

Tutor:

Msc. Elvin Guzmán

Asesor:

Lic. Jorge Esquivel

Managua-Nicaragua, 14 de enero 2022

TITULO:

Optimización del proceso de recuperación de oro, a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales, en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Dedicatoria

Dedicada a Dios por brindarme el privilegio de poder cumplir uno de mis sueños, al ser que amo y que sin ella no sería posible, mi madre: por ser ejemplo de lucha y enseñarme a enfrentar con fe y paciencia los problemas, a mí por la perseverancia durante todos estos años.

Hazel Walkiria Bonilla Paredes

Esta tesis se la dedico primeramente a DIOS, ya que es quien me concedió el privilegio de la vida y me permitió llegar a este momento. Gracias por las pruebas que me hacen crecer como persona y me permiten dar lo mejor de mí, pero lo mejor de todo me ha permitido compartir más tiempo para pasar junto a mi papá, todo este trayecto ha sido un aprendizaje que me ha acercado más a ti.

A mis padres Rigoberto y Angela que con duro esfuerzo y sacrificio nos han vestido y brindado alimentos, dándome fuerzas para salir adelante, mis hermanos Marco y Annaiz porque me han brindado el apoyo necesario para terminar mis estudios, mi abuelita Angelita y mi tía Judith que han sido mis otras madres, mi compañera Walkiria que se ha quedado conmigo hasta el final con tantas dificultades.

A todos ellos gracias por su amor y bondad.

Y por último a mí misma, por continuar hasta el final.

Adriana María Martínez Blandón

Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme fuerza y sabiduría para culminar esta importante etapa de mi vida, por ser la luz que ilumino mi camino y me acompaño aun en los momentos que dudé y flaqueé en mi objetivo.

Gracias a mi madre por su paciencia, consejos y apoyo incondicional, siendo el pilar fundamental durante toda mi vida, gracias por formarme como la persona que ahora soy usted ha sido la fuerza para seguir adelante y quiero que siempre se sienta orgullosa de mí.

A cada uno de los docentes que formaron parte de mi formación brindándome los conocimientos necesarios para ser una profesional digna de la UNAN-MANAGUA.

A nuestro tutor Msc. Elvin Guzmán y al Lic. Jorge Esquivel nuestro asesor metodológico, por la confianza y apoyo otorgado por compartirnos sus conocimientos y el valioso tiempo dedicado a cada revisión realizada y así poder culminar con tan anhelada meta.

Al PhD. Frank Medrano, Msc. Marlon Díaz, Msc. José Luis Prado, PhD. Jorge Pitty por brindarnos su apoyo, guía e información cuando lo requerimos, a los docentes Msc. Harry William Pérez y Msc. Octavio Salgado por permitirnos espacio en sus oficinas para trabajar.

A Emir Cerda coordinador del plantel Santa Isabel, a sus trabajadores quienes nos transmitieron información necesaria para esta investigación especialmente a Byron Treminio, Juan López, hermanos Rayos, Kelvin Núñez, entre otros.

A mis amigos Gustavo Corea y Pablo Morales, quienes no me negaron su apoyo y amistad cuando los necesite durante todos estos años. A mi compañera de trabajo Adriana, por perseverar a mi lado en este camino a pesar de los tropiezos y dificultades, ¡Lo logramos!

Hazel Walkiria Bonilla Paredes

Agradecimiento

A lo largo de la investigación, durante su desarrollo y en el momento de la sustentación no he estado sola, hay todo un equipo de profesionales, como lo son MSc. Elvin Guzmán, Lic. Jorge Esquivel, MSc. José Luis Prado.

También nos han brindado su apoyo PhD. Frank Medrano, MSc. Marlon Díaz, PhD. Jorge Pitty y por brindarnos un lugar de estudio a MSc. Harry William Pérez y MSc. Octavio Salgado.

Adriana María Martínez Blandón



2022 "Vamos por más victorias educativas"
CARTA AVAL DEL ASESOR METODOLÓGICO

Managua, 11 de enero 2022

MSc. Sara Negaresh
Directora
Departamento de Química
UNAN-Managua
Su despacho

Estimada MSC. Negaresh:

Por este medio hago constar que el presente seminario de graduación titulado "*Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020*", ha sido realizado por las bachilleras **Hazel Walkiria Bonilla Paredes y Adriana María Martínez Blandón** bajo la asesoría metodológica de mi persona **MSc. Elvin José Guzmán Jarquín**.

En mi facultad doy fe, que las bachilleras han cumplido con todas las disposiciones y requisitos académicos en cuanto a la elaboración del presente estudio de modalidad de graduación para optar al título de Licenciada en Química Industrial, además declaro la autenticidad de la información reflejada en el documento.

Saludos cordiales,

MSc. Elvin José Guzmán Jarquín
Departamento de Química UNAN-Managua

Resumen

En el plantel Santa Isabel ubicada en la ciudad de Matagalpa- Nicaragua, desempeña 2 etapas del proceso de recuperación y extracción de oro, como lo son, amalgamación en deslamador con mercurio y lixiviación en pilas con cianuro de sodio a fin de recuperar oro en esta semi-industria minera, enfocada en la extracción selectiva de minerales en el cual obtienen un beneficio económico, a su vez se describen las causas que provocan perdidas de mercurio y la toxicidad de este, continuamente se describe el tratamiento realizado a las colas de amalgamación previo a la etapa de lixiviación con cianuro de sodio y adsorción con carbón activado, que presenta una duración aproximada de 7 a 10 días llegando así, a la descripción de desorción y refinamiento que realiza el plantel, presentadas por medio de un diagrama, llevando a la optimización de variables en ambas etapas del proceso de recuperación y extracción de oro, donde se realizó el método observacional y participativo en las instalaciones del plantel gracias a las visitas realizadas, dando paso a la identificación de variables, donde la concentración de cianuro en la solución lixivante fue una de las más notables dando como resultado para las concentraciones de 500 – 1000pmm se necesitan un intervalo de las cantidades de 16,86 – 33,72 libras de cianuro de sodio, como consiguiente llevándonos establecer puntos de muestreo en ambas etapas para la identificación en donde el mineral no ha podido ser recuperado adecuadamente, haciendo uso de la técnica ICP-OES que nos puede generar datos confiables al momento de alimentación y efluentes de nuestro análisis de interés, continuamente haciendo uso de ecuaciones de balance de materia de extracción de minerales, logrando obtener una recuperación del 28% para la etapa de amalgamación y un 57% para la etapa de lixiviación, dejándonos aun con resultados aun no esperados, donde se hace hincapiés a realizar más análisis de muestras mencionadas en las recomendaciones de dicha investigación.

Índice

CAPITULO I.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	5
CAPITULO II.....	6
2.1. Marco teórico.....	7
2.1.1. Minería.....	7
2.1.2. Trituración.....	7
2.1.3. Molienda.....	8
2.1.4. Amalgamación.....	8
2.1.5. Generalidades del oro.....	10
2.1.6. Cianuro de sodio en la recuperación de oro.....	11
2.1.7. Lixiviación.....	12
2.1.8. Carbón activado.....	13
2.1.9. Desorción o elución del oro.....	15
2.1.10. Método Merrill-Crowe.....	16
2.1.11. Refinación del oro.....	17
2.1.12. Procesos de precipitación.....	19
2.1.13. Fundición.....	20
2.1.14. Espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).....	21

2.2. Antecedentes	23
2.3. Preguntas directrices	25
CAPITULO III.....	26
3.1. Diseño Metodológico.....	27
3.1.1. Descripción del ámbito de estudio y tecnológico.	27
3.1.2. Tipo de estudio.....	29
3.1.3. Población y muestra.....	29
3.2. Identificación de variables	29
3.2.1. Variables Dependientes.	29
3.2.2. Variables Independientes	29
3.3. Material y método	30
3.3.1. Materiales para recolectar la información.....	30
3.3.2. Materiales para procesar la información.....	30
3.3.3. Método	31
CAPITULO IV	42
4.1. Análisis de resultados	43
4.1.1. Clasificación de las etapas que forman parte del proceso de extracción y recuperación de oro en el plantel Santa Isabel.	43
4.1.2. Identificación de las variables de operación a controlar en el proceso de amalgamación y etapa de lixiviación en pilas, para el procesamiento de 12 toneladas de material.	47
4.1.3. Puntos de muestreo	50
4.1.4. Método ICP-OES	50
4.1.5. Cuantificación de los porcentajes de recuperación de oro	50
4.1.6. Situación de seguridad e higiene ocupacional y ambiental en el plantel Santa Isabel.	53
CAPITULO V.....	54
5.1. Conclusiones	55

5.2. Recomendaciones	56
5.3 Bibliografía	58
ANEXOS.....	1
Anexo 1	2
Etapa de Amalgamación	2
Anexo 2.....	5
Etapa de Lixiviación	5

Índice de Tablas

TABLA 1 CONDICIONES DE MOLIENDA (MOLINO DE BOLAS)	31
TABLA 2. CONDICIONES DE AMALGAMACIÓN	32
TABLA 3.CONDICIONES DE AGLOMERACIÓN	32
TABLA 4. CONDICIONES DE OPERACIÓN EN LAS ETAPAS DE LIXIVIACIÓN- ADSORCIÓN	33
TABLA 5. CONDICIONES DE OPERACIÓN EN LA ETAPA DE DESORCIÓN	33
TABLA 6. CONDICIONES DE OPERACIÓN EN LA ETAPA DE CEMENTACIÓN	34
TABLA 7. CONDICIONES EN LA ETAPA DE REFINAMIENTO Y FUNDICIÓN	35
TABLA 8. LONGITUDES DE ONDA PRIMARIAS	39
TABLA 9. PARA EL ORO SE DEBE PREPARAR UN RANGO DE TRABAJO (CURVA DE CALIBRACIÓN) DESCRITO A COMO SIGUE PARA MUESTRAS SOLIDAS:.....	40
TABLA 10. PARA EL ORO SE DEBE PREPARAR UN RANGO DE TRABAJO (CURVA DE CALIBRACIÓN DESCRITO A COMO SIGUE PARA MUESTRAS LIQUIDAS:	40
TABLA 11. DATOS OBTENIDOS DE MUESTRAS SÓLIDAS.....	51
TABLA 12. DATOS OBTENIDOS DE MUESTRAS LÍQUIDAS.....	51

Índice de Figuras

FIGURA 1 MAPA DE LÍMITES DEPARTAMENTALES	27
FIGURA 2 PLANTA DE LOCALIZACIÓN.....	28
FIGURA 3 : REPRESENTACIÓN DE PUNTOS A COLECTAR MUESTRAS	36
FIGURA 4 : DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO POR EL MÉTODO DE AMALGAMACIÓN EN DESLAMADOR.	43
FIGURA 5 : DIAGRAMA DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN EN PILAS CON NACN	44
FIGURA 6 : DIAGRAMA DEL FLUJO DE LA ETAPA DE DESORCIÓN Y RECUPERACIÓN DE ORO CON CARBÓN ACTIVADO	45
FIGURA 7 : DIAGRAMA DEL FLUJO DE LA ETAPA DE REFINAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO	46

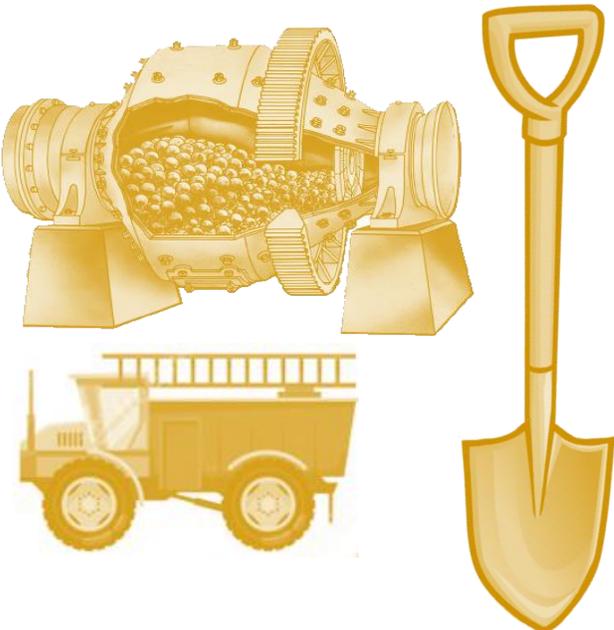
Índice de Fotografías

FOTO 1: TRITURADORA DE MANDIBULA.....	2
FOTO 2: MOLINO DE BOLAS.....	2
FOTO 3: DESLAMADOR	3
FOTO 4: DESLAMADOR FUNCIONANDO.....	3
FOTO 5: DECENTASE.....	4
FOTO 6: PANEIO.....	4
FOTO 7: RESOCADO	4
FOTO 8: AMALGAMA.....	5
FOTO 9: COLAS DE AMALGAMACIÓN.....	5
FOTO 10: SECADO DE MATERIAL	6
FOTO 11: AGLOMERACIÓN.....	6
FOTO 12: CARGADO	6
FOTO 13: CURADO	7
FOTO 14: INSTALACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PASÓ 1	7
FOTO 15: INSTALACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PASÓ 2	7
FOTO 16: INSTALACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PASO 3	8
FOTO 17: INSTALACIÓN DEL CARBÓN ACTIVADO PASO 4	8

FOTO 18: PILA DE LIXIVIACIÓN Y CARBÓN ACTIVADO	9
FOTO 19: TANQUE DE DESORCIÓN	9
FOTO 20: FILTRADO	10
FOTO 21: ADICIÓN DE PB	10
FOTO 22: REACCIÓN.....	10
FOTO 23: REACCIÓN CON HCL	11
FOTO 24: DECANTACIÓN	11
FOTO 25: RECUPERACIÓN DE ORO POR FILTRACIÓN.....	11
FOTO 26: RECUPERACIÓN DE PLATA CON HCL PARA OBTENERLA SOLIDA.....	11
FOTO 27: FUNDICIÓN CON BÓRAX.....	12
FOTO 28: FUNDICIÓN	12
FOTO 29: PESAJE	12



CAPITULO I



1.1. Introducción

Si bien es cierto, la minería en Nicaragua es una fuente económica de gran importancia para quienes se dedican a la explotación minera, en especial para los habitantes en las zonas del norte y centro del país. Cabe destacar que, a nivel artesanal, los procesos convencionales se limitan a la extracción y recuperación de oro por las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, empleando soluciones de cianuro de sodio, siendo estos los más comunes.

Es por ello que, en Nicaragua, como parte de la minería artesanal del oro, el cual, es extraído por el proceso de amalgamación, que consiste en la utilización de molinos de bola, rastras o deslamador haciendo uso del mercurio, el cual se encarga de separar y extraer el oro formando la amalgama, procediendo luego a la separación del oro y el mercurio. Sin embargo, los sedimentos generados después de este proceso pueden contener un porcentaje de oro significativo, que no pudo ser extraído por amalgamación, los cuales son llevados a la etapa de lixiviación en pilas, que consiste en separar los minerales de oro y plata aplicando una solución de cianuro de sodio que se encarga de la disolución de estos.

Por otro lado, la lixiviación en bateas, “Vat leaching”, que en nuestro país comúnmente se le conoce como lixiviación en pilas, consiste en la recirculación de una solución a través de un lecho mineral, procedente principalmente de relaves del proceso de amalgamación, que, en conjunto al uso de carbón activado, permite la adsorción de los complejos formados por el oro y cianuro. Luego de ello, las etapas de desorción y refinamiento, permiten obtener un metal de alta pureza, sin embargo, ya que es un proceso artesanal, tal pureza dependerá del uso de reactivos, además de ciertos factores que no son controlados y pueden afectar la recuperación y pureza del metal de interés.

Por lo anterior, esta investigación documental se realizó, con el propósito de ser una base útil para futuras investigaciones encaminadas en la recuperación de minerales valiosos como el oro y la plata.

Esta investigación documental se realizó a partir de la revisión bibliográfica disponible como libros, tesis, revistas científicas, artículos, con el propósito de generar un insumo útil para futuras investigaciones encaminadas en la recuperación de minerales valiosos como el oro y la plata.

Estudiar y comprender el mundo que nos rodea debería de ser una de las actividades más apremiantes y satisfactorias.

1.2. Planteamiento del problema

Siendo que, en otros países se ha desalentado el uso de mercurio líquido, ya que se genera impactos ambientales negativos, además de daños a la salud de los mineros artesanales, pese a esto en Nicaragua, es el agente quelante más comúnmente utilizado, de hecho, los mineros artesanales desconocen las consecuencias de la inadecuada manipulación y exposiciones prolongadas al mismo, esto genera una gran preocupación pues con el paso del tiempo, provoca afectaciones a la salud.

Cabe destacar que, en distintos departamentos del país, podemos encontrar planteles artesanales y semi-industriales, que se dedican a la extracción y recuperación de oro. No obstante; desconocen la importancia de controlar ciertos parámetros que son fundamentales para tener un mejor rendimiento en el proceso de extracción y recuperación de oro, de igual forma, estos planteles no cuentan con estudios o evaluaciones previas que reflejen los porcentajes de oro contenido en cada una de las etapas del proceso, ni la recuperación total de acuerdo con sus sistemas de operación, ni las pérdidas de oro, debido a una falta de control operacional en las distintas etapas del proceso.

En base a lo anteriormente expuesto se ha planteado la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué parámetros operacionales es necesario controlar en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas para optimizar el porcentaje de recuperación de oro?

1.3. Justificación

De acuerdo con cifras obtenidas por el Banco Central de Nicaragua del año 2018, la industria minera del oro, presento un incremento del 63% aproximadamente, en el período comprendido entre 2010-2018, provocando un impacto positivo en la economía nacional, logrando ubicarse en el año 2013, como el principal producto de exportación, contando con E.E.U.U y Canadá como principales mercados. Una de las razones de su creciente ritmo es el aumento de la actividad minera, sobre todo la artesanal y semi-industrial, además de la variada demanda y alto valor de minerales que se obtienen.

Por lo anterior, en este estudio, se enfatiza la necesidad de clasificar las diferentes etapas del proceso de extracción y recuperación de oro, en el plantel Santa Isabel para posteriormente, establecer un control de parámetros que garanticen una mayor recuperación de oro e implementar un proceso más amigable con el medio ambiente, garantizando así, la seguridad de sus trabajadores, a fin de, fomentar la cultura de prevención de riesgos laborales

Por ende, es necesario cumplir con una PML (producción más limpia) dirigida a, crear una buena gestión ambiental en el plantel Santa Isabel, que hoy en día, tiene como disposición final; el uso y comercialización de tierra cianurada, para rellenar terrenos y/o construir nuevas pilas artesanales. La importancia de esta investigación, radica en la implementación del control de parámetros operacionales, como la cantidad a usar de Hg necesaria para el proceso, el pH de la solución en pilas, concentración de cianuro de sodio, tiempo medio de residencia, de manera que se brinde una solución viable, al principal problema que presenta el plantel Santa Isabel, generando interés para realizar futuras investigaciones.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General.

Optimizar el proceso de extracción de oro en el plantel Santa Isabel a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Clasificar a partir del trabajo de campo, las operaciones unitarias que se realizan en el proceso de extracción y recuperación de oro, representándolas mediante un diagrama de bloque de procesos
- Identificar las variables de operación, que se necesitan controlar en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, en las cuales se lleva a cabo la extracción de oro, implementando dichos controles para el procesamiento de 12 toneladas de material.
- Establecer puntos de muestreo, que nos permitan observar la variabilidad de la concentración de oro en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, así proponer, una metodología de cálculo, para la determinación de los porcentajes de recuperación en los procesos de amalgamación y lixiviación en pilas.
- Determinar la concentración de oro mediante la técnica de análisis ICP-OES, en las corrientes de alimentación y efluente en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas
- Cuantificar los porcentajes de recuperación de oro, a partir de los datos obtenidos mediante la técnica de análisis ICP-OES, haciendo uso de ecuaciones de balance de materia de extracción de minerales
- Indagar sobre la situación de seguridad e higiene ocupacional y ambiental en el plantel Santa Isabel.



CAPITULO II



2.1. Marco teórico

2.1.1. Minería.

Se define como una actividad económica del sector primario representada por la explotación o extracción de los minerales que se han acumulado en el suelo y subsuelo en forma de yacimientos (Jirón Mena, 2016).

2.1.1.1. Tipos de minería.

Estas varían según el tipo de mineral que se extrae, la forma y características del yacimiento y las propiedades de las rocas en donde se encuentre, estas son la minería por dragado, minería por pozos de perforación, minería subterránea y minería superficial la cual se divide en minas a cielo abierto, canteras y minas de placer siendo en esta última donde se extraen los metales preciosos (Monreal Saavedra & Hernández Rábago, 2015).

2.1.1.2. Riesgos de la minería para el ser humano.

Para la organización internacional del trabajo (OIT), en las operaciones de minería aurífera artesanal existen cuatro principales riesgos para la salud (Delgado Pacheco, 2019):

- Exposición al polvo
- Exposición al mercurio y otras sustancias químicas
- Exposición al ruido y vibraciones de la maquinaria y equipos
- Efectos del exceso de esfuerzo y del uso de equipo inapropiado

2.1.2. Trituración.

En términos minero es la primera etapa de fragmentación o reducción de tamaño de las rocas, cuyo principal objetivo es la liberación de los minerales útiles a partir de la ganga, haciendo uso de trituradoras primarias robustas y pesadas, que operan siempre en circuito abierto (Barrera Cuervo & Menéndez Álvarez, 2017).

2.1.2.1. Trituradora de mandíbula.

Estos equipos cuentan con dos placas que se abren y cierran, donde una mandíbula es móvil y la otra permanece fija, utilizando como fuerza predominante la compresión aplicándola de forma discontinua entre ambas mandíbulas. De este modo el mineral es comprimido y liberado continuamente dentro de la cámara de trituración hasta que sale por la boca de descarga (Acosta G, 2017).

2.1.3. Molienda.

Se trata de la etapa de fragmentación en la que se logra liberar el mineral para conseguir un producto con una granulometría adecuada a partir de la reducción de tamaño aplicando fuerzas de presión, impacto y abrasión. Dicho proceso se puede realizar en seco o mediante suspensión en agua (Barrera Cuervo & Menéndez Álvarez, 2017); (Salazar Cruz, 2018).

2.1.3.1. Molino de bolas.

Cámaras giratorias de acero de forma cilíndrica, provistas con bolas de hierro o acero hasta su mitad, donde su principal objetivo es la reducción de tamaño gracias a los choques que ocasionan estas bolas al caer desde la altura a la que son levantadas por la rotación. La alimentación llega por un extremo y la descarga se efectúa por el extremo opuesto, dichos molinos pueden operar en seco o húmedo lo cual favorece el manejo y transporte de pulpas, que puede llevarse a cabo con bombas de cañerías (Salinas Yadaicela, 2015).

2.1.3.2. Clasificador helicoidal.

Está compuesto por un tanque inclinado y un tornillo helicoidal armado sobre un eje hueco que es paralelo al fondo del tanque, al cual es alimentada la pulpa del mineral que descarga del molino, donde las partículas gruesas que se sedimentan son arrastradas nuevamente para alimentar el molino y ser remolidos y aquellas partículas que logran mantenerse en suspensión son arrastradas hacia el amalgamador (Coronado Mayta, 2012).

La presencia de agua en esta etapa es de vital importancia ya que permite la clasificación, donde a mayor cantidad de agua mayor asentamiento producto de una densidad baja, provocando que pase poca carga y demasiado fino a la flotación y a menor cantidad de agua menor asentamiento debido a una densidad alta provocando que pase gran cantidad de gruesos a la flotación (Almiron Soncco, 2018).

2.1.4. Amalgamación.

Es el proceso aplicado para la recuperación de oro y plata a partir de la formación de amalgamas, las cuales se forman por el contacto entre mercurio y oro en pulpa con agua, donde el mercurio se encuentra como “perlas” disperso en la pulpa. La amalgama es una mezcla homogénea, que se forma gracias a la afinidad que existe entre el oro y el mercurio, en la que ninguno pierde sus propiedades químicas, por esta razón podemos decir que es una fusión sólida que se puede separar por medios físicos (Delgado Pacheco, 2019); (PNUMA, 2012).

2.1.4.1. Mercurio.

Es un metal pesado que se da de manera natural en el medio ambiente y existe en una gran variedad de formas, en su estado elemental es un metal blanco plateado brillante que a temperatura ambiente se mantiene en su forma líquida, siendo insoluble en agua y se evapora parcialmente formando vapores de mercurio, incoloros e inodoros. Utilizado en múltiples y variadas aplicaciones entre ellas la metalurgia del oro y la plata (Español Cano, 2001); (González Jaimes, 2016).

2.1.4.2. Pérdidas de mercurio.

Durante el proceso de amalgamación se producen pérdidas de mercurio debido principalmente a:

- La calidad del mercurio empleado
- El contenido de sulfuros en el mineral
- La cantidad de arcilla presente en el mineral
- La duración del proceso de amalgamación

Sin embargo, no existen datos reales ni exactos de las pérdidas de mercurio durante el proceso de amalgamación (Tovar Jumpa, E. Sánchez, & García Alvarez, 2005).

2.1.4.3. Toxicidad del mercurio.

El mercurio muestra una alta afinidad con la biota animal y al entrar en contacto con microorganismos se transforma en metil-mercurio que es altamente tóxico; además no solo es altamente bio acumulable, sino que forma parte de una cadena trófica; las especies mayores como el hombre pueden no solo acumularlo sino bio magnificarlo en sus organismos (PNUMA, 2012).

Debido a la exposición prolongada a vapores de mercurio se tienen efectos más graves que cuando la exposición es una sola vez, ingresando a la sangre por los alimentos siendo extremadamente peligroso especialmente para mujeres embarazadas y sus hijos neonatos, contaminando también la leche materna (Londoña Soria, 2007).

El 80% del mercurio inhalado es absorbido por los pulmones, produciendo irritación para luego pasar a los riñones, solo el 50% del mercurio absorbido es eliminado del organismo en un lapso de 2 meses eliminándose comúnmente en la orina de ahí en adelante la reducción se hace más lenta. La exposición prolongada a bajas concentraciones (caso de los mineros artesanales) producen una serie de trastornos que varían mucho de una persona a otra (Tovar Jumpa, E. Sánchez, & García Alvarez, 2005).

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

A partir de datos obtenidos en humanos, animales e in vitro, la Agencia Internacional de Investigación del cáncer (IARC) y la EPA clasificaron el metilmercurio como un posible carcinógeno humano (EPA Clase C) y en estudios realizados encontraron que la exposición al mercurio está asociada a la leucemia aguda, sin embargo; las conclusiones son limitadas debido que la población estudiada fue muy pequeña (IPEN, 2007).

2.1.4.4. Factores que afectan la amalgamación.

Hay resultados insatisfactorios obtenidos en este proceso debido a la influencia de factores negativos de diferente índole mencionados a continuación (Cuentas Alvarado & Velarde Ochoa , 2019).

- El mercurio es impuro
- Oro enclavado en sulfuros (pirita aurífera)
- Falta de contacto adecuado entre el oro y el mercurio
- Pulpa contaminada con lubricantes o grasa causando la flotación del oro
- Oro demasiado fino de comportamiento coloidal o cuando se presente en laminillas muy delgadas que sobrenadan

2.1.5. Generalidades del oro.

El oro (Au) es un elemento químico con número atómico 79, perteneciente al grupo IB de la tabla periódica, localizado en el conjunto de los denominados metales de transición interna; con un color característico amarillo brillante, denso, maleable, se encuentra generalmente en forma de mineral a diferencia de la mayoría de los otros elementos, lo cual permite una extracción selectiva, siendo su principal impureza la plata (Alejandro Chicaiza, 2015).

2.1.5.1. Propiedades químicas.

- Es el más “no reactivo” de todos los metales
- Se combina con facilidad con el mercurio formando una amalgama
- El ácido sulfúrico lo ataca por encima de los 300°C
- Es inerte en aire y agua a temperatura y presión normal
- Soluble en agua regia o en otras mezclas que desprenden cloro
- El oro nunca reacciona con oxígeno o sea difícilmente se oxidará o empañará

2.1.5.2. Propiedades mecánicas.

Es considerado uno de los metales más dúctiles con la capacidad de laminar hasta obtener hojas (panes de oro) con un espesor de 0,1 μm , con un gramo se puede conseguir un hilo de 2 km de longitud, sin embargo; tiene una escasa tenacidad (Alejandro Chicaiza, 2015).

2.1.5.3. Aleaciones del oro.

Generalmente forma aleaciones con la plata para reducir la intensidad de su color amarillo formando una aleación verdosa y con el cobre para darle dureza y un color rojo esto en el área de la joyería, pero muchos otros metales pueden ser utilizados. La triple aleación de oro, cobre y plata es muy maleable y su color es muy semejante al del oro fino, aquellas aleaciones que contienen platino o paladio forman el oro blanco, a menudo usado con piedras preciosas, siendo usualmente más duro y durable que otras aleaciones (Alejandro Chicaiza, 2015).

2.1.6. Cianuro de sodio en la recuperación de oro.

Es un sólido blanco, muy venenoso y con un olor fuerte a almendras amargas, su uso en la minería es para la recuperación de metales preciosos, este reacciona violentamente con el agua o cualquier solución acida desprendiendo HCN, el cual es un veneno muy tóxico que puede ser letal sino se toman las precauciones necesarias. El oro tiene un alto valor adjudicado debido a su resistencia al ataque de la mayoría de los químicos, sin embargo; una solución que contiene cianuro disuelve el metal precioso (Cahuana Hanco, 2017); (Flores Mamani, 2019).

2.1.6.1. Estabilidad termodinámica del cianuro de sodio.

En los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos pueden estar presentes tres tipos principales de compuestos de cianuro: cianuro libre, cianuro débilmente acomplejado y cianuro fuertemente acomplejado juntos los tres compuestos de cianuro constituyen el “cianuro total” de gran importancia porque se consideran como los cianuros más tóxicos (Logsdon, Hagelstein, & Mudder, 2001).

En la cianuración se requiere de condiciones básicas y concentraciones de cianuro libre relativamente diluidas a $\text{pH} < 10$ el cianuro se hidroliza ocasionando mayor consumo por formación de gas HCN, a $\text{pH} > 12$ la velocidad de cianuración se inhibe por lo que se recomienda un pH entre 10,5 – 11,5. Para el cianuro libre en solución la concentración recomendada es de 0,05 – 0,1 % en peso, ya que a concentraciones muy bajas de NaCN menores a 0,001% el oro no se disuelve y a

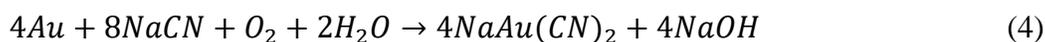
Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

concentraciones por encima de 0,25% provocan la pasivación del oro, debido a las reacciones colaterales con otros elementos que forman películas sobre las partículas del metal (Canales Juarez, 2013).

2.1.7. Lixiviación.

Para la minería, es el proceso que consiste en la transferencia de materia donde un solvente líquido pasa por un mineral, para la disolución del metal de interés hacia la fase líquida. Se utilizan lixiviantes con los cuales las soluciones pueden ser ácidas, básicas y a su vez sales, donde su elección va en dependencia de cuál sea el más adecuado para el mineral en particular que se va a lixiviar (Canales Juarez, 2013); (Lagos Lagos, 2017).

Cuando el oro es sometido a un proceso de lixiviación la disolución es regida por los principios electroquímicos de la corrosión, donde se da la formación de dos medias celdas de reacción (catódica y anódica) y a partir de la reducción del oxígeno sobre la superficie metálica en la zona catódica va acompañada por la oxidación del oro en la zona anódica de acuerdo con las siguientes reacciones (Canales Juarez, 2013).



Siendo la reacción (4) la ecuación fundamental de la cianuración según Elsner.

2.1.7.1. Tipos de lixiviación.

2.1.7.1.1. Lixiviación por agitación.

Este método consiste en mantener en movimiento el mineral y la disolución de ataque, teniendo en cuenta ciertos parámetros como el tamaño de partícula, deben ser minerales de alta ley o concentrados para garantizar recuperaciones del metal de interés superiores al 95%, siendo este método a presión atmosférica el más utilizado a nivel industrial, la agitación puede ser por agitación neumática o por agitación mecánica (Benavente, 2010); (Canales Juarez, 2013).

2.1.7.1.2. Lixiviación en bateas o percolación.

Se caracteriza por el movimiento relativo entre el sólido y la disolución de lixiviación, donde el sólido permanece estático y la disolución los atraviesa (percola) conocida también como lixiviación estática que se puede realizar de formas diferentes ya sea lixiviación in situ, lixiviación en montones o lixiviación en estanque “vat leaching” (Bateas) (Canales Juarez, 2013).

2.1.7.2. Lixiviación “Vat leaching” bateas.

Es un método fácil y eficaz que se da por medio del acumulamiento de mineral en una batea, pozas de concreto o mantas transportables donde se agrega la solución cianurante por inundación que se recircula en sentido ascendente o descendente aprovechando el fondo filtrante, aplicado mayormente a los relaves de amalgamación (Benavente, 2010).

El mineral se mantiene estático a diferencia de la mayoría de los métodos que operan de esta forma donde el material se encuentra en movimiento. Consta de varias etapas las cuales son trituración, molienda, aglomeración, curado, riego, adsorción y su posterior desorción, dicho proceso puede durar de 2 – 14 días con una recuperación de hasta el 90% (Mamani Quispe, 2015).

Este proceso tiene la ventaja de mojar más eficientemente toda la superficie del mineral a ser lixiviado, obteniendo mayor eficiencia en la disolución se puede destacar como otra ventaja a nivel de operación que a diferencia de la lixiviación en montones, se descartan los canales preferenciales de la solución y las zonas muertas (zonas fuera de riego), ya que el mineral está en contacto con la solución (Gutiérrez García, 2011).

2.1.8. Carbón activado.

Es un material carbonoso poroso producido por medio de la reacción de un carbonizado con gases o la adición de químicos con el objetivo de incrementar sus propiedades de adsorción, utilizado en el tratamiento de minerales y relaves para recuperar el oro contenido en soluciones cianuradas donde este se encuentra en forma iónica constituido por el cianuro áurico $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, se utiliza el carbón activado adsorbente granular, usualmente del tamaño 6x12 mallas, que es elaborado a partir de la cáscara de coco principalmente (Cárdenas Oré & Espinal Maque, 2016); (Chirinos Morales, 1993).

2.1.8.1. Adsorción con carbón activado.

Es el proceso por el cual un átomo o una molécula se adhieren a la superficie de un sólido debido a la presencia de fuerzas de atracción intermoleculares en sitios específicos del sólido denominados centros activos (Cárdenas Oré & Espinal Maque, 2016).

La velocidad de adsorción depende de la ley de oro en solución, del tiempo de adsorción y de la carga del carbón donde a partir de un desbalance de fuerzas sobre los átomos de carbón que constituyen las paredes de los poros es que ocurre la adsorción y la rectificación de este balance se logra por medio de las moléculas que son adsorbidas de una fase gaseosa o acuosa atraídas y sostenidas a la superficie (Chirinos Morales, 1993); (Yampasi Caceres, 2017).

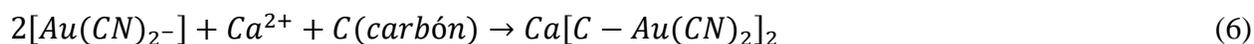
El mecanismo de adsorción en carbón de los metales preciosos en solución de cianuro no ha sido plenamente establecido, sin embargo; para el caso del oro algunas de las características más importantes que se conocen son las siguientes:

- La adsorción disminuye al aumentar la temperatura
- La adsorción de oro se incrementa con el aumento de pH
- La adsorción es un proceso reversible con mayor velocidad de desorción
- Complejos neutros de cianuro como $Hg(CN)_2$, se adsorben fuertemente al carbón activado (Gutiérrez García, 2011).

El mecanismo de adsorción se ilustra por la ecuación



Mecanismo de adsorción del Au con carbón activado



2.1.8.2. Técnicas de adsorción.

La tecnología del uso del carbón comprende 3 técnicas de aplicación y son:

2.1.8.2.1. Carbón en pulpa (CIP).

El carbón es mantenido en suspensión en la pulpa gracias a la agitación mecánica y suministro de aire, la pulpa avanza de un tanque hacia el siguiente por gravedad o un puente aéreo y el carbón es retenido por un tamiz (Cárdenas Oré & Espinal Maque, 2016).

2.1.8.2.2. Carbón en columna (CIC).

Generado por las operaciones de lixiviación en pilas de minerales de baja ley de oro y libres de sólidos suspendidos. La solución rica es recirculada a través de columnas empaquetadas con carbón activado en contracorriente (Cárdenas Oré & Espinal Maque, 2016).

2.1.8.2.3. Carbón en lixiviación (CIL).

Es una modificación del proceso de carbón en pulpa, el oro lixiviado con cianuro y la adsorción de los iones $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ sobre el carbón activado están simultáneamente acompañados en el mismo tanque (Cárdenas Oré & Espinal Maque, 2016).

2.1.9. Desorción o elución del oro.

Fenómeno de transferencia de masa inverso a la adsorción, es decir, la sustancia que ha sido adsorbida en el carbón es extraída por medio de una solución que atraviesa el lecho de carbón cargado en un reactor especialmente construido para este proceso produciendo un volumen de solución con alta concentración en oro, adecuada para su posterior recuperación permitiendo al carbón ser reciclado y reutilizado en el proceso de adsorción (Garcia Ranilla, 2018).

2.1.9.1. Procedimiento Zadra.

Se realiza con una solución de 10 g/L de soda caustica (NaOH al 1%), 1-2 g/L de cianuro de sodio (NaCN al 0,1 – 0,2 %), a presión atmosférica lo cual limita la temperatura a un valor bajo el punto de ebullición a 95°C, requiriendo de hasta 60 horas de operación (Garcia Ranilla, 2018).

2.1.9.2. Procedimiento Zadra modificado con presión.

Se mantienen los reactivos del proceso Zadra original, pero hay un aumento de la presión por sobre la atmosférica a unas 5 atm equivalente a unos 75 psi o 500 kpa lográndose también aumentar la temperatura a unos 130-135°C, obteniendo un proceso de entre 3-5 horas, sin embargo; hay un elevado costo de capital y un manejo más complejo de los reactores (Garcia Ranilla, 2018).

2.1.9.3. Procedimiento Zadra modificado con alcohol.

En esta variante se mantienen los reactivos del proceso Zadra original, pero además se agregan 10-20% de alcohol etílico o isopropílico a 85°C y presión atmosférica obteniendo una operación similar al método con presión en cuanto al tiempo. Sin embargo; se tiene riesgos de incendio al trabajar con alcoholes muy inflamables y con temperaturas relativamente altas (Garcia Ranilla, 2018).

2.1.9.4. Procedimiento Anglo American.

Se usa un pretratamiento o remojo del carbón con una solución fuerte de unos 35-50 g/L de NaCN al 3,5-5% aproximadamente y de 10-20 g/L de NaOH al 1-2% previo a la elusión con agua desionizada a 95°C y presión atmosférica, teniendo una duración de 8-12 horas (García Ranilla, 2018).

2.1.10. Método Merrill-Crowe.

Es una mejora del proceso MacArthur-Forrest en el cual se adiciona el proceso de desoxigenación de la solución a través de un vacío el cual fue propuesto por Crowe, la adición de polvo de zinc en vez de virutas propuestos por Merrill y la adición de sales solubles de plomo (Alejandro Chicaiza, 2015); (Robles Cayllahua, 2019).

La reacción química total del desplazamiento del oro por zinc es:



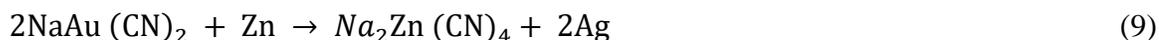
2.1.10.1. Cementación.

Se define como la precipitación de un metal desde una disolución acuosa mediante otro metal, siendo la diferencia de potencial electroquímico que existe entre el elemento a cementar y el agente cementante lo que hace posible esta operación permitiendo que el metal con el potencial de oxidación más positivo pase a la solución y desplazara a un metal con un potencial menos positivo (Alejandro Chicaiza, 2015).

2.1.10.2. Cementación del oro con polvo de zinc.

Proceso que consiste en la separación del oro a partir de una solución cianurada a través del uso de polvo de zinc y acetato de plomo, con el cual se da la formación de un complejo de zinc-plomo eliminando la pasivación del zinc. El uso de polvo de zinc se debe a su reactividad con el cianuro junto con su capacidad de llevar a cabo reacciones de sustitución; considerándose como la mejor opción bajo ciertas condiciones de operación (Muñoz Gandarillas, 2009).

Es de importancia mencionar la presencia de iones en solución, como lo es el plomo que tiene un efecto positivo debido a la formación de una película metálica y creando un par galvánico que activa la superficie del zinc por esta razón se debe añadir cantidades entre 5-10% en peso del zinc. El zinc metálico precipita al oro y la plata de acuerdo con las ecuaciones (8) y (9) descritas por (Alejandro Chicaiza, 2015); (Calcina Abanto, 2019).



2.1.10.3. Factores que afectan la cementación.

- Concentración de Au y/o Ag presente en la solución
- Impurezas presentes en el zinc provocando reacciones paralelas o causar pasivación
- La presencia de oxígeno disuelto ya que su potencial de reducción es superior al de la mayoría de los metales provocando la redisolución en cianuro del oro ya precipitado donde es la temperatura la que determina una menor concentración de oxígeno disuelto en la solución
- El pH debe controlarse en un rango de 10-11,9 debido a la liberación de HCN, bien se puede añadir un agente alcalino para controlar el pH y prevenir la formación de hidróxido de zinc, pasivante de la reacción (Alejandro Chicaiza, 2015); (Muñoz Gandarillas, 2009).

2.1.11. Refinación del oro.

Es un proceso que tiene como fin mejorar los productos obtenidos de los procesos previos para la recuperación de oro principalmente lodos de precipitados de zinc, cátodos cargados, lodos de electrodeposición. Para la recuperación de metales refinados se utilizan dos métodos, los procesos pirometalúrgicos en donde se utiliza calor para separar los metales deseados y los procesos hidrometalúrgicos donde los metales deseados se separan a partir de las diferencias de solubilidad entre las propiedades electroquímicas de los constituyentes presentes en solución acuosa (Marsden & Lain House, 2006); (Ortega Cuadra & Valdivia Gutiérrez, 2014).

Se realiza generalmente a partir del precipitado obtenido en la cementación y consiste en llevar el oro a estado de solución formando el cloruro áurico (AuCl_3) para seguidamente obtenerlo en forma selectiva como cristales. El método más usado es la refinación electrolítica llegando a una pureza de 99,8% aproximadamente (Lazaro Hanco & Abarca Phocco, 2015).

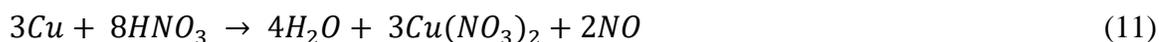
2.1.11.1. Refinación de oro con ácido nítrico.

Precipitados de oro provenientes de la elusión de carbón activado, el ataque químico se realiza para conseguir la disolución parcial del cobre (Cu) y la plata (Ag); produciendo el desprendimiento de

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

vapores nitrosos. El residuo marrón oscuro es el precipitado de oro el cual, dependiendo de su pureza, puede ser lavado, secado y fundido directamente de lo contrario es disuelto con agua regia para lograr su completa purificación (Lazaro Hancco & Abarca Phocco, 2015); (Ortega Cuadra & Valdivia Gutiérrez, 2014).

Las reacciones fundamentales que ocurren con la plata y el cobre son:

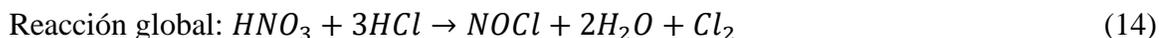
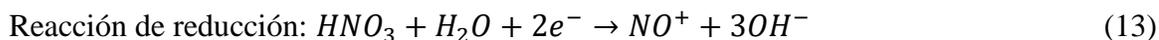
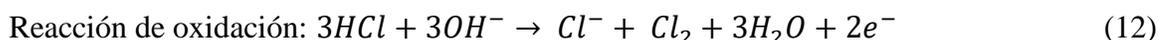


Las soluciones de desecho a partir del ataque químico con ácido nítrico contienen plata disuelta en la forma de nitrato de plata, que es precipitada con cloruro de sodio (NaCl), formando cloruro de plata, una sal insoluble, que posteriormente se aplica el proceso de refinación con ácido clorhídrico para luego fundirlo (Lazaro Hancco & Abarca Phocco, 2015); (Ortega Cuadra & Valdivia Gutiérrez, 2014).

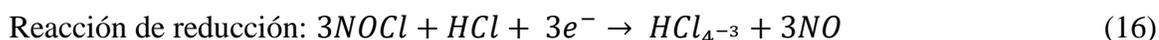
2.1.11.2. Refinación de oro con agua regia.

Su uso está estrictamente limitado a precipitados electrolíticos de muy alto grado, donde la plata no ascienda a más de 10 – 15%, debido a que su presencia en cantidades grandes produce la formación de capas de AgCl sobre la superficie metálica inhibiendo la continuidad del proceso. La disolución del oro (Au), se realiza con agua regia, la cual se prepara a partir de la combinación de un volumen de HNO₃ concentrado y tres volúmenes de HCl concentrado, (Lazaro Hancco & Abarca Phocco, 2015) ; (Ortega Cuadra & Valdivia Gutiérrez, 2014).

Las reacciones de oxidación y reducción que se dan al formar el agua regia son:



La reacción de disolución del oro se produce por la acción del agente oxidante formado, NOCl.



Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020



El óxido nítrico es un gas inestable incoloro que rápidamente se combina con el oxígeno atmosférico, formando vapores de dióxido de nitrógeno (NO₂), de color pardo rojizo, también llamado peróxido de nitrógeno:



Siendo la reacción global:



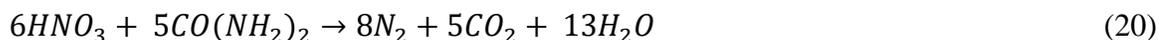
2.1.12. Procesos de precipitación.

El oro en solución en la forma de AuCl₃ es precipitado separándolo de las impurezas que pueden estar acompañándolo; se puede utilizar uno de los siguientes métodos, eligiéndose el más favorable en términos económicos y técnicos (Lazaro Hancco & Abarca Phocco, 2015):

- Bisulfito de sodio (NaHSO₃)
- Cloruro ferroso (FeCl₂)
- Acido sulfuroso (H₂SO₃)
- Nitrito de sodio (NaNO₂)
- Acido oxálico (C₂H₂O₄)
- Tricloruro de titanio (TiCl₃)

2.1.12.1. Precipitación con bisulfito de sodio.

Es uno de los métodos más satisfactorios para la precipitación de oro a partir de la disolución con agua regia. Para la eliminación del exceso de HNO₃ se realiza por adición de urea de acuerdo con la siguiente reacción:



Finalmente, la precipitación del oro se logra por la adición de bisulfito de sodio en una proporción superior a la resultante del cálculo estequiométrico:



Los gases en esta etapa es producto de la descomposición de bisulfito de sodio formando NaHSO_4 (Lazaro Hanco & Abarca Phocco, 2015) y (Ortega Cuadra & Valdivia Gutiérrez, 2014).



2.1.13. Fundición.

Es el proceso que tiene como propósito eliminar los metales bases y otras impurezas de los concentrados de alta calidad para producir un lingote de oro y plata que contiene típicamente >95% de metales preciosos. El producto fundido, llamado lingote de oro, es adecuado para venta directa (Marsden & Lain House, 2006).

2.1.13.1. Fundición con fundentes.

El proceso de fundición o fusión se logra calentando el material en presencia de fundentes formadores de residuos por lo que en este caso se adiciona bórax [$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$], el cual reduce el punto de fusión y la viscosidad de la escoria (Marsden & Lain House, 2006). Este proceso se realiza utilizando sopletes durante 20-30 minutos aproximadamente, garantizando la separación completa de impurezas en la escoria, el oro y la plata fundidos forman una aleación que es más pesada que la escoria.

Podemos determinar la eficiencia de la separación a partir de la calidad de la escoria formada medida en términos de los grados de Au y Ag en la escoria, la recuperación de metales básicos y otras impurezas y su respectivo rendimiento va en dependencia de la naturaleza del material aurífero fundido, las propiedades de los fundentes utilizados y las condiciones aplicadas (Marsden & Lain House, 2006).

Una vez que se completa la fundición los metales preciosos se retira y se deja enfriar, la escoria debe ser clara y uniforme, con una coloración gris verdosa que una vez enfriada generalmente pueden ser fundidos nuevamente para recuperar cierto porcentaje de los metales preciosos residuales de lo contrario puede ser triturado y reprocesado en alguna de las etapas del proceso de lo contrario se desecha (Moscoso Gambarini, 2018).

2.1.14. Espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Es una técnica que se basa en la producción y detección de espectros de línea emitidos cuando un elemento químico en forma gaseosa o vapor recibe la energía de un plasma, dicho proceso se conoce como desexcitación de electrones ya que sufren transiciones de niveles fundamentales a niveles excitados y una vez que estos regresan a su estado fundamental emiten la energía absorbida (longitud de onda) (Vanina Llanos, 2019).

Las longitudes de onda en los espectros de línea son específicos de cada elemento emisor y la intensidad de la emisión depende de la concentración del elemento por lo que a partir de una adecuada selección y aislamiento de una línea por medio de un sistema dispersivo, se obtiene información cualitativa y cuantitativa de la composición elemental de la muestra (Jiménez Heinert, Grijalva Endara, & Ponce Solórzano, 2020); (Lagos Orovilla, 2016).

2.1.14.1. Componentes de un ICP-OES.

- Un sistema de introducción de muestras (Bomba peristáltica, cámara de nebulización, nebulizador)
- Una fuente de radiación (plasma y generador de radiofrecuencia)
- Un sistema óptico dispersivo (policromador)
- Un detector
- Procesamiento
- Edición de resultados

En este proceso la muestra es introducida por una bomba peristáltica en estado líquido hacia el nebulizador, donde se genera un aerosol suspendido en argón, el cual es transportado por una corriente de argón hacia el plasma para su desolvatación, vaporización, atomización y/o ionización y excitación de los analitos presentes en la muestra, debido a la alta temperatura de la antorcha. Estos iones y átomos excitados emiten radiaciones características, que son dirigidas hacia el sistema óptico para su debida dispersión y la adecuada separación en sus longitudes de onda es realizada por un espectrómetro y dichas radiaciones son transmitidas hacia el detector, que es el encargado de medir las intensidades de las longitudes de onda, finalizando con el

procesamiento de la información por el sistema informático (Lagos Oroville, 2016); (Capistrán Martínez, 2020).

2.1.14.2. Ventajas de ICP-OES.

- Menor interferencia entre elementos debido a las altas temperaturas
- Se obtienen espectros para la mayoría de los elementos en las mismas condiciones de excitación
- Permite la determinación de no metales como Cl, Br, I y S
- Menor tiempo de análisis (Jiménez Heinert , Grijalva Endara, & Ponce Solórzano, 2020).

2.1.14.3. Desventajas de ICP-OES.

- Mayor costo de adquisición y mantenimiento
- Mayor costo de operación que la espectroscopia de absorción atómica
- Se requiere un pretratamiento de la muestra (Jiménez Heinert , Grijalva Endara, & Ponce Solórzano, 2020)

2.2. Antecedentes

Europa

En 2017, Ginebra-Suiza Artisanal Gold Council (AGC) en colaboración con Asociación Mundial del Mercurio de PNUMA, crean un documento con el nombre de *Métodos y herramientas: determinación del uso de mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE)*, con el fin para ayudar a los gobiernos, organizaciones civiles y el sector privado de los distintos países, para reducir el uso de mercurio en la minería de oro artesanal y pequeña escala. A lo que también, conlleva mencionar técnicas alternativas de manera mecánicas amigables tanto para el medio ambiente y el ser humano para la reducción del uso mercurio, las posibles pérdidas y recuperación de mercurio. (O'Neill, 2017)

Latino América

En 2012, Chile, debido a que las minerías son un punto alto de contaminación para el medio ambiente y el ser humano, la investigación realizada con el nombre de *Amalgamación de concentrado de oro obtenido en concentrador knelson*, publicada en la revista de la facultad de ingeniería UDA. Con un estudio basado no solo en la recuperación de oro, sino en las pérdidas de mercurio en los relaves y sus emisiones al medio ambiente. Se experimentó que prolongando el tiempo y haciendo uso de un molino de porcelana para separar la amalgama, se obtienen resultados de 96.7% de oro y 96.2% de mercurio, al ser un sistema cerrado minimiza la contaminación, (Valderrama, Chamorro, Olgún, Rivera, & Oyarce, 2012).

La tesis realizada en el año 2016, con el tema *Recuperación de oro utilizando "sandios" como alternativa de sodio en la lixiviación alcalina por agitación de minerales tipo óxido, sulfuro, carbonácea, en Trujillo-Perú*. Tenía como objetivo de estudio comparar el nivel de toxicidad y factibilidad utilizando los sandios como medio alternativo de cianuro de sodio, realizando un análisis por método de tratamiento térmico (consiste en producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados), obteniendo como resultados 85.91% cianuro y 83.36% sandios para sulfuro, 38.01% cianuro y 40.86% sandios para carbonácea, 95.01% cianuro y 93.46% sandios para óxidos, demostrando que, aunque está por debajo de una mínima del cianuro puede servir como una alternativa (Padierna León & Zegarra Esquivel, 2016).

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

En 2019, Puno-Perú, se realizó una investigación con el nombre de, *Recuperación de oro a partir de relaves por lixiviación en bateas en la unidad minera estrella de oro CECOMSAP-Ananea, Puno*, con el objetivo de recuperar el oro a partir de los relaves por lixiviación en bateas, con las especificaciones de determinar la concentración de cianuro, la granulometría óptima y el tiempo de cianuración de la poza, la metodología se basó en realizar 8 pruebas en diferentes condiciones mínimas y máximas para cada factor, así lograron evaluar la recuperación de oro a partir del proceso de lixiviación; donde la prueba número 8 presentó las condiciones óptimas con una concentración de cianuro de 0,2L/g, con una granulometría de 0,63mm en un tiempo de 10 días. Llegando a obtener una recuperación de oro de 79,8% en dicha unidad minera, las ecuaciones realizadas en esta tesis fueron fundamentales, *para nuestro seminario de graduación*. (Rodríguez Romani, 2019)

América Central

En el 2008, se realizó un estudio a nivel nacional que está vinculado al tema de investigación de la recuperación de Oro. La monografía de grado titulada *Lixiviación de minerales auríferos por agitación con sales de cloruro y nitrato de sodio en medio ácido, versus cianuración, estudio realizado en Chinandega-Nicaragua del año 2008 al 2010*. Cuyo objeto de estudio era determinar las condiciones óptimas de recuperación de oro con la aplicación de un programa estadístico STATGRAPHICS plus y la eficiencia de extracción de una solución cianurada, quienes dieron a su investigación un enfoque cuantitativo y cualitativo, determinaron las condiciones óptimas para la lixiviación de oro, concluyendo que a partir de la lixiviación con sales oxidantes se logra mejores resultados que con la lixiviación con cianuro de sodio con una diferencia de 7.89%, *este documento nos habla el porqué del control del pH*. (Rodríguez & Reyes Valverde, 2008).

2.3. Preguntas directrices

Las preguntas de sistematización correspondientes se presentan a continuación:

1. ¿Cómo se pueden clasificar las operaciones unitarias en el proceso de extracción y recuperación de oro en el plantel Santa Isabel?
2. ¿Cuáles son las variables de operación a controlar en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas para un proceso de 12 toneladas?
3. ¿Cuáles son los puntos críticos de los que podemos obtener información cuantitativa para observar la variabilidad de la concentración de oro?
4. ¿Cómo podemos observar la variabilidad de concentración de oro en la alimentación y efluentes de ambas etapas?
5. ¿De qué manera podemos calcular los porcentajes de recuperación de oro a partir de los datos obtenidos mediante la técnica de análisis ICP-OES?
6. ¿Qué se logró identificar en la seguridad e higiene de los trabajadores del plantel Santa Isabel?



CAPITULO III



Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

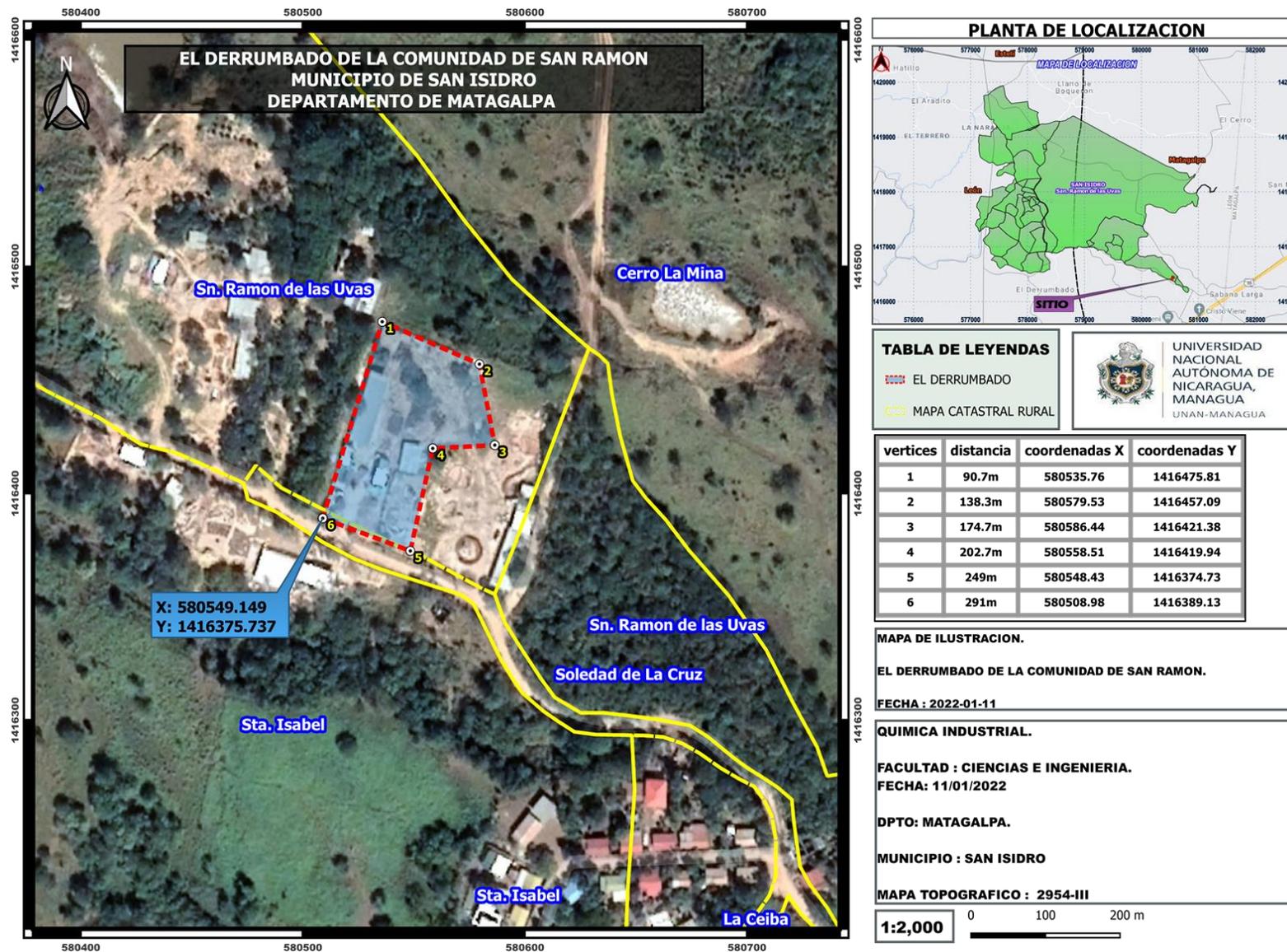


Figura 2 Planta de localización

3.1.2. Tipo de estudio.

De acuerdo con el diseño metodológico y al nivel de profundidad del conocimiento el tipo de estudio es descriptivo (Piura, 2006), y está dirigido a determinar "cómo está" la situación de las variables en estudio, (Pineda, De Alvarado, & H. de Canales, 1994). Conforme el tiempo de ocurrencia de los hechos y registro de la información el estudio es prospectivo ya que se va a registrar la información según va ocurriendo los hechos (Dr. José Supo). Acorde al periodo y secuencia del estudio es transversal debido a que se realizó en un solo periodo de tiempo (Piura, 2006).

3.1.3. Población y muestra.

3.1.3.1. Población.

Minas nacionales de extracción de material aurífero

3.1.3.2. Muestra.

Plantel artesanal de extracción de oro Santa Isabel

Criterios de inclusión.

- *Procesos artesanales donde se desconoce el porcentaje de recuperación de oro*
- *Proceso sin especificaciones de puntos de control*
- *Material para procesar clasificado por lugar de procedencia y dueño*

Criterios de exclusión

- *Procesos en los que no hay clasificación de material*
- *Procesos industriales para la extracción de oro*

3.2. Identificación de variables

3.2.1. Variables Dependientes.

Porcentaje de recuperación de oro

3.2.2. Variables Independientes

3.2.2.1. Proceso de amalgamación.

- Toneladas procesadas

- Libras de mercurio
- Tiempo de amalgamación

3.2.2.2. Etapa de lixiviación en pilas.

- Toneladas procesadas
- Concentración de cianuro en solución
- Control de pH
- Flujo de solución lixivante
- Tiempo de lixiviación

3.3. Material y método

3.3.1. Materiales para recolectar la información.

Los materiales y métodos empleados para recolectar la información en esta investigación fueron:

- Observación directa
- Observación semiestructurada
- Fichas de recolección de datos
- Fuentes bibliográficas
- Cámara semiprofesional de celular para la captura de imágenes
- Guía de entrevista al encargado y trabajadores del plantel Santa Isabel

3.3.2. Materiales para procesar la información.

- Microsoft Word 2016, Microsoft Power Point 2016
- Programa Día V 0.97.2 año 2012
- AutoCAD 2007

3.3.3. Método.

3.3.3.1. Metodología por seguir en las etapas de amalgamación en deslamador con mercurio y lixiviación en pilas con cianuro de sodio.

Etapa 1: Trituración y molienda.

Para esta etapa el mineral deberá pasar por una reducción de tamaño en trituradoras de mandíbula ideales para este tipo de material con características de dureza y abrasividad alta, una vez efectuada esta operación el material será trasladado al área de molienda donde este será alimentado a un molino de bolas de manera artesanal en lapsos de tiempo que dependerán de la dureza que esté presente esta etapa se realiza con un flujo de agua constante que se encarga de arrastrar el material y jabón..

En la tabla N°1. Se presenta el rango de tamaño de partícula del material que sale del proceso de molienda que de acuerdo con la ASTM D422-63, se puede clasificar como material arenoso hasta fino de 2 mm a un material de 0,075 μm .

Tabla 1 Condiciones de molienda (Molino de bolas)

Granulometría	0,075 μm – 2 mm
----------------------	----------------------------------------------

Fuente: (ASTM D422-63, 1998)

Etapa 2: Amalgamación

Al material en pulpa, se descarga en el deslamador, luego se le deberá agregar el azogue (Hg) distribuido durante todo el proceso, en caso de ser necesario agregar cal y sal para precipitar el material fino, el deslame, deberá realizarse con todos los requerimientos necesario para tener una adecuada recuperación de la amalgama y proceder a la separación de Hg líquido y la amalgama de Au haciendo uso de una tela fina (telas de sombrilla generalmente) y una pañoleta para prensar; procediendo a fundir agregando bórax como material fundente. El Hg líquido separado es almacenado para ser reutilizado.

En la tabla N°2. Se presentan los materiales que serán utilizados en esta etapa, sin embargo; no se especifican las cantidades a utilizar debido a que estas van en dependencia del tipo de material a ser procesado.

Tabla 2. Condiciones de amalgamación

Materiales	Cant.
Hg	-
CaO	.
NaCl	.
Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	-
Soplete Gas propileno	-

Etapa 3: Tratamiento de colas de amalgamación.

El material es esparcido en el patio para secar de manera natural, previo a ser mezclado con los productos aglomerantes, garantizando las cantidades adecuadas y facilitar la permeabilidad en el proceso posterior.

En la table N°3. Se hace referencia a los materiales aglomerantes a ser utilizados y los parámetros en esta etapa; estos datos son específicos para un proceso de 12 t.

Tabla 3. Condiciones de aglomeración

Materiales/ Parámetros	Cant. / Unidades
Arena	2 t
Cemento	9 – 12 kg/t
Cal	1 kg/t
Humedad*	8 – 16%
Granulometría*	0,075 μ m – 2 mm

* (Azañero Ortiz, Nuñez Jara, Vega Guillén, Caballero Ríos, & Vidarte Merizalde, 2000)

Etapa 4. Lixiviación y adsorción con carbón activado.

Se deberá acondicionar la pila con un filtro de arena para proceder a cargar el mineral aglomerado e introducir la solución lixivante que deberá recircular durante toda la noche previo a la instalación del carbón activado iniciando de esa manera el proceso de lixiviación durante 7 a 10 días correspondiente.

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

En la tabla N°4. Se presentan los materiales reactivos que deberán ser utilizados y los parámetros a controlar para garantizar un proceso óptimo.

Tabla 4. Condiciones de operación en las etapas de Lixiviación-Adsorción

Materiales/Reactivos	Cant. / Unidades
Arena	2 m
H ₂ O	4 m ³
NaCN	16 - 33 lb
pH (Solución)*	10,5 – 11,5
Concentración de NaCN*	0,05 – 0,1 % (500 -1000 ppm)
Tiempo de residencia	5,77 min

* (Canales Juarez, 2013)

Etapa 5: Desorción.

El carbón activado será trasladado al área del “hervidero” procediendo a lavarlo con agua para eliminar el exceso de polvo previo a ser cargado a la columna de desorción.

En la tabla N°5. Se presentan los reactivos a ser utilizados en esta etapa y la presión establecida para este proceso, deberán realizarse 3 hervidas, para obtener una solución cargada que debe ser filtrada y recolectada en un barril, las cantidades presentadas son específicas del proceso realizado en el plantel Santa Isabel.

Tabla 5. Condiciones de operación en la etapa de desorción

Reactivo y su concentración	Cantidad / Unidad		
	1ra hervida	2da hervida	3ra hervida
NaOH 50%	1 gal	½ gal	½ gal
C ₂ H ₅ OH 28%	3 gal	2 gal	2 gal
Otros	Especificaciones		
H ₂ O	1 ½ de balde		
NaCN	½ libra		
Gas propano	-		

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Parámetros	Especificaciones
Presión	110 psi

Fuente plantel Santa Isabel

Etapa 6: Cementación.

En este proceso deberá agregarse polvo de zinc y acetato de plomo a la solución cargada para la precipitación del mineral de interés añadiendo floculante para que el asentamiento sea más rápido.

En la table N°6. Se presentan los reactivos y cantidades necesarias para esta etapa las cuales son establecidas según los procesos llevados a cabo en el plantel Santa Isabel.

Tabla 6. Condiciones de operación en la etapa de cementación

Reactivos/ Parámetro	Cant. / Unidades
ZnO	250 g
Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂	60 g
Floculante	-
H ₂ O (pozo)	2 baldes
Tiempo	5 – 10 min

Fuente plantel Santa Isabel

Etapa 7: Refinamiento y fundición.

Al precipitado obtenido y recolectado en un balde se le adicionara HCl 30% para eliminar los residuos de Fe, Zn y Pb se decanta y lava el precipitado con agua y floculante. Para lograr la disolución de los metales base y la Ag se adiciona HNO₃ 68% obteniendo Ag en solución y un precipitado de Au, como un proceso adjunto para la precipitación de la Ag se realiza adicionando HCl 30%.

La disolución del oro se logra adicionando HNO₃.3HCl (en proporción 3:1) eliminando a su vez nitratos en forma de vapor, esta solución obtenida deberá ser filtrada para eliminar los residuos de plata e impureza que le acompañan.

La solución obtenida es tratada con urea para eliminar el exceso de HNO₃ que aún este presente y proceder a realizar la precipitación adicionando NaHSO₃ y floculante. Se recolecta el

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

precipitado por filtrado el cual está listo para ser fundido adicionando bórax como material fundente.

En la tabla N°7. Se presentan los reactivos y materiales que deberán ser utilizados para el proceso de refinamiento, estas condiciones son las establecidas en el plantel Santa Isabel.

Tabla 7. Condiciones en la etapa de refinamiento y fundición

Materiales/ Reactivos	Cant. / Unidades
HCl 30% (Quema de impurezas)	½ - 1 gal
HCl 30% (precipitación de Ag)	1 gal
HNO ₃ 68%	2 L
HNO ₃ .3HCl	3:1
CH ₄ N ₂ O 46%	1 ½ lb
NaHSO ₃	3 lb
Floculante	-
Papel filtro	-
Na ₂ B ₄ O ₇ .10H ₂ O	-

Fuente plantel Santa Isabel

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

3.3.3.2. Puntos de muestreo.

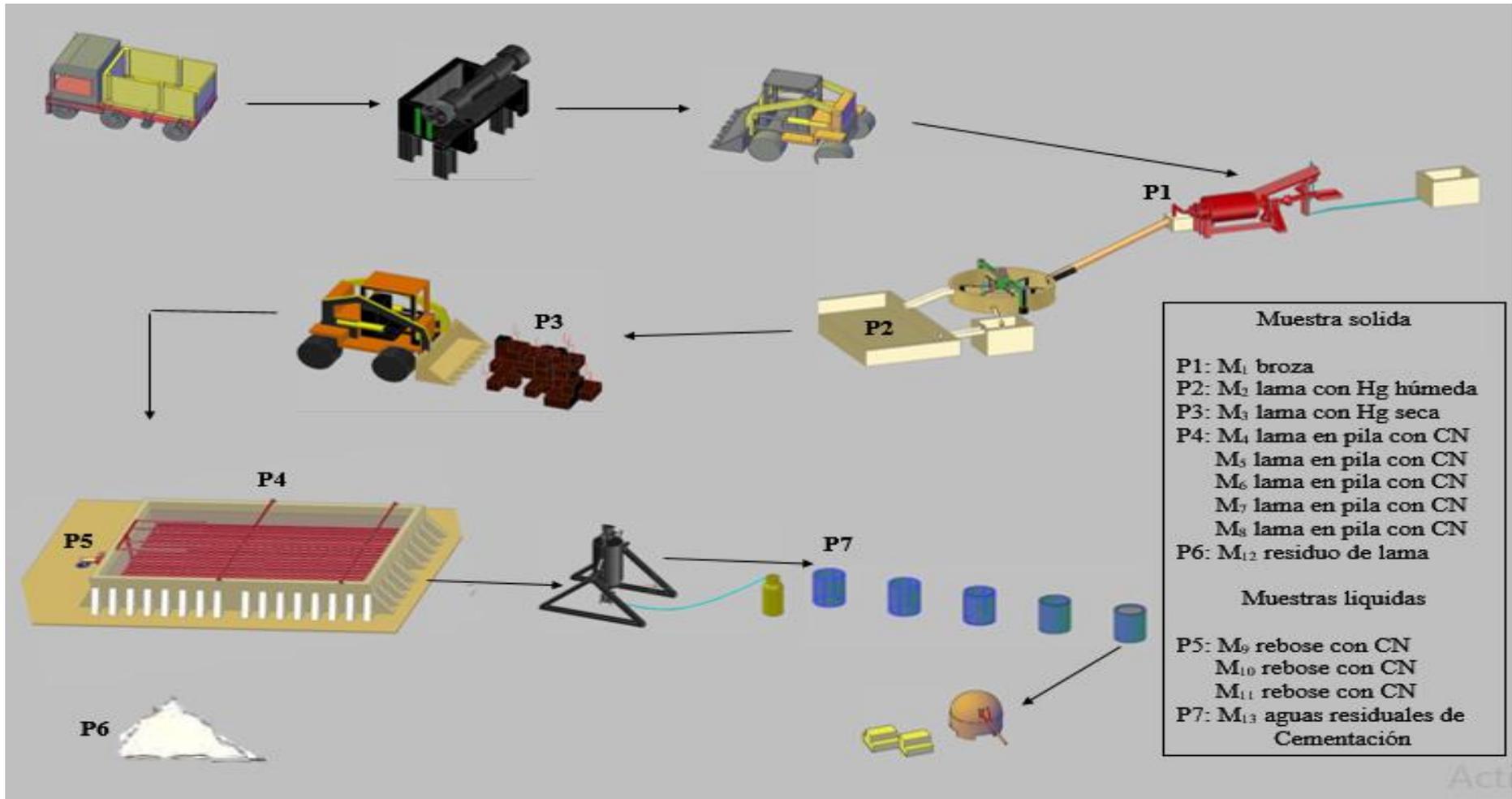


Figura 3 : Representación de puntos a colectar muestras

Fuente propia

3.3.3.3. Diseño de plan de muestreo.

Punto #1: Flujo de descarga de molino.

Será tomada durante el proceso en distintas horas, de manera tal, que la toma sea representativa al flujo global a procesar, mediante un muestreo compuesto, que luego serán mezcladas, formando una sola muestra homogénea de 1 kg en bolsas para muestras geológicas o whirl pack, rotulada con el ID de la muestra, fechas y horas de las colectas.

Punto #2: Flujo de entrada en pila de colas de amalgamación.

Esta muestra representa el material en pulpa que desagua del deslamador por efecto de arrastre, deberá tomarse en distintas horas del proceso hasta que este llegue su final, un muestreo compuesto procurando que la muestra sea representativa y homogénea una vez mezcladas obteniendo 1 kg será almacenada en bolsas para muestras geológicas o whirl pack rotulada con el ID de la muestra, fechas y horas de las colectas.

Punto #3: Patios de aglomeración.

El material que es esparcido en los patios una vez seco, por el método de cuarteo deberá obtenerse una muestra representativa y homogénea de 1 kg, esto previo a que el material sea mezclado con los productos aglomerantes, la muestra será recolectada en una bolsa para muestras geológicas o whirl pack rotulada con el ID de la misma, fecha y hora de la colecta.

Punto #4: Pila de lixiviación.

Una vez iniciado el proceso de lixiviación, se tomarán muestras de material sólido por el método de cuarteo, en diferentes días del proceso, con el fin de obtener información cuantitativa de como varía la concentración de Au en el material que está siendo tratado con la solución lixivante, esperando resultados que descendan con el pasar de los días. Se propone tomar 5 muestras entre los 7 – 10 días que dura el proceso, deberán ser colectadas en bolsas para muestras geológicas rotuladas con el ID, el día y la hora que se colectaron las muestras.

Punto #5: Rebose en tanque de carbón activado.

Para este punto se propone tomar 3 muestras en diferentes días del proceso, las cuales serán tomadas en el rebose del tanque que contiene el carbón activado, colectadas en botellas plásticas para muestras con un volumen de 1L, a dichas muestras se les agregara 2 ml de HNO₃ grado

reactivo para su respectiva conservación, rotulando los envases con sus respectivos ID, fecha y horas en que fueron colectadas las muestra respecto al proceso.

Punto #6: Residuo de lama.

Concluido el proceso de lixiviación se tomará una muestra de 1 kg representativa y homogénea del material solido por el método de cuarteo, almacenada en una bolsa para material geológico o whirl pack con su respectivo ID, con el objetivo de conocer si aún presenta algún porcentaje de Au.

Punto #7: Aguas residuales de cementación.

Al completar la etapa de cementación, se colectará una muestra de 1 L de las aguas residuales en una botella plástica para muestras y se adicionará 2 ml de HNO₃ grado reactivo para su conservación, con su respectivo ID y la fecha en que colectada, esta muestra tiene el objetivo de conocer si hay un porcentaje de Au en solución que no fue precipitado en la etapa de cementación.

Todas las muestras colectadas sólidas y líquidas deberán ser almacenadas en un termo con hielo para garantizar la conservación de estas y de esta manera deberán ser transportadas hacia el laboratorio correspondiente donde serán realizados los análisis, a partir de este momento el tratamiento de las muestras le corresponde a dicho laboratorio según los protocolos establecidos para la determinación de minerales.

3.3.3.4. Procedimiento para calcular el porcentaje de oro mediante la técnica analítica espectroscopia de emisión óptica por plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

Tratamiento para una muestra sólida.

La muestra de material es completamente pulverizada con mortero y pilón, secada a temperatura ambiente y tamizada a través de una malla (#80 ó #100), < 200 µm; 1g de muestra es pesada con exactitud en una balanza analítica para proceder a la digestión.

El analito de interés Oro (Au) primero es solubilizado por reflujo suave (90 °C por 1 h) con 3ml ácido nítrico concentrado grado metal traza, se deja enfriar por varios minutos y seguidamente se le adiciona 9 ml de ácido clorhídrico grado metal traza, siempre por reflujo suave (90 °C por 1

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

½ h). Después de enfriar, la muestra es filtrada, luego dejada en reposo durante la noche anterior al análisis si es necesario, la muestra es aforada a un volumen de 50 ml con agua desionizada (USGS, 2001).

El analito de interés (Au) se cuantifica por Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) con longitudes de onda primarias según la marca y modelo del equipo (APHA, 2012).

Tratamiento para una muestra líquida.

Una alícuota de muestra homogénea de lixiviado es medida con exactitud con pipeta volumétrica de 100 ml en un Erlenmeyer de 250 ml. Para análisis de metales totales recuperables (oro) en muestra de lixiviado conteniendo material insoluble, los analitos son primero solubilizado por reflujo suave (85-90°C por 6-8 horas) con ácido nítrico grado metales trazas al 67% en proporción (1:1) (250 ml de agua desionizada y 250ml del ácido) y ácido clorhídrico grado metales trazas al 37% (1:1) y substancialmente el volumen es reducido a 25 ml, en un plato calentador capaz de proveer esa temperatura y bajo campana extractora de gases (APHA, 2012).

A continuación, se cubre el Erlenmeyer con vidrio reloj durante 30 min. Después las muestras se enfrían, es filtrada o dejada en reposo durante toda la noche anterior al análisis si es necesario.

El analito de interés es el oro (Au) y se cuantifica por Espectrometría de Emisión Óptica por Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) con longitudes de onda primarias según la marca y modelo del equipo (APHA, 2012).

Tabla 8. Longitudes de onda primarias

Analito	Longitud de onda
Oro	197,742
	242,794
	267,594

Fuente: (Agilent Technologies, 2011)

Se selecciona un rango de trabajo ya establecidos por el laboratorio. En el análisis por ICP-OES, la muestra en solución es bombeada al nebulizador para producir un aerosol que es

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

transportado por el gas Argón a través de la cámara de atomización y la antorcha hacia una fuente de plasma acoplada inductivamente. Posteriormente la muestra es desolvatada y atomizada produciendo átomos o iones excitados, cuya intensidad de emisión de luz es directamente proporcional a la concentración de las especies emisoras en solución. La cuantificación es llevada a cabo por extrapolación lineal de la intensidad (c/s) emitida de cada analito contra la curva de calibración de cinco niveles de concentración, (Agilent Technologies, 2011).

La concentración final calculada se corrige tomando en cuenta el porcentaje de recuperación de un estándar testigo o subrogado (Itrio o escandio).

Tabla 9. Para el Oro se debe preparar un rango de trabajo (curva de calibración) descrito a como sigue para muestras solidas:

Analito	Sol. intermedia (µg/ml)	Volumen a tomar de la sol intermedio (ml)					Vol. Intermedia de µg/ml del El (ml)	Sol 100 del El (ml)	Concentración del rango de trabajo (µg/ml)					Volumen de aforo (ml)
		E1	E2	E3	E4	E5			E1	E2	E3	E4	E5	
Oro	10	1,25	2,5	5	10	20	1,0	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	50	

Tabla 10. Para el Oro se debe preparar un rango de trabajo (curva de calibración descrito a como sigue para muestras liquidas:

Analito	Sol. intermedia (µg/ml)	Volumen a tomar de la sol intermedio (ml)					Vol. Intermedia de µg/ml del El (ml)	Sol 100 del El (ml)	Concentración del rango de trabajo (µg/ml)					Volumen de aforo (ml)
		E1	E2	E3	E4	E5			E1	E2	E3	E4	E5	
Oro	10	0,25	0,62	1,25	2,5	5	1,0	0,1	0,25	0,5	1	2	25	

Las condiciones del equipo son programadas, desde la velocidad del flujo y los tiempos de enjuague hasta el número de réplicas de cada lectura. Se debe revisar en el equipo el sistema de entrada de muestra, incluyendo el nebulizador, la antorcha, el tubo del inyector y tubería de absorción, para depositar las sales, tierra y escombros que pudieran restringir el flujo de la solución y afectar el desempeño del equipo. Se sigue un procedimiento de laboratorio debidamente estandarizado y validado. Se leen en la misma corrida blancos de laboratorio, blancos

enriquecidos, muestras enriquecidas con el analito de interés y soluciones de verificación, (Agilent Technologies, 2011).

El límite de detección del método (LDM) se calcula utilizando el método estadístico de Meier & Zünd (diseñado en Excel). Se introducen las intensidades (en el eje de las Y) y las concentraciones teóricas (eje de las abscisas) de la curva de calibración. Se incluye el blanco de estándares (concentración=0).

La concentración de cada analito es calculada utilizando las siguientes ecuaciones, los datos son reportados con tres cifras significativas:

Para muestras sólidas:

$$\text{Concentración de la muestra (mg/kg)} = \frac{C \times V \times D}{W}$$

Donde:

C: Concentración en el extracto (mg/l)

V: Volumen del extracto (L, 25 ml= 0,025L)

D: Factor de dilución (No diluido =1)

W: Peso de la alícuota de la muestra extractada en kg (1 g = 0,001 kg)

Para muestras líquidas:

$$\text{Concentración de la muestra (mg/l)} = A \times \frac{B}{C}$$

Donde:

A: Concentración del metal en la solución digestada (mg/l)

B: Volumen final de la solución digestada (ml)

C: Volumen de la muestra tomada, ml



CAPITULO IV



4.1. Análisis de resultados

4.1.1. Clasificación de las etapas que forman parte del proceso de extracción y recuperación de oro en el plantel Santa Isabel.

A partir de trabajo de campo en el plantel Santa Isabel, se pudo constatar que este no contaba con una clasificación de las etapas que forman parte del proceso de extracción de oro y por lo tanto, no se podía realizar mejoras, para una adecuada extracción de oro y posible recuperación del mismo en las distintas etapas del proceso.

Por lo anterior, se procedió a considerar las actividades que se realizaban en el plantel, para poder clasificar las diferentes etapas del proceso, las cuales se mencionan en el ítem 3.3.3.1, a continuación, se presentan 4 diagramas de bloques en los cuales se aprecian las operaciones unitarias y procesos unitarios que forman parte del proceso de extracción de oro:

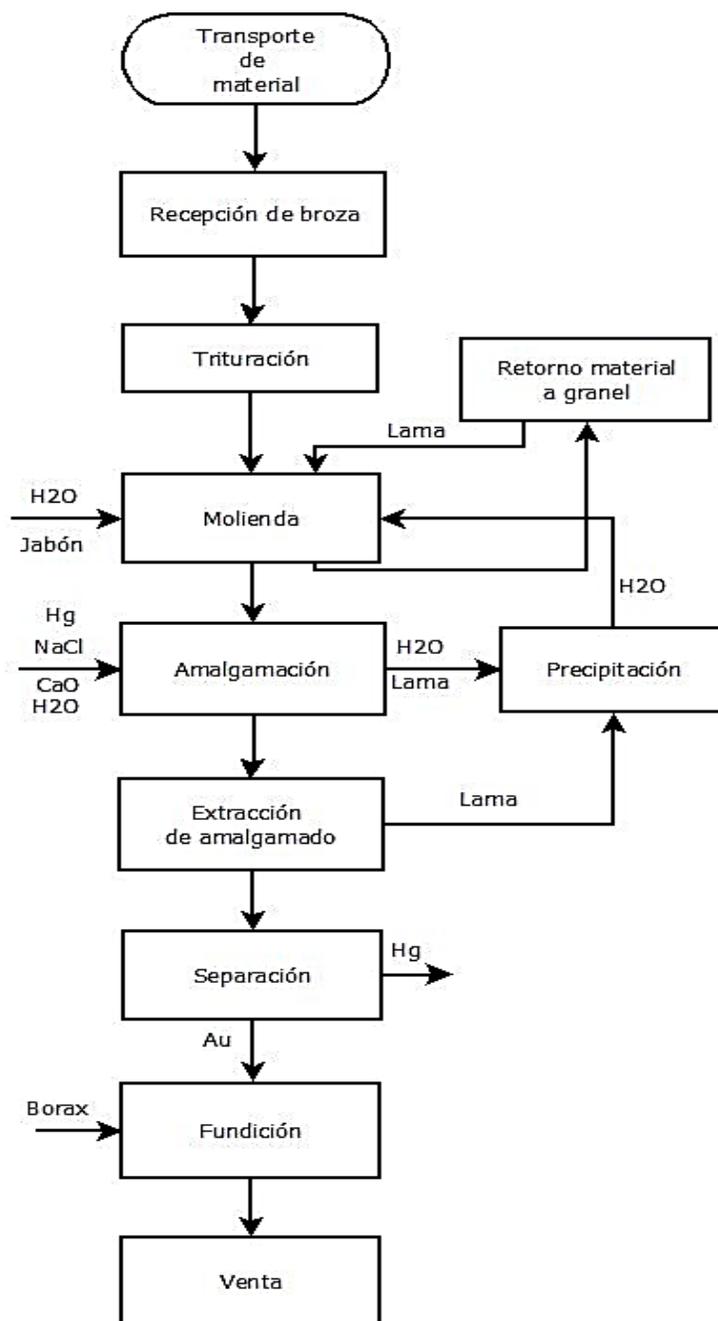


Figura 4 : Diagrama de flujo del proceso de extracción de oro por el método de amalgamación en deslamador.

Fuente: Propia

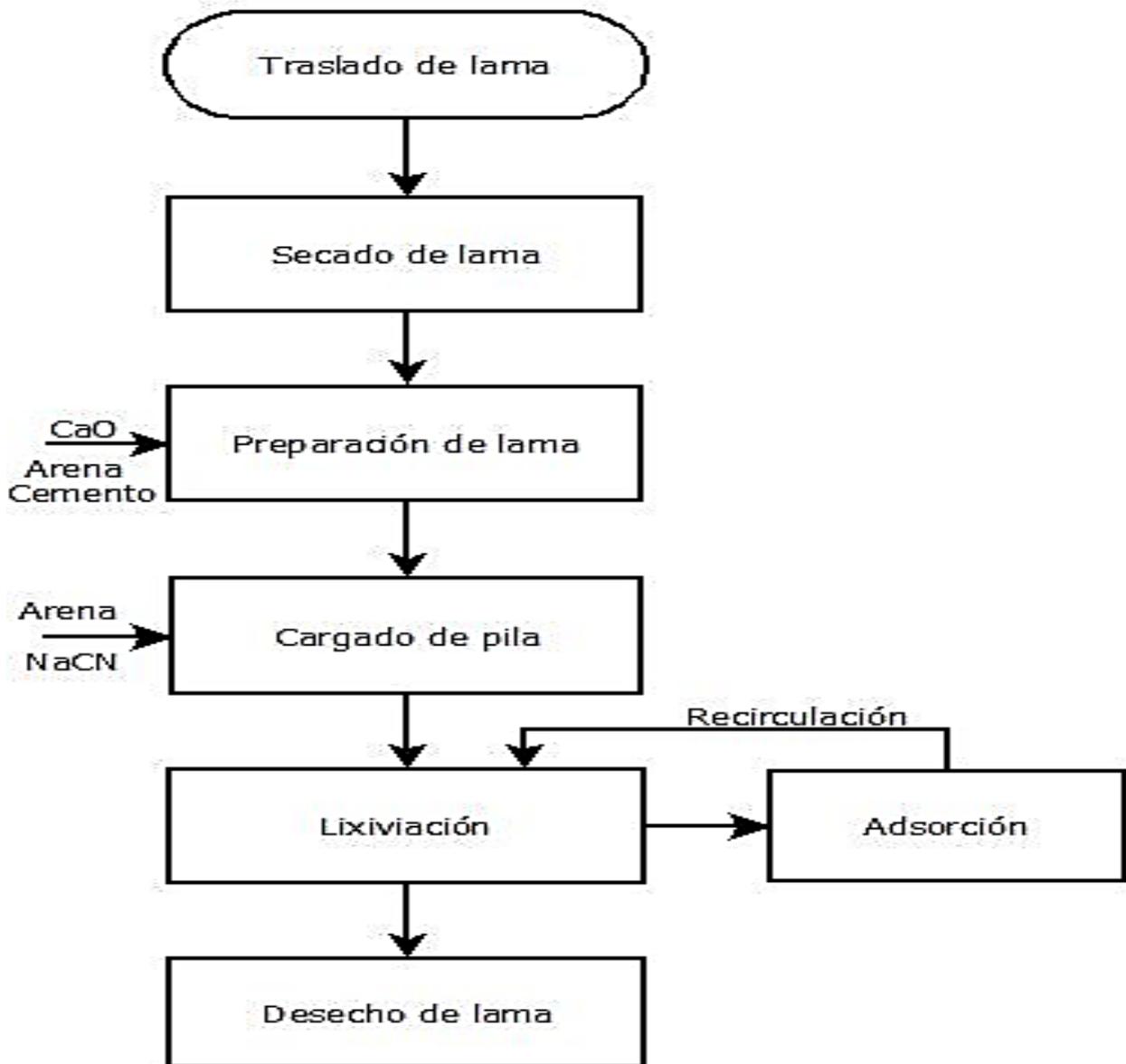


Figura 5 : Diagrama del proceso de lixiviación en pilas con NaCN

Fuente: Propia

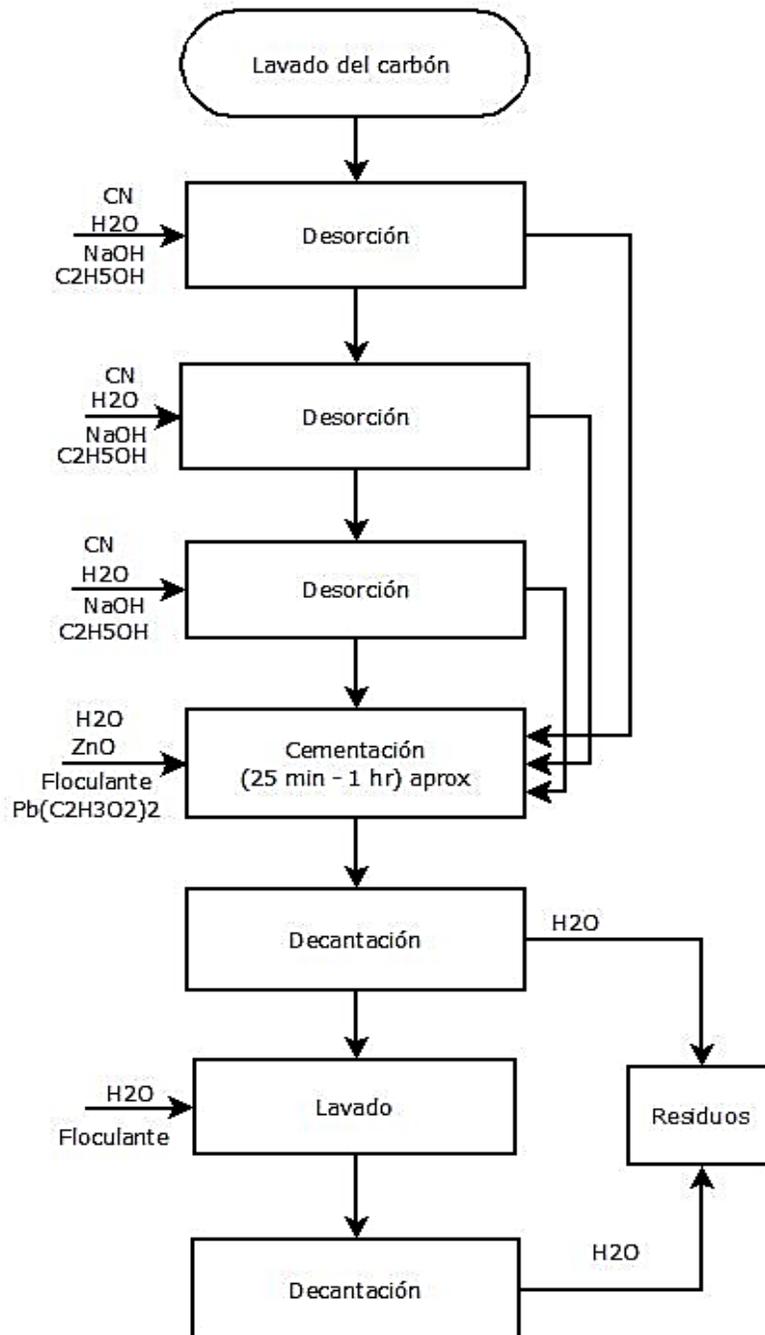


Figura 6 : Diagrama del flujo de la etapa de desorción y recuperación de oro con carbón activado

Fuente: Propia

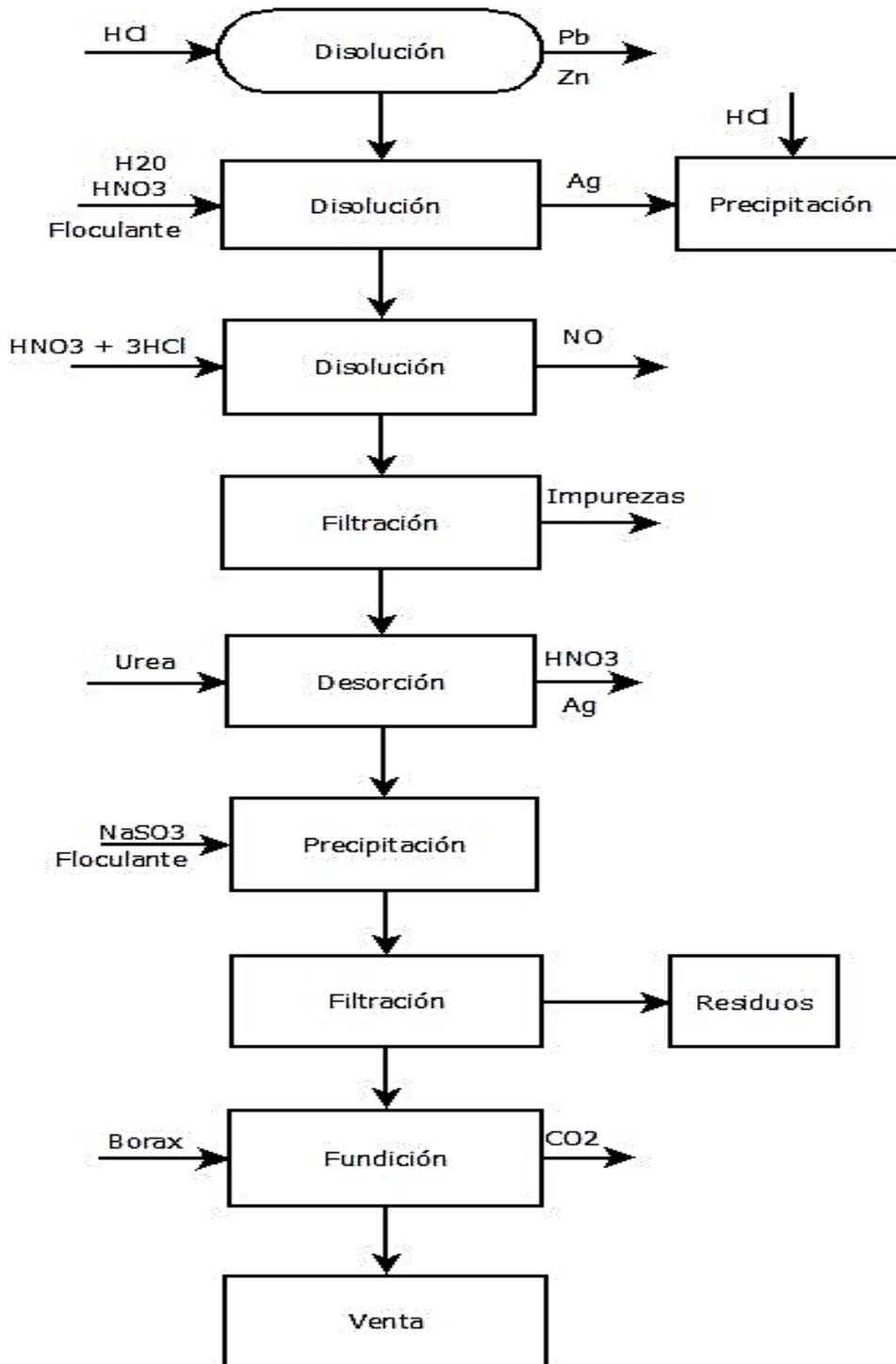


Figura 7 : Diagrama del flujo de la etapa de refinamiento para la recuperación de oro

Fuente: Propia

4.1.2. Identificación de las variables de operación a controlar en el proceso de amalgamación y etapa de lixiviación en pilas, para el procesamiento de 12 toneladas de material.

a) En el proceso de amalgamación:

Toneladas procesadas

En el plantel Santa Isabel, no se contaba con planificación previa en cuanto a las cantidades que serían procesadas en esta etapa, sin embargo, cuando se conocen las características del material se puede definir que, cuando el material es de baja dureza se trabaja un flujo de alimentación de 2 baldes cada 7 minutos, requiriendo 12 horas para procesar 12 toneladas, y si el material de alta dureza el tiempo de amalgamación puede extenderse.

Mercurio utilizado

Normalmente en el plantel Santa Isabel para el procesamiento de 12 toneladas de material (mena entera o en bruto), se utiliza de 6 a 10 libras de mercurio, en donde las principales pérdidas de mercurio se dan por la diseminación del mercurio en forma de vapor. La Organización de la Naciones Unidas (ONU) refiere a utilizar en el procesamiento 4g de mercurio por cada gramo de plata y gramo de oro procesado(O'Neill, 2017). Por esta razón es de suma importancia realizar análisis para la determinación de la concentración de oro y plata en esta etapa, con el fin de reducir la cantidad de mercurio necesaria a utilizar para el procesamiento de material en bruto.

Sin embargo, el análisis de concentración de plata no se llevó a cabo por razones económicas. También se señala que por motivos de confidencialidad al plantel Santa Isabel, no se pueden revelar los análisis de concentración de oro.

Tiempo de amalgamación

El tiempo de amalgamación es de al menos de 12 horas por 12 toneladas de material procesado, esto puede estar en dependencia en la dureza del material a procesar.

b) Etapa de lixiviación en pilas.

Concentración de cianuro en solución

En el plantel Santa Isabel, se desconocía que a nivel de esta etapa, uno de los parámetros más importantes es la concentración de cianuro de sodio, la cual es recomendada entre 0,05 - 0,1% en peso, mencionada en el ítem 2.1.6.1. (Canales Juarez, 2013) , por lo que se procedió a determinar la densidad del material y a partir de esta calcular el volumen total en la pila y así poder determinar la cantidad de cianuro de sodio requerido para alcanzar dicha concentración. Formulas según (Rodriguez Romani, 2019).

Para la densidad de material aglomerado

Datos

Probeta: 55,369g

Probeta + muestra: 71,268g

V: 15ml

$$m = 71,268g - 55,669g = 15,899g$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{15,899g}{15ml} = 1,059g/ml = 1,059kg/L$$

Calculo para Volumen del material

$$12t \frac{1000kg}{1t} \times \frac{1L}{1,059kg} \times \frac{1m^3}{1000L} = 11,33m^3$$

Calculo para el volumen de la solución

$$Vs = V_{material} + V_{H_2O} = 11,33m^3 + 4m^3 = 15,33m^3$$

Para una concentración de 0,05%

$$\frac{0,05g}{ml} \times \frac{1000ml}{1L} \times \frac{1000L}{1m^3} = 500g/m^3$$

$$\frac{500g}{m^3} \times \frac{1kg}{1000g} \times \frac{2,20lb}{1kg} \times 15,33m^3 = 16,86lb NaCN$$

Para una concentración de 0,1%

$$\frac{0,1g}{ml} \times \frac{1000ml}{1L} \times \frac{1000L}{1m^3} = 1000g/m^3$$
$$\frac{1000g}{m^3} \times \frac{1kg}{1000g} \times \frac{2,20lb}{1kg} \times 15,33m^3 = 33,72lb NaCN$$

Control de pH

El pH se debe monitorear los días que el material se encuentre en la pila con la solución lixivante. El pH óptimo debe estar entre 10,5 a 11, cuando el pH tiene un valor de 12, suele disminuir la concentración de oro en la disolución debido a las inferencias de los carbonatos existentes, los que se superponen en las partículas de oro. (Rodríguez & Reyes Valverde, 2008)

Flujo de solución lixivante

Para saber cuánto tiempo tarda el tanque de carbón activado en saturarse se toman en cuenta los siguientes cálculos:

Cálculo del volumen de un cilindro.

$$r = 17,5 \text{ cm}$$

$$h = 45 \text{ cm}$$

$$v_1 = \pi hr^2$$

$$v_1 = (3,14)(45cm)(17,5cm)^2 = 43295cm^3$$

$$43295cm^3 \times \frac{0,001L}{1cm^3} = 43,29L$$

Tiempo de residencia

Cálculo del tiempo medio de residencia.

$$v_1 = 43,29 \text{ L}$$

$$v_2 = 8 \text{ s/L} = 7,5L/min$$

$$\frac{1L}{8s} \times \frac{60s}{1min} = 7,5L/min$$

$$t = \frac{v_1}{v_2} = \frac{43,29L}{7,5 L/min} = 5,77min$$

Se obtuvo el valor de v_2 , tomando de referencia un envase de 1L y cronometrando el tiempo de cuanto este duraba en llenarse con la solución lixiviante que va directo al carbón activado.

4.1.3. Puntos de muestreo

La razón para establecer puntos de muestreo, en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, es para comprobar la variabilidad de como el mineral de interés disminuye su concentración en cada una de las etapas, tanto en las entradas y efluentes que va quedando el mineral de interés aún en el material, mediante una técnica de análisis de cálculo para la determinación de los porcentajes de recuperación.

Estos puntos se representan en la figura 2 del ítem 3.3.3.2.

4.1.4. Método ICP-OES

Determinar la concentración de oro mediante la técnica de análisis ICP-OES, en las corrientes de alimentación y efluente en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas

Mediante esta técnica se pueden detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del Sistema Periódico, pudiéndose analizar una amplia variedad de tipos de muestra. Ya colectadas y procesadas por la técnica de ICP-OES, la concentración final calculada se corrige tomando en cuenta el porcentaje de recuperación de un estándar testigo o subrogado (Itrio o escandio). Ver tablas 9 y 10, del ítem 3.3.3.4.

4.1.5. Cuantificación de los porcentajes de recuperación de oro

Cuantificar los porcentajes de recuperación de oro a partir de los datos obtenidos mediante la técnica de análisis ICP-OES, haciendo uso de ecuaciones de balance de materia de extracción de minerales.

Cálculo para la determinación de los porcentajes de recuperación de oro.

A partir de los datos obtenidos en los análisis realizados, se podrán determinar los porcentajes de recuperación de oro, primeramente; se deberán elaborar tablas, para muestras

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

sólidas y para muestras líquidas respectivamente, la que deberán incluir la información necesaria, el día de toma de la muestra, ID¹ de la muestra, el punto de muestreo y su respectivo dato obtenido.

A como se muestra a continuación:

Tabla 11. Datos obtenidos de muestras sólidas

Día	Muestra	P1	P2	P3	P4	P6
		Au[mg.kg ⁻¹]				
	M ₁	-				
	M ₂		-			
	M ₃			-		
	M ₄				-	
	M ₅				-	
	M ₆				-	
	M ₇				-	
	M ₈				-	
	M ₁₂					-

Tabla 12. Datos obtenidos de muestras líquidas

Día	Muestra	P5	P7
		Au[mg.l ⁻¹]	Au[mg.l ⁻¹]
	M ₉	-	
	M ₁₀	-	
	M ₁₁	-	
	M ₁₃		-

¹ Identificación (de las muestras de ensayo)

Ecuación para calcular el porcentaje de recuperación de Au en cada una de las etapas del proceso a partir de los datos obtenidos en los análisis a realizar por ICP-OES.

F: Kg/ t Broza

f_{Au} : Ley Broza

C: g Au fundido

La primera ecuación nos permite calcular la cantidad de oro total presente en el material a partir de las toneladas a procesar y la ley que presente el material.

$$R_{i,m} = (F)(f_{Au}) = g Au$$
$$R_{Au} = \left(\frac{C Au}{(F)(f_{Au})} \right) (100) = \%$$

Con la segunda ecuación, utilizando los datos obtenidos de las muestras analizadas por medio de la técnica analítica espectrometría de emisión óptica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), podemos determinar el porcentaje de recuperación en cada etapa.

De esta manera tenemos información cuantitativa y a su vez, podemos identificar en que etapas la recuperación está siendo afectada en los distintos puntos específicos obtenidos por medio la frecuencia del muestreo que se diseñó en este estudio.

La frecuencia de muestreo diseñada en esta investigación, nos generó información cuantitativa que nos ayudó a identificar, en que etapa específica del proceso la recuperación de oro está siendo afectada.

En la etapa de amalgamación se recuperó un 28% de oro, el cual presenta un alto grado de impurezas principalmente plata, lo que afecta el precio final por su bajo quilataje, lo que sugiere un proceso poco eficiente en el Plantel Santa Isabel, comparado con los costos de operación teniendo como resultado la mayor cantidad de oro presente en los relaves.

En la etapa de lixiviación en pilas con cianuro de sodio se obtuvo un porcentaje de recuperación de 57%, en comparación con (Rodríguez Romani, 2019), quien controló ciertos parámetros como la concentración de cianuro, granulometría y el tiempo de cianuración, para lograr una recuperación de 79%; lo que implica que el plantel Santa Isabel requiere tener más

control de parámetros, haciendo hincapié en la granulometría del material el cual no fue controlado en esta investigación.

Es importante considerar que la ineficiencia en la recuperación de oro, este vinculada a la adsorción con carbón activado, esto debido a la presencia de cobre, nitrato, sulfatos quienes tienen la capacidad de formar complejos con el cianuro, disminuyendo la adsorción del complejo Oro-Cianuro.

4.1.6. Situación de seguridad e higiene ocupacional y ambiental en el plantel Santa Isabel.

Las actividades que forman parte del proceso de extracción de oro, generalmente presentan impactos negativos, que ponen en riesgo la salud e integridad física de quienes laboran en estas instalaciones, a continuación, se presentan algunas situaciones percibidas durante el estudio:

- El personal está expuesto a las radiaciones solares durante las jornadas de trabajo
- El personal está expuesto constantemente al polvo, que se genera en las distintas operaciones del proceso
- El personal no cuenta con la protección básica para minimizar el contacto directo con mercurio: uso de guantes, botas de hules y mascarillas
- Las herramientas de trabajo se encuentran deterioradas o en mal estado, tales como: palas y carretillas, lo que genera sobrecarga de trabajo en el personal
- Las aguas residuales del área de refinamiento no reciben ningún tipo de tratamiento, que permita mitigar la contaminación alrededor del plantel, el personal está expuesto a gases que se generan en estas aguas residuales.



CAPITULO V



5.1. Conclusiones

Se clasifica, las etapas de amalgamación en deslamador y lixiviación en pilas con NaCN, detallando cada una de las operaciones unitarias realizadas en las distintas etapas del proceso, por medio de diagramas de bloques con el que no contaba el plantel.

Se logra la identificación de variables importante a controlar durante el proceso de recuperación de oro, donde la concentración de oro tiene que estar en un intervalo de 0,05-0,1% como resultado que las libras de NaCN no pueden estar ni por debajo de 16lb ni por encima de 33lb.

Se determinó los puntos de muestreo más idóneos en cada etapa del proceso de extracción de oro, lo que permitirá la identificación de las zonas, en donde el mineral no ha podido ser recuperado adecuadamente, por ende, existen más pérdidas del mineral de interés, esto a su vez arroja datos importantes, para generar mejoras en el proceso.

Se indicó el procedimiento o método analítico de espectrometría de emisión óptica por plasma inductivamente acoplado (ICP-OES), el cual es un procedimiento idóneo para ser aplicado a muestras sólidas y líquidas, con el que se puede determinar la concentración del analito de interés, esto permite realizar los controles de calidad respectivos, generando resultados confiables.

Se plantearon las ecuaciones requeridas para determinar el porcentaje de recuperación, donde se obtuvieron un 28% para la etapa de amalgamación y 57 % para la etapa de lixiviación en pila, considerando las etapas aun ineficientes debido a que se necesitan invertir en el la optimización de parámetros que no fueron controlados por motivos económicos.

Se identificaron situaciones de higiene y seguridad para los trabajadores que operan en el plantel Santa Isabel, mediante la observación directa, las cuales afectan tanto a trabajadores como al medio ambiente, lo cual lo hace un proceso que a largo plazo generara conflictos en este sector.

5.2. Recomendaciones

A partir de esta investigación y gracias a las visitas realizadas referimos las siguientes recomendaciones al plantel Santa Isabel que servirán de guía y mejora en los procesos realizados generando una mayor protección para quienes laboran en estas instalaciones.

- En el proceso de amalgamación brindar las condiciones adecuadas a los trabajadores para disminuir el contacto con el mercurio.
- En las pilas de lixiviación asegurar con tapas los recipientes que contienen el carbón activado para evitar el exceso de polvo lo cual afecta el proceso de adsorción.
- Capacitar al personal que labora en las instalaciones para crear consciencia de la importancia de realizar un buen procedimiento y los cuidados que se deben tomar por su seguridad.
- Invertir en maquinarias y equipos modernos que lleven al proceso a un nivel más tecnificado y amigable con el medio ambiente.
- Invertir en equipos de laboratorio para realizar los análisis correspondientes a los materiales a ser procesados en el plantel garantizando un personal capacitado en el área de química.
- En el proceso de amalgamación brindar las condiciones adecuadas a los trabajadores para disminuir el contacto con el mercurio.
- Cambiar las máscaras en el tiempo correspondiente al personal encargado del proceso de desorción y refinamiento, a su vez implementar un tratamiento adecuado para las aguas residuales producto de estas etapas.
- El tiempo medio de residencia con el cual se trabaja en el plantel Santa Isabel es de 5,77 min, sin embargo; se recomienda hacer pruebas variando este dato para identificar el tiempo medio de residencia adecuado para una mejor recuperación de oro en este proceso.
- A nivel ambiental, se requiere inversión para lograr mitigar los daños que se puedan estar causando principalmente debido a la falta de tratamiento a las aguas residuales generadas en las etapas de desorción y refinamiento.
- Realizar análisis de recuperación de tanto de oro como para plata, para así lograr un aproximado de cuanto oro es recuperado por el mercurio.

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- Realizar estudio de aguas residuales de las pilas de lixiviación y pilas de químicos en el área operacional de desorción y recuperación.

5.3 Bibliografía

- Acosta G, M. C. (2017). *Establecimiento de los parámetros mineros-geomecánicos para el funcionamiento de los equipos de clasificación y trituración de la planta III, Canteras del distrito capital S.A.* Universidad central de Venezuela, Caracas. Recuperado el 24 de 8 de 2021
- Agilent Technologies. (2011). *Agilent 700 series ICP Optical Emission Spectrometers.* manual.
- Alejandro Chicaiza, S. P. (2015). *Proceso de recuperación de oro a partir de los residuos generados por la joyería "Esmeralda".* Tesis, Universidad central de Ecuador, Quito. Recuperado el 7 de Julio de 2021
- Almiron Soncco, Y. E. (2018). *Optimización y evaluación del circuito molienda-clasificación de la planta de beneficio de century mining Peru S.A.C.* tesis, Universidad nacional de San Agustín, Facultad de ingeniería de procesos, Arequipa. Recuperado el 2 de 9 de 2021
- APHA. (2012). *Method 3030.F Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW).*
- APHA. (2012). *Method 3120.B Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMWW).*
- ASTM D422-63. (1998). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.* Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en inglés. Obtenido de <https://www.astm.org/Standards/D422>
- Azañero Ortiz, A., Nuñez Jara, P., Vega Guillén, V., Caballero Ríos, M., & Vidarte Merizalde, J. (15 de 7 de 2000). Como mejorar la extracción de oro en lixiviación en montón. *Revista del instituto de investigación de la facultad de geología, minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 3(5). Recuperado el 18 de 10 de 2021
- Barrera Cuervo, M., & Menéndez Álvarez, M. (2017). *diseño de una planta mineralúrgica de mineral de cobre de 200 t/h.* tesis, universidad de Oviedo, ingeniería de minas, energía y materiales de Oviedo. Recuperado el 22 de 8 de 2021
- Benavente, O. (2010). Hidrometalurgia I. Recuperado el 8 de 8 de 2021

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- Cahuana Hanco, E. (2017). *Manejo ambiental de efluentes del proceso de cianuración de oro en la planta de beneficio de la corporación minera ANANEA S.A.* tesis, Universidad nacional del Altiplano-Puno, Facultad de ingeniería geológica e ingeniería metalúrgica. Recuperado el 5 de 8 de 2021
- Calcina Abanto, I. S. (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 Minig SAC.* Universidad tecnológica del Perú, facultad de ingeniería, Arequipa.
- Canales Juarez, R. A. (2013). *Determinación de los parámetros de cementación de una solución cianurada aurífera por medio de aluminio metálico.* Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO. Recuperado el 06/07/2021 de Julio de 2021
- Capistrán Martínez, M. (2020). *Efecto de la aplicación de nanopartículas de ZnO en la translocación y acumulación de Pb en cultivos de maíz. (Zea mays).* Tesis para el grado de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Química Ambiental, Nuevo León. Recuperado el 18 de Agosto de 2021
- Cárdenas Oré, G. A., & Espinal Maque, H. (2016). *diseño evaluativo y balance del proceso de desorción de oro en carbon activado y su reactivación en la U.M Antonio Raymondi.* tesis, universidad nacional San Agustín, facultad de ingeniería de procesos. Recuperado el 9 de 8 de 2021
- Chirinos Morales, J. (1993). Carbon activado para recuperar oro de soluciones cianuradas. Lima, Perú. Recuperado el 9 de 8 de 2021, de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiIieb_3fvwAhVGZN8KHTBbBkgQFjAAegQIAxAD&url=https%3A%2F%2Frevistas.ulima.edu.pe%2Findex.php%2FIngenieria_industrial%2Farticle%2Fdownload%2F3068%2F2980&usg=AOvVaw1cUnd9
- Coronado Lopez, J. A., Encinas Romero, M. A., Leyva Diaz, J. C., Valenzuela García, J. L., Tiburcio Munive, G. d., & Valenzuela, A. (20 de Febrero de 2012). tostación de un concentrado refractorio de oro y plata. *Revista de Metalurgia*, 165-174. doi:10.3989/revmetalm.1102

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- Coronado Mayta, D. F. (2012). *Implementación de un convertidor de corriente para mejorar la recuperación de oro y plata en las celdas electrolíticas en la empresa minera SOTRAMI S.A.* Universidad nacional José Faustino Sánchez Carrión, Facultad de ingeniería química y metalúrgica, Huacho-Perú. Recuperado el 8 de 8 de 2021
- Cuentas Alvarado, M., & Velarde Ochoa, J. (junio de 2019). Uso de mercurio en la Rinconada-Puno. *Revista de medio ambiente minero y minería*. Recuperado el 20 de 7 de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522019000100003&script=sci_abstract&tlng=en
- Delgado Pacheco, J. A. (2019). *Relación entre la amalgamación con mercurio para recuperar oro y el grado de contaminación del suelo (SECOCHA, 2018)*. TESIS MONOGRAFICA, UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA, AREQUIPA-PERÚ. Recuperado el 05/07/2021 de JULIO de 2021, de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/11580>
- Español Cano, S. (26,27 y 28 de septiembre de 2001). Toxicología del mercurio, actuaciones preventivas en sanidad laboral y ambiental. *Jornada internacional sobre el impacto ambiental del mercurio utilizado por la minería aurífera artesanal en Iberoamérica*. Lima, Perú. Recuperado el 20 de 7 de 2021, de <http://www.gama-peru.org/jornada-hg/espanol.pdf>
- Flores Mamani, C. V. (2019). *Estudio del proceso de cianuración de minerales auríferos para la recuperación de oro en el proyecto oropesa, La Rinconada-Puno*. Universidad nacional del altiplano de puno, facultad de ingeniería geológica y metalúrgica, Puno. Recuperado el 26 de 7 de 2021
- García Ranilla, F. I. (2018). *Propuesta técnica, procura, construcción y ampliación de planta ADR a 36,000 TMPD de la empresa minera Shahuindo, S.A.* tesis, universidad nacional de San Agustín de Arequipa, Facultad de ingeniería de procesos. Recuperado el 10 de 8 de 2021
- González Jaimes, A. (2016). *Conocimiento de mercurio en el personal de salud de un hospital de tercer nivel de Toluca*. Tesis, Universidad Autónoma del estado de México, Facultad de enfermería y obstetricia. Recuperado el 20 de 7 de 2021, de

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/70682/TESIS_CONOCIMIENTOS_DE_MERCURIO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Gutiérrez García, J. P. (2011). *Lixiviación de oro en montones y recuperacion por carbon activado*. memoria de experiencia profesional, Escuela superior de ingeniería química e industrias extractivas, México D.F. Recuperado el 17 de 8 de 2021

Hernández, S. R., Fernández, C. C., & Baptista, L. P. (s.f.). *Metodología de la Investigación* (Quinta edición ed.). (J. M. Chacón, Ed.) Recuperado el 07/0//2021 de Julio de 2021

IPEN. (2007). *Introducción a la contaminación por mercurio para la ONG*. Recuperado el 8 de 9 de 2021, de https://ipen-china.org/sites/default/files/documents/ipen_mercury_booklet-es.pdf

Jiménez Heinert , M., Grijalva Endara, A., & Ponce Solórzano, H. X. (30 de 10 de 2020). Plasma acoplado inductivamente en espectroscopia de emision optica (ICP-OES). *Recimundo*, 4-12. doi:10.26820/recimundo/4.(4).octubre.2020.4-12

Jirón Mena, L. R. (2016). *Caracterisiticas de las condiciones laborales en mineros artesanales, La Libertad, Chontales, Nicaragua,Abril 2016*. Tesis para optar al Título de Licenciado en Química Industrial, Universidad Nacional Autonoma de Nicaragua, Managua. UNAN-Managua, Fcultad de Ciencias e Ingenierías. Departamento de Química, La Libertad. Recuperado el 6 de julio de 2021, de <http://repositorio.unan.edu.ni/7783/>

Lagos Lagos , H. N. (2017). *Lixiviación presurizada a temperatura ambiente de mineral sulfurado de cobre*. Universidad técnica Federico Santa María, Departamento de ingeniería química y ambiental. Recuperado el 7 de 8 de 2021

Lagos Orovilla, M. R. (2016). *Uso del nebulizador ultrasónico con el espectrómetro de emisión óptica por plasma inducido (ICP OES) para mejorar los límites de detección en la cuantificación de metales en muestras de aguas y aguas residuales*. Tesis, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. Recuperado el 18 de Agosto de 2021

Lazaro Hanco, L., & Abarca Phocco, J. F. (2015). *Optimización del proceso de refinación química para el precipitado electrolitico de oro proveniente de la elusión en planta de*

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- beneficio de Geza E.I.R.L.* tesis, universidad nacional de San Agustín de Arequipa, facultad de ingeniería de procesos, Arequipa. Recuperado el 19 de 8 de 2021
- Logsdon, M., Hagelstein, K., & Mudder, T. (2001). *El manejo del cianuro en la extracción de oro*. Recuperado el 5 de 8 de 2021
- Londoña Soria, J. (2007). *Manejo y control del mercurio en la minería artesanal*. Ingeniero metalurgista, Universidad nacional de ingeniería, facultad de ingeniería geológica, minera y metalúrgica. Recuperado el 25 de 7 de 2021
- Mamani Quispe, E. D. (2015). *Estudio de investigación para el procesamiento de minerales auríferos de la franja minera aurífera Nazca*. tesis, Universidad nacional de San Agustín, Facultad de ingeniería de procesos, Arequipa. Recuperado el 8 de 8 de 2021
- Marsden, J., & Lain House, C. (2006). *The chemistry of gold extraction*. Littleton-Colorado, USA.
- Monreal Saavedra, R., & Hernández Rábago, P. Y. (2015). *Mi México es minero* (3 ed.). México, D.F., México. Recuperado el 19 de 7 de 2021, de https://www.geomin.com.mx/publicaciones/pub3_MEXICO%20MINERO%203%20edicion.pdf
- Moscoso Gambarini, H. (2018). *Estudio del proceso de desorción para mejorar la recuperación del oro en la planta de MACDESA*. tesis, universidad nacional de San Agustín, facultad de ingeniería de procesos, Arequipa. Recuperado el 19 de 8 de 2021
- Muñoz Gandarillas, A. E. (2009). *Recuperación de oro de soluciones post-lixiviación con cianuro de sodio mediante cementación con cinc y adsorción en carbón activado*. tesis, Universidad San Francisco de Quito. Recuperado el 17 de 8 de 2021
- O'Neill, J. y. (2017). *Metodos y herramientas: Determinacion del uso del mercurio en el sector de la minería de oro artesanal y en pequeña escala (MAPE)*. *ONU Medio Ambiente*, 15. Recuperado el 10 de Diciembre de 2021
- Ortega Cuadra, F. U., & Valdivia Gutiérrez, M. A. (2014). *Refinación de oro por disolución y precipitación selectiva a nivel de laboratorio en la empresa DESMINIC. S.A., Mina La Libertad, Chontales*. Tesis, UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, Managua. Recuperado el 06/07/2021 de Julio de 2021

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- Padierna León, J. C., & Zegarra Esquivel, Y. A. (2016). *Recuperación de oro utilizando "sandioss" como alternativa al "cianuro de sodio" en la lixiviación alcalina por agitación de minerales tipos oxido, sulfuro, carbonácea*. Tesis, Universidad Nacional de Trujillo, Trujillo. Recuperado el 16 de Agosto de 2021
- Pineda, E. B., De Alvarado, E. L., & H. de Canales, F. (1994). *Metodología de la investigación*. Recuperado el 26 de 7 de 2021
- PNUMA. (2012). *CONTRIBUCIÓN A LA CONSTRUCCIÓN DE UN PLAN ESTRATÉGICO REGIONAL PARA LA REDUCCIÓN DEL USO DE MERCURIO EN LA MINERÍA AURÍFERA ARTESANAL Y DE PEQUEÑA ESCALA: SINOPSIS NACIONAL DE LA MINERÍA AURÍFERA ARTESANAL Y DE PEQUEÑA ESCALA*. PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE (PNUMA), Bogotá. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf
- Robles Cayllahua, J. (2019). *Extracción de plata a partir de concentrados de plomo mediante una cianuración con adición de peróxido de hidrógeno y acetato de plomo*. tesis, Universidad nacional del centro del Perú, facultad de ingeniería metalúrgica y de materiales, Huancayo. Recuperado el 17 de 8 de 2021
- Rodríguez Romanì, C. A. (2019). *Recuperación de oro a partir de relaves por lixivación en bateas en la unidad minera estrella de oro CECOMSAP-Ananea, Puno*. Tesis, Universidad Nacional de Altiplano, Puno. Recuperado el 16 de Diciembre de 2021
- Rodríguez, J. A., & Reyes Valverde, R. J. (2008). *Lixiviación de minerales auríferos por agitación con sales de cloruro y nitrato de sodio en medio ácido, versus cianuración, en iberominas, Somotillo, municipio de Chinandega- Nicaragua. Febrero 2008*. Monografía para Licenciatura Química, Universidad Autónoma de Nicaragua, Química y farmacia, Chinandega. Recuperado el 16 de Agosto de 2021
- Salazar Cruz, O. A. (2018). *Aptitud en la molienda de minerales mixto para la liberación de oro a nivel experimental de la empresa MACDESA- 2018*. tesis, Universidad nacional José Faustino Sánchez Carrión, facultad de ingeniería química y metalúrgica. Recuperado el 22 de 8 de 2021

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

- Salinas Yadaicela, F. A. (2015). *evaluación operacional de un sistema de molienda molino de bolas hardinge para mantener la eficiencia y la clasificación del mineral en la empresa Minalta S.A del cantón Zaruma, provincia de el oro en el año 2014*. tesis, universidad técnica de Machala, unidad académica de ciencias químicas y de la salud. Recuperado el 22 de 8 de 2021
- Tovar Jumpa, O., E. Sánchez, W., & García Alvarez, C. (2005). *Uso y manejo del mercurio*. Ministerio de energía y minas. Recuperado el 25 de 7 de 2021
- USGS. (2001). *Reporte 01-139 del Geological Survey de los Estados Unidos* .
- Valderrama, L., Chamorro, J., Olguín, D., Rivera, J., & Oyarce, J. (2012). Amalgamación de concentrado de oro obtenido en concentrador KNELSON. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 33-38. Recuperado el 16 de Agosto de 2021, de www.revistadeingenieria.uda.cl
- Vanina Llanos, L. (2019). *Comparacion de dos métodos (ICP-OES vs. ICP-MS) para determinación de arsenico en agua*. Tesis, Alex Stewart International Argentina S. A., Maipu. Recuperado el 18 de Agosto de 2021, de www.alexteawat.com.ar
- Yampasi Caceres, O. (2017). *Adsorción del carbón activado de tallos y hojas de cañhua (Chenopodium pallidicaules), para la recuperacion del oro en la mineria colibrí S.A.C*. tesis, Universidad nacional del altiplano, facultad de ingeniería química. Recuperado el 10 de 8 de 2021



ANEXOS



Anexo 1

Etapa de Amalgamación

Trituradora de mandíbula (se encarga de reducción de tamaño).



Foto 1: Trituradora de mandíbula

Molino de bolas (logra una granulometría de 0,075mn)



Foto 2: Molino de bolas

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Deslamador donde sucede la amalgamación



Foto 3: Deslamador



Foto 4: Deslamador funcionando

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Decentase

Paneo, separar el material del mercurio líquido con el oro



Foto 5: Decentase



Foto 6: Paneo

Resocado (prensado), separa el mercurio líquido de la amalgama



Foto 7: Resocado

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Amalgama



Foto 8: Amalgama

Anexo 2

Etapa de Lixiviación

Colas de amalgamación



Foto 9: Colas de amalgamación

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Sacado de lama en patios de aglomeración, por medio de radiación



Foto 10: Secado de material

Aglomeración de colas de amalgamación para las pilas de lixiviación



Foto 11: Aglomeración

Cargado de pila



Foto 12: Cargado

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Curado



Foto 13: Curado

Instalación de tanque con carbón activado



Foto 14: Instalación del carbón activado pasó 1



Foto 15: Instalación del carbón activado pasó 2

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Instalación del carbón activado con la solución lixiviante



Foto 16: Instalación del carbón activado paso 3



Foto 17: Instalación del carbón activado paso 4

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020



Foto 18: Pila de lixiviación y carbón activado

Tanques donde se realizan hervidas



Foto 19: Tanque de desorción

Cementación



Foto 20: Filtrado



Foto 21: Adición de Pb



Foto 22: Reacción

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Refinamiento



Foto 23: Reacción con HCl



Foto 24: Decantación



Foto 25: Recuperación de oro por filtración



Foto 26: Recuperación de plata con HCl para obtenerla solida

Optimización del proceso de recuperación de oro a partir de la implementación del control de los parámetros operacionales en las etapas de amalgamación y lixiviación en pilas, plantel Santa Isabel, Matagalpa-Nicaragua en el período de abril a noviembre 2020

Fundición



Foto 28: Fundición



Foto 27: Fundición con Bórax



Foto 29: Pesaje