

**DETERMINACIÓN DEL USO DE BORATO DE SODIO COMO SUSTITUTO DEL
MERCURIO EN UN ENTABLE MINERO EL SAMÁN EN EL MUNICIPIO DE
SUÁREZ (CAUCA)**



**PRADO ANGULO ELIANA MARCELA
CASTAÑEDA VALENCIA GREY DAYANA**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE CAUCA
CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
POPAYÁN
2020**

**DETERMINACIÓN DEL USO DE BORATO DE SODIO COMO SUSTITUTO DEL
MERCURIO EN UN ENTABLE MINERO EL SAMÁN EN EL MUNICIPIO DE
SUÁREZ (CAUCA)**



**ELIANA MARCELA PRADO ANGULO
GREY DAYANA CASTAÑEDA VALENCIA**

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniera Ambiental y Sanitaria

**Director
IDROBO IDROBO FRANCISCO JOSÉ
Ingeniero de Minas**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTÓNOMA DE CAUCA
CIENCIAS AMBIENTALES Y DESARROLLO SOSTENIBLE
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
POPAYÁN
2020**

NOTA DE ACEPTACIÓN

El director y jurado del trabajo de grado titulado: **DETERMINACIÓN DEL USO DE BORATO DE SODIO COMO SUSTITUTO DEL MERCURIO EN UN ENTABLE MINERO EL SAMÁN EN EL MUNICIPIO DE SUÁREZ (CAUCA)**. Realizado por: Eliana Marcela Prado y Grey Dayana Castañeda Valencia; una vez evaluado y revisado el informe final y aprobada la sustentación del mismo, autorizan la realización de los trámites requeridos para optar al título profesional en Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

Francisco José Idrobo Idrobo

Director de Grado

Adriana Lorena Sánchez vergara

Jurado 1

Mónica Alejandra Moreno Ruano

Jurado 2

DEDICATORIA
ELIANA MARCELA PRADO

Esta tesis está dedicada primeramente a Dios que me permitió desarrollar y llevar a cabo este trabajo gracias a los conocimientos adquiridos durante este proceso, a mi madre María Angulo Coime por todo su esfuerzo, empeño y dedicación para hacer de mí una gran persona y hacer que esto fuera hoy posible, es mi mayor orgullo y mediante este logro sé que me convierto en el suyo, un triunfo no solo mío sino de ambas. A mis compañeros de grupo SIMIR con quienes compartí durante 4 años muchas experiencias que me llevaron por el camino de la investigación y a quienes instigo para que se fortalezcan en este campo donde existe mucho por descubrir, al igual que mis compañeros del grupo GITA con quienes tuve la oportunidad de tener vivencias únicas.

AGRADECIMIENTOS

ELIANA MARCELA PRADO

Gracias a **Dios** por la vida y el privilegio que me ha concedido de culminar mis estudios, por darme la sabiduría necesaria y por poner en mi camino personas que han sido de gran ayuda; sin Dios nada de esto hubiese sido posible.

Gracias a mi madre **María Angulo** por ser la mejor madre del mundo y por ser la principal promotora de mis sueños, por creer en mi cada día y guiarme a ser mejor, por empujarme a volar y construir conmigo este sueño que hoy se convierte en realidad, gracias por cada sacrificio para que yo pudiese alcanzar mis metas por cada consejo y por ser mi mayor inspiración; gracias por secar cada lágrima y por cada abrazo cuando sentía que ya no podía continuar y demostrarme que todo lo que uno se propone en la vida con esfuerzo y dedicación lo puede alcanzar.

A la familia **Rodríguez Salazar** por su apoyo y colaboración en el inicio de esta travesía, cada consejo fue muy valioso para mi vida, gracias por ser como mi familia. A los ingenieros **Arnubi Cortes**, **Yemin Oliveros** y el abogado **Julián Zúñiga** por el apoyo brindado durante este proceso en los momentos en que más lo necesite. A mi querida **Claribel Gutiérrez** quien fue mi apoyo en este proceso, por sus preocupaciones por mí y ser aquella persona a quien mi madre confió su hija y hoy ya no está con nosotros, pero siempre la recordaremos.

A mis amigos **Rafael Gonzales**, **Carolina Escobedo** y **Edgar Quezada** por siempre estar allí para apoyarme, compartir conmigo alegrías y darme ánimo para continuar aun cuando estuve a punto dejarlo todo; gracias por sus consejos y por creer junto a mí que si podía lograrlo. Mi familia **Angulo Coime** y a mis abuelos **Campo Elías Salgado** y **Zoila Andrade** por la comprensión y los consejos durante este proceso, por siempre creer en mí e impulsarme a lograr mis sueños. A mis **compañeros**, con quienes compartí durante este proceso e intercambiamos conocimientos, pasamos momentos de alegría, tristezas y que hicieron de esta experiencia la mejor e igualmente a mis **profesores** por sus enseñanzas.

DEDICATORIA
GREY DAYANA CASTAÑEDA

Este proyecto de investigación será dedicado a Dios que durante todo este proceso siempre fue fiel, nunca cambio, fue un Dios de amor, paciencia, verdad, sabio e inteligente, un Dios que semestre a semestre me mostró su mano de amor, gracia y mucha misericordia; a él le dedico toda honra, gloria, honor y alabanza y sin él absolutamente nada había sido posible.

También mi dedicatoria será para el grupo de SIMIR (Semillero de Investigación de Minería Responsable), por los muchos conocimientos adquiridos durante el tiempo que permanecí y por la experiencia de llegar a conocer lugares y personas que marcaron mi vida.

AGRADECIMIENTOS

GREY DAYANA CASTAÑEDA

Agradezco a **Dios** por llenarme de esperanza, de fe, por secar cada lágrima derramada cuando estaba sola, por abrazarme cada vez que quise renunciar, por motivarme a levantarme los miles de veces que tropecé; por ser padre, amigo, fiel consejero y guía. Gracias a ti Dios porque al final del túnel cumpliste con cada promesa. Gracias Dios.

A mi familia Valencia Segura que ha sido el mejor ejemplo para mi vida, por su confianza, apoyo incondicional y su confianza; mi amor completo siempre le será dado. Infinita gracias a ellos. No me alcanzaran la vida para honrarles.

A mi madre por ser la mejor mamá del planeta tierra, por haber cumplido con la función de ser padre y madre a la vez, una mujer que con regaños me enseñó que sí podía; gracias a ella por su apoyo y confianza y su amor sin igual.

A mis hermanos que con la distancia entendí que son y siempre serán mi motor y mi esfuerzo para seguir hasta el final de mi meta; sin importar los problemas que lleguemos a tener, jamás dejare de amarlos con todas mis fuerzas.

A mis sobrinos Shaily Sofía e Isco Alexis, por que aprendí a quererlos tanto y esforzarme más para que sean esa generación de bendición.

A mi familia Castañeda Bolaños por su apoyo, amor, esperanza y comprensión; a mi mamita Vilma Bolaños por cada llamada de amor y fuerza durante todo el tiempo de mi estudio, gracias mamita por demostrar que eres la mejor.

A mi novio Juan David Luna Salazar por ser mi confidente, mi amor, mi consejero, mi sonrisa, por demostrarme que siempre hay una salida para cada problema, por recordarme mi promesa en Dios, por enseñarme que se puede amar, por sostener mi mano y avanzar, por cada sueño hecho realidad, por seguir confiando en mí y por demostrarme ser mi mejor complemento para mi presente y futuro.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	15
ABSTRACT.....	17
INTRODUCCIÓN	19
1 CAPÍTULO I. PROBLEMA.....	21
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	21
1.2 JUSTIFICACIÓN	22
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 Objetivo general	24
1.3.2 Objetivos específicos.....	24
2 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	25
2.1 ANTECEDENTES.....	25
2.2 BASES TEÓRICAS	27
2.2.1 Mercurio	29
2.2.2 Efectos del mercurio sobre la salud	29
2.2.3 Efectos ambientales del mercurio	30
2.2.4 Metilmercurio	32
2.2.5 Mercurio y metilmercurio	32
2.2.6 Amalgamación.....	35
2.2.7 Producción más limpia	36
2.2.8 Bórax.....	36
2.2.9 Datos de identificación del bórax.....	38
2.2.10 ASGM (Minería Aurífera Artesanal y a Pequeña Escala).....	40
2.2.11 MAPE (Minería Artesanal y a Pequeña Escala).....	40
2.2.12 Convenio Minamata.....	41
2.2.13 PNUMA (El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) ..	42
2.3 BASES LEGALES	43

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	46
3.1 FASE 1: CARACTERIZACIÓN DEL ENTABLE MINERO EL SAMÁN.....	46
3.1.1. Zona de trabajo.....	46
3.1.2. Reconocimiento del entable	47
3.1.3. Caracterización mineralógica del mineral.....	48
3.1.4. Caracterización de la infraestructura de molienda en cada entable minero (barriles y cuerpos moledores)	48
3.1.5. Consumo de agua y medición de caudales.....	49
3.1.6. Matriz de Vester para la priorización de problemas presentes en el municipio de Suárez - Cauca	49
3.2. FASE 2: PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO CON BÓRAX.....	50
3.2.1. Prueba de campo	50
3.3. FASE 3: ELABORACIÓN DE PROTOCOLO	52
3.3.1. Proyección de escenarios favorables para la guía metodológica para el uso del bórax. 53	
4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS	55
4.1. FASE 1: CARACTERIZACIÓN DEL ENTABLE MINERO EL SAMÁN.....	55
4.1.1. Caracterización Mineralógica.....	57
4.1.2. Matriz de Vester de impactos ambientales.....	59
4.1.3. Resultado de la Matriz de Vester	62
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DEL ENTABLE MINERO.....	66
4.2.1. Proceso de recuperación de oro	66
4.2.2. Resultados obtenidos en prueba de campo	68
4.2.2.1. Primera prueba.....	68
4.2.2.2. Segunda prueba.....	73
4.2.2.3. Tercera prueba.....	78
4.3. FASE 3. ELABORACIÓN DE PROTOCOLO	83
4.3.1. Encuesta	83

4.3.2. Proyección de escenarios favorables para la guía metodológica para el uso del bórax. 86	
4.3.3. Interrogantes durante el proceso de recuperación de oro con bórax.	86
4.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DEL BÓRAX.	88
5. CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	99
5.1. CONCLUSIONES.....	99
5.2. RECOMENDACIONES.....	101
6. REFERENCIAS.....	102
7. ANEXOS	109

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Efectos del mercurio (Hg) y metil mercurio (CH ₃ Hg ⁺) sobre los diferentes sistemas y tejidos de un organismo reportados por diversos autores.	34
Tabla 2. Toxicidad del bórax.	39
Tabla 3. Normatividad de las MAPEs en Colombia.	44
Tabla 4. Relación de bórax y mercurio adicionados en los barriles por molindas.	51
Tabla 5. Caracterización del entable El Samán.	56
Tabla 6. Análisis de caracterización de los sulfuros asociados a la mena del municipio de Suárez – Cauca.	58
Tabla 7. Asignación numérica de los problemas.	60
Tabla 8. Ponderaciones según el grado de causalidad.	60
Tabla 9. Matriz de Vester.	61
Tabla 10. Asignación de rol de problemas.	62
Tabla 11. Cantidad de insumos adicionados por barril en cada molienda.	67
Tabla 12. Cantidad de insumos y recuperación de oro.	82
Tabla 13. Costos vs. beneficio.	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de la técnica de recuperación de oro en las MAPES.	28
Figura 2. Identificación del bórax.....	38
Figura 3. Municipio de Suárez - Cauca.	47
Figura 4. Entable minero en Suárez - Cauca.....	56
Figura 5. Material proveniente de las minas.	59
Figura 6. Gráfica de resultados de la Matriz de Vester.....	64
Figura 7. Árbol de problema Matriz de Vester.	65
Figura 8. Diagrama de la primera prueba comparativa.	72
Figura 9. Diagrama de la segunda prueba comparativa.	77
Figura 10. Diagrama de la tercera prueba comparativa.	81
Figura 11. Comparación de la recuperación de oro con mercurio vs. recuperación de oro con bórax en las MAPES en Suárez - Cauca.	89
Figura 12. Comportamiento de recuperación de oro respecto a la cantidad de bórax utilizado.	90
Figura 13. Proceso del bórax.....	92

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Proceso de trituración del mineral	109
Anexo 2. Pesaje de la cantidad de mineral que entra al proceso de molienda. .	109
Anexo 3. Entable de recuperación de oro	110
Anexo 4. Proceso de molienda.....	110
Anexo 5. Proceso de amalgamación en batea	111
Anexo 6. Bórax (borato de sodio)	111
Anexo 7. Separador gravimétrico (elutriador)	112
Anexo 8. Proceso de deslode.....	112
Anexo 9. Recuperación de oro	113
Anexo 10. Mineral (oro encapsulado a la mena)	113
Anexo 11. Proceso de amalgamación	114
Anexo 12. Distrito Minero de Suárez	114

LISTA DE ACRÓNIMOS

MAPE: Minería de Oro Artesanal y a Pequeña Escala

Hg: Mercurio

CH₃Hg⁺: Metilmercurio

m.s.n.m.: Metros sobre el nivel del mar

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

EPP: Elementos de Protección Personal

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar el uso del borato de sodio como sustituto del mercurio en el entable minero El Samán, ubicado en el municipio de Suárez - Cauca. Dentro del municipio se han venido desarrollando explotaciones no tecnificadas desde hace dos siglos para la extracción del mineral y un desmedido uso de insumos químicos para el proceso de extracción de oro. Todo esto ha generado afectaciones a la salud del minero y las comunidades cercanas donde se realiza la actividad aurífera; también ha generado daños en el medio ambiente el cual ha sido causa de los problemas ambientales presentes en la zona de dicha actividad minera tales como: movimientos de suelos, pérdida de la vegetación, contaminación hídrica, erosión, contaminación del aire y contaminación auditiva.

Se realizaron seis pruebas en total por unidad de producción, tres pruebas con bórax y tres pruebas con mercurio para la recuperación de oro, teniendo una relación 1:1 de mercurio y bórax. Para el desarrollo de las pruebas se tuvo en cuenta el tradicional proceso que el minero emplea, entre ellos están: explotación, extracción del mineral, trituración y molienda. En esta última etapa los mineros agregan insumos como miel de purga para la conservación del mercurio y jabón para precipitar el oro. Posteriormente, para la recuperación de oro mediante amalgamación con mercurio se utiliza habitualmente un separador centrífugo llamado elutriador conocido por los mineros como “marrana”, mientras en el método del bórax se utilizó una “batea”. Finalmente se llevó a cabo el proceso de fundición en ambas pruebas.

Los resultados de cada prueba fueron los siguientes: primera prueba recuperación de oro de 0,8 g con bórax y 0,7 g con mercurio; segunda prueba de 0,2 g con bórax y 2,0 g con mercurio y una tercera prueba 1,1 g con bórax y 0,9 g con mercurio. Con este resultado se hizo un análisis comparativo con respecto a los estudios previos de identificación de la eficiencia del borato de sodio como insumo para la

erradicación del mercurio. Se encontraron resultados favorables en la recuperación de oro con bórax en dos de las tres pruebas realizadas, debido al tiempo de trituración y molienda que el mineral requiere para lograr obtener el tamaño preciso que arrojará una mayor recuperación de oro con respecto al mercurio; se logra concluir que, aunque existan variables que hacen que este método funcione, la interacción entre el bórax-oro no es lo suficientemente fuerte como para hacer que el proceso sea totalmente eficaz.

Palabras Clave: Mercurio, Bórax, Mineros, Minería Artesanal, Oro

ABSTRACT

The objective of the present study is to determine the use of sodium borate (borax) as a substitute for mercury in the El Samán mining bed, located in the municipality of Suarez-Cauca. In this municipality, non-technical mining (making use of outdated mining methods) for minerals and excessive use of chemicals for gold mining have been carried out for the past two centuries. All of this has had a negative impact on the health of miners as well as on nearby communities (to such aforementioned mining activities). In addition, there have been negative effects on the environment, namely: soil erosion, loss of native vegetation, water pollution, erosion, air pollution and noise pollution.

Six tests were done by unit of production: three with borax and three with mercury for gold extraction, using a 1:1 ratio of mercury to borax. In these tests, consideration was given to the traditional process used by miners which includes mining, mineral extraction, crushing, milling. Materials like molasses are added in order to preserve the mercury and soap is added for gold precipitation. In the amalgam process for gold extraction with mercury a separating centrifuge called an elutriator (known by miners as marran) is normally used. For the borax method, batea is used and lastly there is the smelting process.

The results are as follows: first test: gold extraction of 0.8g with borax y 0.7g with mercury, second test: 0.2g with borax and 2.0g con mercury and third test: 1.1g with borax and 0.9g with mercury. A comparative analysis of these results was done in relation to previous studies on the efficiency of sodium borate as a material for the eradication of mercury. The results were favourable in gold extraction with borax in two of the tests done due to the crushing and milling time that the mineral requires to get to the exact size that would allow for greater gold extraction with mercury. In conclusion, although there are confounding variables, the interaction between borax and gold is not strong enough to make it a totally effective process.

Key Words: Mercury, Borax, Miners, Artisanal Mining, Gold.

INTRODUCCIÓN

La presente investigación se refiere al borato de sodio (bórax) que ha sido seleccionado como un sustituto del mercurio en el proceso de recuperación de oro. Este es un compuesto importante en la industria, pues se ha empleado en diferentes actividades productivas tales como la fabricación de detergentes, suavizantes, jabones, desinfectantes y pesticidas, gracias a sus propiedades biodegradables, no tóxicas y por lo tanto inocuos para la salud humana [1].

El bórax se ha empleado satisfactoriamente en procesos de la minería aurífera a pequeña escala desde el año 2011, en países tales como Filipinas, Indonesia, Tailandia y Vietnam, basándose en sus propiedades fisicoquímicas, por su alta eficiencia en la recuperación de oro libre, sustituyendo eficientemente el uso de mercurio, además la reducción significativa en los efectos ambientales adversos, minimizando costos de producción y mejorando la rentabilidad de la labor de recuperación [2] [3].

La minería aurífera en Colombia tiene sus inicios en el siglo XVI, durante la época colonial los indígenas lavaban arenas en los ríos y quebradas para obtener oro; esta práctica ha cambiado desde entonces con la implementación de nuevas tecnologías desarrolladas a lo largo del tiempo [4]. En el departamento del Cauca la actividad minera aurífera artesanal se ha incrementado de manera significativa en los últimos años, en algunos casos sin control alguno llegando a convertirse en generadores de impactos y deterioros ambientales; provocando así afecciones en la salud de los trabajadores, debido a los altos índices de toxicidad de algunos de los insumos que se emplean en la actividad minera (como lo es el mercurio) y que ingresa en el cuerpo humano ya sea por vía cutánea, por inhalación o por ingestión [5].

No obstante, las investigaciones sobre el uso del bórax como un sustituto del mercurio, en el proceso de recuperación de oro no han sido suficientes para comprobar la eficiencia del método y la técnica apropiada; por lo tanto, se determinó

el uso del bórax en el proceso minero aplicado en una planta de beneficio a pequeña escala, en el cual se ejecutó una serie de pruebas piloto en el entable El Samán en el municipio de Suárez - Cauca con el fin de erradicar el uso de mercurio en los entables mineros y por consiguiente dar cumplimiento a la ley 1658 del año 2013, donde se dicta la reducción y eliminación del uso del mercurio como insumo para la recuperación de oro en minería artesanal y a pequeña escala.

1 CAPÍTULO I. PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso de mercurio en la minería aurífera libera grandes cantidades de este metal en el medio ambiente, el cual puede transformarse en metilmercurio por la presencia de microorganismos en los sedimentos. Esta neurotoxina puede tener un alto grado de biomagnificación y fácilmente puede ser absorbida por el tejido biológico generando graves problemas en la salud como daños en el cerebro y el sistema nervioso central [6] [7]. Adicional a esto, los mineros utilizan este metal sin ninguna protección, exponiéndose a enfermedades generadas por el contacto y manipulación [8] [9]. En el mundo se calcula que existen de 10 a 15 millones de minas de oro, entre las formas de recuperación se encuentra la minería artesanal a pequeña escala (MAPE), la cual es una de las mayores fuentes de contaminación por mercurio [10].

En Colombia en el periodo comprendido entre 2006 - 2010, se importó hasta 130 toneladas de mercurio por año, se estima que el 98 % fue utilizado en la MAPE, se liberó a la atmósfera 30 ton/año debido a la quema de amalgamas para la recuperación de oro y se generó contaminación por los desechos de mercurio que son vertidos a suelos en un 60 % y directamente a los cuerpos de agua el 40 % [11]. La mayor producción de oro del país en los últimos años, ha sido en los departamentos de Antioquia, Choco, Bolívar, Cauca y Nariño [12], por lo que presentan un mayor grado de contaminación ambiental y ligado a esto un mal manejo del insumo químico, esta problemática se incrementa con la carencia de efectividad en la política ambiental estatal [13].

En el municipio de Suárez - Cauca, el mercurio es utilizado como un insumo para recuperación en los procesos de concentración aurífera [14]; según estudios del departamento nacional de planeación del 2018 la producción de oro fue de 3,7 toneladas, cifra que representa el 6 % a nivel nacional con un aporte del 1,9 % al

producto interno bruto (PIB) del departamento, siendo Suárez uno de los principales productores de oro [15]. Además, se desarrollan explotaciones no tecnificadas para la recuperación del mineral, las cuales afectan negativamente el ámbito socioeconómico, productivo y ambiental, dicha situación se refleja en problemas como: movimientos de suelos, pérdida de la vegetación, contaminación hídrica, erosión, contaminación del aire y contaminación auditiva [16].

La minería de pequeña escala en la mayoría de los casos alcanza solo el nivel de subsistencia para las comunidades, por lo tanto, es necesario adoptar nuevas técnicas para la recuperación de oro que ofrezcan la misma o mayor rentabilidad; de lo contrario, el no lograr mínimamente igualar el estado actual de la economía, implicaría para la localidad un detrimento socioeconómico [17] [18]. El uso del borato de sodio se constituye como una opción potencial económica, productiva y ambiental.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La minería artesanal y a pequeña escala (MAPE), está en riesgo constantemente de multas y sanciones por el uso del mercurio para la recuperación de oro, debido a la contaminación ambiental que se genera producto de las emisiones y vertimientos que realizan; por lo tanto, está prohibido su uso en los procesos de las MAPES. Este proyecto presenta resultados preliminares del uso del bórax como sustituto del mercurio en el entable El Samán del municipio de Suárez - Cauca; basándose en la eficiencia de recuperación de oro al aplicar el método del bórax. El borato de sodio (bórax) es una sustancia de baja toxicidad, fácil disponibilidad, bajo costo y de alto rendimiento, no pone en riesgo la salud de la población expuesta, ni contamina el ambiente; ha sido utilizado en procesos mineros para la recuperación de oro, obteniendo hasta tres veces más gramos de oro [19] [20] [21]. Además, cabe la posibilidad de alcanzar un mayor tenor de oro y generar oro verde puesto que no se utiliza mercurio [22].

En el marco de la implementación del convenio de Minamata, los entes gubernamentales buscan reducir las emisiones antrópicas que generan impactos negativos en el ambiente. El convenio de Minamata es un tratado mundial para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio; entre los acuerdos establecidos esta reducir y/o eliminar el mercurio en los procesos de recuperación de oro en las MAPES [23] [24]. Colombia estableció la ley 1658 de 2013, que insta la reducción y eliminación del uso del mercurio entrando en vigencia en el año 2018 [25] [26].

A pesar de todos los esfuerzos, el mercurio continúa siendo utilizado constantemente, de hecho, los mineros del municipio de Suárez - Cauca no son exceptos ante esta situación, exponiéndose a una sanción económica lo cual podría prolongarse hasta el cierre de sus entables. Por consiguiente, se ha permitido el acceso a los entables mineros para investigar sobre nuevos métodos. Una alternativa limpia probada en los entables de la Cooperativa y Gelima en Suárez, es el uso del bórax como sustituto del mercurio, utilizando el proceso de minería aurífera tradicional pues no requiere de grandes modificaciones, los resultados fueron favorables, en una de las pruebas se obtuvo el doble de gramos de oro con respecto al mercurio. De la misma forma se pretende determinar y dar un aporte teórico sobre el uso del bórax con la técnica utilizada por los mineros del entable El Samán en el presente proyecto investigativo [18] [27].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Determinar el uso de borato de sodio (bórax) como sustituto del mercurio en el entable minero El Samán en el municipio de Suárez - Cauca.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar la caracterización mineralógica del mineral procesado en el entable minero El Samán en el municipio de Suárez - Cauca.
- Evaluar la eficiencia del bórax en la etapa de molienda de la recuperación de oro en el entable minero El Samán.
- Elaborar un protocolo del beneficio de extracción de oro a través del uso del bórax, con el fin de socializarlo con la comunidad minera del municipio de Suárez - Cauca.

2 CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

El uso de mercurio en el proceso de recuperación de oro genera impactos negativos al medio ambiente, entre ellos la contaminación atmosférica que trae con ella afectaciones a la salud de las personas. Las emisiones que se producen a nivel mundial son de 650 a 1350 ton/año, de las cuales aproximadamente 650 ton/año llegan directamente a la atmósfera y el restante termina en los ríos, suelos y vertederos de residuos, los cuales no reciben ningún tipo de tratamiento o disposición final adecuada, desencadenando una problemática socioambiental y es por esto que se ha buscado implementar nuevas alternativas que tengan un alto rendimiento en el proceso de recuperación del oro [5].

Es evidente la contaminación y daño que genera el mercurio, por lo que se ha buscado en Colombia sustituir el mercurio por compuestos como el cianuro y recientemente el bórax, pero las investigaciones sobre el uso del bórax como sustituto de mercurio en las minerías artesanal y a pequeña escala son recientes y limitadas. Algunas publicaciones de este tipo han sido realizadas en Colombia y Perú [18] [19].

Una de las alternativas que se han implementado en los últimos años como sustituto del mercurio en el proceso de recuperación de oro, es el borato de sodio (bórax), el cual es un mineral que se produce de forma natural en los depósitos de rocas sedimentarias y tiene la capacidad de disolver óxidos metálicos al fusionarse con ellos [1]. En Indonesia y Filipinas se realizaron estudios que arrojaron datos favorables en la recuperación de oro con el método del bórax; concluyendo también que el método no es apropiado para cualquier tipo de mineral, puesto que en casos donde el tamaño del grano es muy fino o rico en azufre puede llegar a no ser susceptible [2] [3]. En la India, pequeños mineros han implementado el método del bórax, ya que resulta más económico que el método de amalgamación con

mercurio, además, el bórax tiene una alta capacidad para atrapar el metal (Au), porque, éste puede alcanzar partículas más pequeñas que el mercurio no logra atrapar [28].

Por su parte, la minería en Colombia es una de las principales economías que genera contaminación con mercurio, llegando a emitir hasta 180 ton/año [29]. Según investigaciones realizadas en peces en la subregión de la Mojana, ubicada en los departamentos de Bolívar, Córdoba y Sucre, al norte de Colombia, existen valores hasta de $0,586 \mu\text{g g}^{-1}$ en especies no carnívoras y $0,996 \mu\text{g g}^{-1}$ de mercurio total (HgT) en especie carnívoras, superando los $0,500 \mu\text{g g}^{-1}$ de nivel máximo permitido según la Organización Mundial de la Salud (OMS) hasta en un 13,5 %. Dentro de la región se encontraron zonas donde los niveles de mercurio en peces variaban a causa de la llegada de vertimientos contaminados con mercurio del Río Cauca, que arrastra residuos de la minería de oro desde el norte de Antioquia, especialmente en temporadas de altas lluvias [30].

Mediante un estudio de tipo trasversal en Segovia, Antioquia sobre alteraciones neuropsicológicas por niveles elevados de vapor de mercurio, se hizo una evaluación de las funciones cognitivas (memoria, lenguaje y atención) en 196 estudiantes, encontrándose con el 98,5 % alguna alteración de las funciones cognitivas por causa de la exposición a concentraciones altas de vapor de mercurio, como resultado de la minería artesanal de oro [31].

En los departamentos de Bolívar y Chocó, se realizó la caracterización metalúrgica de los minerales de la zona, en el primer departamento, se encontró que el oro presente en el mineral en su mayoría es de granulometría fina, debido a esto, no se recomienda la implementación de procesos de concentración gravimétrica, puesto que se perderían grandes cantidades de oro; técnicamente es funcional, pero, económicamente no está al alcance de un pequeño productor minero, lo cual hace más rentable el uso de bórax [32]. En el Chocó se realizaron pruebas para la recuperación de oro verde (obtención de oro sin mercurio), utilizando una de sus

especies vegetales como el yarumo y el balso de lana en reemplazo del mercurio, estos tienen la capacidad de separar el oro del agua, piedras y arena atrapando el metal en la babaza de las plantas trituradas; la importancia de esta técnica de recuperación de oro es que cumple la misma función que el mercurio [33].

Rojas *et al.*, en el año 2017 realizaron la identificación de los niveles de eficiencia del bórax como sustituto del mercurio en dos plantas artesanales de extracción de oro en el municipio de Suárez - Cauca, en el cual se propuso crear alternativas que permitieran disminuir o erradicar el mercurio para el mejoramiento de las condiciones sociales, económicas y ambientales de los mineros. En este estudio se llevó a cabo el procedimiento tradicional de extracción de oro, agregando cantidades de 100 g de bórax por cada proceso de molienda, en el cual se evidenció que tiene una capacidad similar o incluso mayor a la del mercurio para atrapar el oro y los resultados fueron favorables durante el proceso; el bórax tiene una alta eficiencia, ya que presenta un mejoramiento de la productividad y la calidad (optimización de procesos y obtención de oro verde) [18].

En otra investigación realizada por Juanillo *et al.*, en el año 2017 se utilizó bórax para el proceso de molienda, se hizo inicialmente un estudio de espectrometría de infrarrojo, el cual proporcionó información de la composición mineralógica del mineral extraído en los diferentes entables. Con los datos obtenidos se aplicaron ensayos prueba-error para conocer la cantidad de bórax que permitiría obtener una cantidad de oro similar o mayor que con mercurio, dando como resultado un rango óptimo entre 100 y 200 g de bórax por cada 2 o 4 oz de mercurio que se añaden normalmente dentro del proceso de recuperación de oro por los mineros de Suárez - Cauca [27].

2.2 BASES TEÓRICAS

Proceso de recuperación de oro en las MAPES: En la figura 1 se muestra el proceso utilizado en la minería para la recuperación de oro, este inicia en la extracción del mineral en las minas, el cual es transportado hasta los entables mineros con el fin

de triturarlo y molerlo hasta que se pueda obtener el metal, luego se concentra en un elutriador y finalmente es fundido para quitar las impurezas.

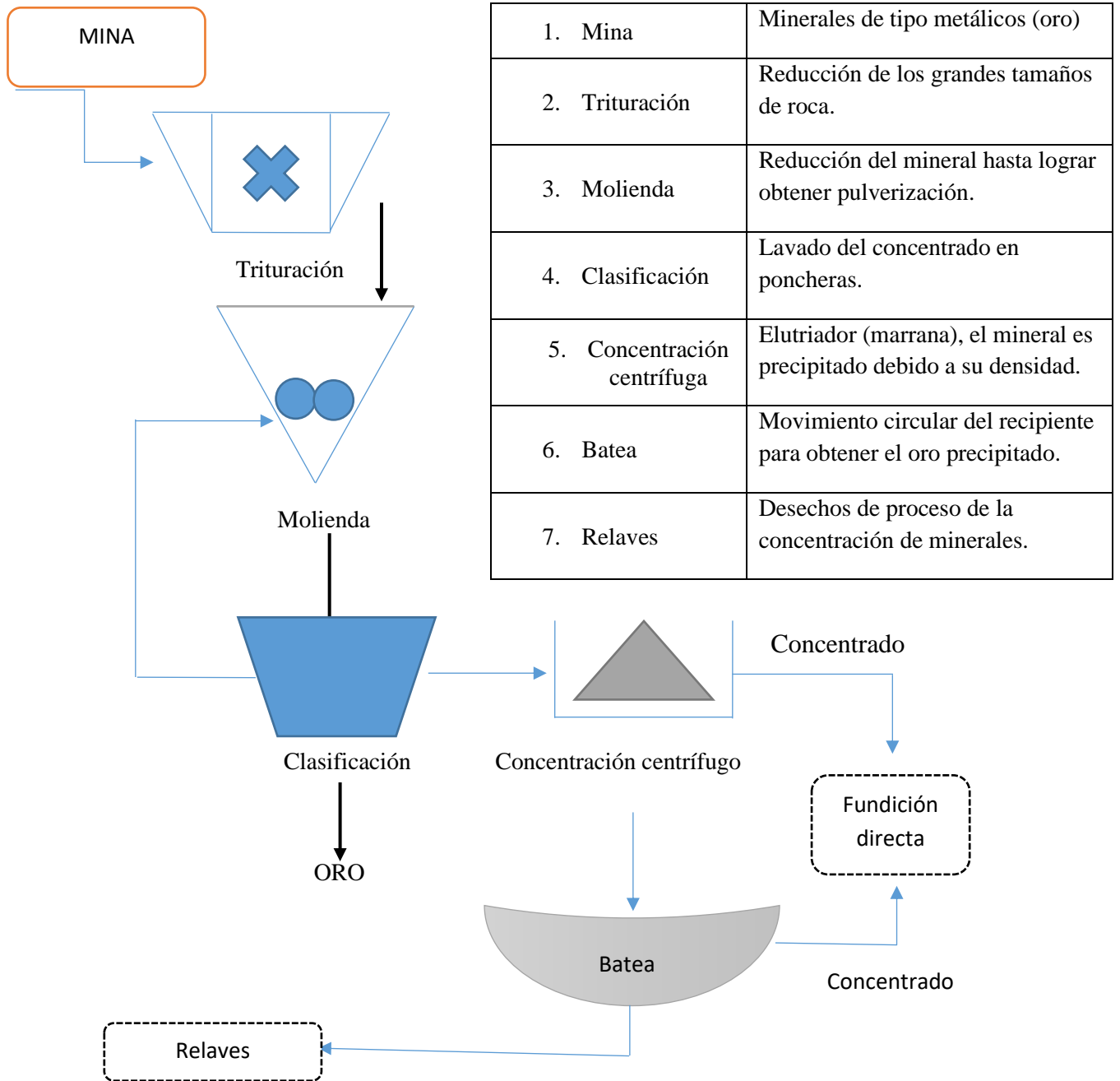


Figura 1. Diagrama de la técnica de recuperación de oro en las MAPES.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Mercurio

El mercurio metálico se usa en interruptores eléctricos como material líquido de contacto, como fluido de trabajo en bombas de difusión en técnicas de vacío, en la fabricación de rectificadores de vapor de mercurio, termómetros, barómetros, tacómetros y termostatos y en la manufactura de lámparas de vapor de mercurio. Se utiliza en amalgamas de plata para empastes de dientes. El mercurio se encuentra comúnmente como sulfuro de mercurio (HgS), con frecuencia como rojo de cinabrio y con menos abundancia como metalcinabrio negro. Un mineral menos común es el cloruro de mercurio (I). A veces los minerales de mercurio contienen gotas pequeñas de mercurio metálico [34].

La tensión superficial de mercurio líquido es de 484 dinas/cm, seis veces mayor que la del agua en contacto con el aire. Por consiguiente, el mercurio no puede mojar ninguna superficie con la cual esté en contacto. En aire seco el mercurio metálico no se oxida, pero después de una larga exposición al aire húmedo, el metal se cubre con una película delgada de óxido. No se disuelve en ácido clorhídrico libre de aire o en ácido sulfúrico diluido, pero sí en ácidos oxidantes (ácido nítrico, ácido sulfúrico concentrado y agua regia) [34].

2.2.2 Efectos del mercurio sobre la salud

El mercurio metálico es usado en una variedad de productos de las casas, como barómetros, termómetros, bombillas fluorescentes. El mercurio en estos mecanismos está atrapado y usualmente no causa ningún problema de salud. De cualquier manera, cuando un termómetro se rompe ocurre una exposición significativamente alta al mercurio a través de la respiración, por un periodo de tiempo corto mientras este se evapora. Esto puede causar efectos dañinos, como daño a los nervios, al cerebro y riñones, irritación de los pulmones, irritación de los ojos, reacciones en la piel, vómitos y diarreas [34].

El mercurio no es encontrado de forma natural en los alimentos, pero este puede aparecer en la comida, así como ser expandido en las cadenas alimentarias por pequeños organismos que son consumidos por los humanos, por ejemplo, a través de los peces. Las concentraciones de mercurio en los peces usualmente exceden en gran medida las concentraciones en el agua donde viven. Los productos de la cría de ganado pueden también contener mercurio [34].

2.2.3 Efectos ambientales del mercurio

La liberación de mercurio desde fuentes naturales ha permanecido en el mismo nivel a través de los años. Todavía las concentraciones de mercurio en el medioambiente están creciendo; esto es debido a la actividad humana. La mayoría del mercurio liberado por las actividades humanas es liberado al aire a través de la quema de productos fósiles, minería, fundiciones y combustión de residuos sólidos [35].

Los principales riesgos de enfermedad ocupacional en minería aurífera por lixiviación son los químicos y de ellos el mercurio es uno de los mayores. El mercurio (Hg) es un metal blanco-plateado, muy tóxico, el único en estado líquido a 0 °C, muy denso y poco compresible, de tensión superficial muy alta y débil reacción calorífica; posee gran capacidad de amalgamar a casi todos los metales. Se evapora a 13 °C y se encuentran trazas de él en cualquier producto que se analice. No es esencial para proceso biológico alguno, pero se acumula en la mayoría de los seres vivos.

En el medioambiente, aparte del estado natural, existe un importante aporte antropogénico proveniente de su metalurgia, de sus aplicaciones en industrias diversas y de las aguas residuales de las ciudades, pues se calcula que cada año mil toneladas son liberadas de las redes de alcantarillado a la superficie. La exposición a mercurio asociada a malas prácticas de higiene laboral favorece el desarrollo de una intoxicación, que se manifiesta por un cuadro clínico de características propias denominado: mercurialismo [36].

El mercurio es un contaminante mundial, que llega al medio ambiente por actividades humanas y en pequeña proporción desde la corteza terrestre. Desde una perspectiva global, las fuentes más importantes de mercurio son las asociadas a actividades humanas, como la minería de oro, la cual es responsable del 37 % de todo el mercurio antropogénico el uso de combustibles fósiles y los vertimientos industriales. Gran parte de los vapores de mercurio llegan a la atmósfera o este se deposita directamente a los cuerpos de agua cercanos sin ningún tipo de tratamiento y es transformado por las bacterias en metilmercurio, biomagnificándose a través de la cadena trófica y llegando a los peces y a quienes los consumen. Una vez absorbido, el mercurio se une a los eritrocitos y a las proteínas plasmáticas, depositándose en el sistema nervioso en los riñones, en el hígado y otros órganos [37].

El mercurio produce estrés oxidativo en el sistema nervioso central y la conducción neural ocasionando una extrema afectación a nivel neurológico y neurocomportamental en los niños, déficit en las capacidades sensoriales, cognitivas y psicológicas, lo que se refleja en puntajes y habilidades de memoria viso espacial y verbales más bajos en la escuela, e inadecuado desarrollo de las funciones que intervienen en los procesos de aprendizaje y desempeño escolar, con afectaciones en su personalidad y en relaciones sociales. Los efectos tóxicos del mercurio dependen de la exposición, en tiempo, cantidad, frecuencias, aunque se ha descrito una marcada variabilidad de la respuesta personal al mercurio, entre los diferentes grupos de población [37].

En el cabello el mercurio puede permanecer por más de 11 años sin cambio, lo que permite que esta muestra sea la de elección para mediciones de exposición crónica. Una de las fuentes más frecuentes de esta exposición es el consumo de pescado. En algunos estudios realizados en niños de diferentes edades, se ha encontrado que la frecuencia de consumo de pescado se relacionó directamente con las concentraciones de mercurio en cabello. Igualmente, la exposición de madres a mercurio por consumo de pescado ha mostrado que incrementos de 1 mg por

encima de 10 mg g^{-1} de mercurio en cabello en la madre, se asocia con una disminución del coeficiente intelectual de los niños, alteraciones en el neurodesarrollo, en el lenguaje, la memoria y funciones motoras y adicionalmente, bajo peso al nacer y daño genotóxico aun con bajas concentraciones de exposición a mercurio, por lo que se usa como marcador temprano de daño a nivel genético [37].

2.2.4 Metilmercurio

El término 'metilmercurio' se emplea habitualmente como término genérico para describir los compuestos de mono-metilmercurio. En realidad, el metilmercurio no es un compuesto en sí mismo, sino un catión, CH_3Hg^+ , que forma parte de los compuestos de metilmercurio, habitualmente, sales de metilmercurio. El dimetilmercurio es uno de los compuestos de metilmercurio que no es una sal. El catión metilmercurio está normalmente asociado o bien a un simple anión, como un cloruro (Cl^-), o a una molécula más grande (por ejemplo, una proteína) con cargas positivas y negativas. El catión metilmercurio es la forma más tóxica de mercurio, capaz de inhibir el desarrollo cerebral del feto y que provoca cambios en el comportamiento y en reducciones de las capacidades cognitiva y motriz [38].

El metilmercurio es la forma más común de mercurio orgánico que se encuentra en la naturaleza. El metilmercurio de origen natural se forma a partir de la metilación de mercurio inorgánico por parte de microorganismos presentes en el suelo, en los sedimentos, en el aire o bajo el agua. Algunos compuestos de metilmercurio son empleados como pesticidas [39].

2.2.5 Mercurio y metilmercurio

Tanto el Hg como el CH_3Hg^+ , luego de ser generado por procesos naturales y/o antrópicos, logran ingresar a la cadena trófica, a través de las bacterias, fito y zooplancton, peces con hábitos alimenticios que los poseen al inicio de la

cadena trófica, seguidos por quienes los superan en el nivel trófico o directamente por el ser humano [40].

Una vez se encuentra disponible, el mercurio ingresa al organismo a través del tracto gastrointestinal, el sistema respiratorio y/o por vía cutánea. Se ha reportado que las especies orgánicas del mercurio solo pueden ingresar a través de la ingesta de matrices contaminadas y su absorción podría superar el 90 %; posterior a esto, el tóxico comienza un proceso de metabolización intracelular que impide su fácil eliminación. Aunado a lo anterior, las especies orgánicas de mercurio pueden atravesar las barreras hematoencefálicas produciendo encefalopatías graves, además, el CH_3Hg^+ se une a la hemoglobina y dada su alta afinidad por la hemoglobina fetal produce una mayor concentración de mercurio en la sangre del cordón umbilical que en la sangre materna. Los procesos de eliminación de CH_3Hg^+ a través de la orina son insuficientes; se estima que la vida biológica del CH_3Hg^+ es de 39 a 70 días [40].

Además, los contaminantes como el CH_3Hg^+ , podría incidir en la proliferación de células carcinogénicas, enfatizando que estas consecuencias no siempre guardan proporción con la edad del organismo. El CH_3Hg^+ funciona como un potente agente neurotóxico, que ingresa a través de la dieta y logra ser absorbido por vía tracto gastrointestinal al mismo tiempo que los nutrientes esenciales, transportándose activamente a través de la barrera que separa el fluido sanguíneo del sistema nervioso central (barrera hematoencefálica), en niños cuyas madres las sometieron a exposición prenatal durante su vida intrauterina. Luego de más de siete años de estudios, al analizar el coeficiente intelectual de los niños, a través de modelos de ecuaciones estructurales que estimaban la imprecisión analítica total y, las concentraciones de mercurio en cabello y sangre (2,2 - 8,8 y 13,5 mg L^{-1}), encontraron una correlación inversa [40]. Algunos otros efectos del Hg y CH_3Hg^+ sobre los diferentes sistemas de un organismo, se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Efectos del mercurio (Hg) y metil mercurio (CH₃Hg⁺) sobre los diferentes sistemas y tejidos de un organismo reportados por diversos autores.

Sistema/Tejido	Efecto	Referencia
Sistema Nervioso	Neurotoxicidad, apoptosis, autismo, alteraciones neuropsicológicas, daño oxidativo, neuroblastomas y glioblastomas, pérdida de visión	Ceccatelli <i>et al.</i> , 2010; Bridges <i>et al.</i> , 2007; Geier <i>et al.</i> , 2007.
Sistema Inmune	Inmunotoxicidad, daño de linfocitos, teratogénesis y carcinogénesis	Crespo <i>et al.</i> , 2009; Silbergeld <i>et al.</i> , 2005
Sistema Reproductivo	Deformidades y pérdida de motilidad de espermatozoides, disrupción endocrina	Choy <i>et al.</i> , 2002; Karagas <i>et al.</i> , 2012
Glándula tiroides	Alteración de niveles hormonales	Ursinyoba <i>et al.</i> , 2012
Carditoxicidad	Susceptibilidad a enfermedades cardiovasculares	De Marco <i>et al.</i> , 2012
Sistema Renal	Citotoxicidad y genotoxicidad	Barcelos <i>et al.</i> , 2011

Fuente: Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de Colombia: riesgo por ingesta [40].

La Unión Europea, realizó una revisión de los niveles máximos permisibles (mg kg⁻¹ peso fresco) de metales pesados en productos alimenticios; esta regulación es matriz para la normatividad nacional de los diferentes países sometidos al acuerdo o que pretendan emprender comercios transfronterizos. Se estableció que, para el mercurio el contenido máximo permisible en carne de pescado debe ser de 0,5 mg kg⁻¹ peso fresco. Luego de monitorear el CH₃Hg⁺ acumulado naturalmente en peces de un lago canadiense y que posteriormente fueron trasladados a otro lago,

estimaron que la vida media del mercurio en el músculo de ese pez es de 3,3 años, corroborando de esta manera, lo paulatino del proceso de eliminación de este tóxico en los peces. La conclusión de este estudio podría sugerir que no es conveniente el consumo de peces grandes y longevos cualquiera que sea su especie, mucho menos si la especie posee hábitos carnívoros, toda vez que la eliminación del metal es mucho más lenta que su acumulación [39].

2.2.6 Amalgamación

La amalgamación es uno de los procesos más importantes de la recuperación de oro en la minería de metales preciosos. El oro presenta especial afinidad electrónica con el mercurio, con el cual forma una aleación física denominada amalgama, esto se debe a que el oro es de los metales que más fácilmente se combinan con el mercurio. Si el oro procede de la reducción de alguna de sus sales, cuando el precipitado obtenido es muy fino, la combinación no se verifica con facilidad, a causa de que los polvos de oro flotan mucho tiempo sobre el mercurio; la mojabilidad preferencial del oro por el mercurio, permite la combinación de los dos metales que conforman un conjunto de compuestos metálicos, es importante destacar que existe mojabilidad total entre el oro y el mercurio y será de mayor eficiencia cuando la granulometría del sólido no sea relativamente fina [41].

El mercurio tiene tan gran afinidad por el oro con el que combina fácilmente y produce una amalgama blanca, blanda, brillante que puede cristalizar cuando tiene el mercurio en exceso; esta propiedad es aprovechada por los mineros para "capturar" pequeñas partículas de oro, las cuales por su tamaño no presentan buena respuesta de concentración gravimétrica. Sin el mercurio, las partículas extremadamente finas o con formas laminares serían arrastradas por la corriente de agua creada en el lavado, produciendo desperdicios de metal y disminuyendo considerablemente el rendimiento de las minas [42].

2.2.7 Producción más limpia

La producción más limpia se define como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente.

En los procesos de producción, la producción más limpia aborda el ahorro de materias primas y energía, la eliminación de materias primas tóxicas y la reducción en cantidades y toxicidad de desechos y emisiones. Además, en el desarrollo y diseño del producto, la producción más limpia aborda la reducción de impactos negativos a lo largo del ciclo de vida del producto: desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final [43].

Las Corporaciones Autónomas Regionales con otras entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y el Ministerio de Minas y Energía han optado por crear convenios donde se afronta y se adopta la implementación de tecnologías de producción más limpia como una herramienta eficaz para el desarrollo sostenible; su fin es el de incorporar prácticas de producción que conduzca a la armonía entre el hombre y la naturaleza. En ella se describe un acercamiento preventivo a la gestión ambiental, en un amplio término que abarca lo que algunos denominan ecoeficiencia, minimización de residuos, prevención de la contaminación, o productividad verde, por tal motivo se busca que esta herramienta ayude a mejorar en cada una de las etapas de beneficio de oro en la explotación aurífera, con el objetivo de eliminar o disminuir el uso de sustancias tóxicas como el mercurio y por ende evitar que estos residuos contaminen las fuentes hídricas cercanas o causen graves daños al ecosistema y a la salud pública [44].

2.2.8 Bórax

La historia del bórax en la minería de oro de pequeña escala comenzó hace más de treinta años, cuando un grupo de mineros de oro en la provincia de Benguet en las Filipinas del Norte aplicó este método por primera vez con éxito. Los resultados de

ensayos realizados para comparar la fusión directa con bórax con la metodología clásica de la separación con amalgama demostraron que el método con bórax es superior a la amalgamación en punto de recuperación de oro y además requiere menos tiempo. Durante los siguientes años, alrededor de 20 mil mineros en esa área adoptaron el nuevo proceso. El método, que por su fácil proceso de recuperación y fácil aplicación fue rápidamente aprovechado por los mineros y se base en las siguientes etapas principales [19]:

1. Trituración y pulverización del mineral
2. Pre-concentración de la pulpa (mineral pulverizado más agua) en una canaleta.
3. Concentración del pre-concentrado utilizando una batea u otro método mecanizado
4. Fusión directa del concentrado final con bórax para la separación del oro.

La razón por la cual se recupera más oro con el método de la fusión con bórax es porque se puede recuperar el oro fino y partículas que el mercurio no logra atrapar [19]. El bórax es un mineral natural e incoloro, también conocido como borato de sodio o sal de boro. Es usado comúnmente en detergentes, desinfectantes, suavizantes y jabones, en la agricultura se usa como pesticida y abono foliar, también como en joyería, fabricación de vidrio, cerámica y esmaltes, entre otros. El bórax es muy soluble y las dosis para que realmente nos afecte como tóxico son muy elevadas, eso sí, se debe usar esparciéndolo en alguna zona de la casa y extremar el cuidado cuando se tienen niños pequeños o mascotas, ya que para ellos sí puede ser dañino [45].

Dado que el bórax es un mineral muy soluble en agua, el cuerpo mineralizado se conservó como un «fósil» al ser enterrado por capas de arcillas rojas y cenizas volcánicas sobre las que se derramó finalmente una colada de lava basáltica. El evento de depositación boratífera ocurrió unos 6 millones de años atrás tal como lo indica la datación radimétrica de una ceniza volcánica intercalada en la secuencia

sedimentaria portadora del bórax. Los fenómenos tectónicos de la deformación andina plegaron las rocas y las dejaron como relieves positivos [46].

La concentración de boro en la corteza terrestre es relativamente baja. Los yacimientos más importantes a nivel mundial se encuentran en California (EE. UU.), Salta (Argentina), Kirka (Turquía) y Lardarello (Italia) [46]. El bórax se encuentra en los yacimientos de evaporita, depósitos poli minerales que se forman a partir de la evaporación del agua que se acumula en los lagos y las lagunas. Cuando el agua se evapora aumenta la concentración de sales, las que tarde o temprano precipitarán, pasando a formar parte del suelo de dicha depresión. Los diferentes tipos de cristales que se forman dan lugar a las distintas sales, diversidad que se corresponde con la cristalización de sedimentos de orígenes diferentes [45] [47].

2.2.9 Datos de identificación del bórax

En la figura 2 se presenta la estructura química y la simbología de seguridad según su peligrosidad del bórax donde salud (Azul): 1 una exposición intensa o continua (pero no crónica) podría causar incapacidad temporal o posibles lesiones residuales, a menos de que se proporcione un rápido tratamiento médico. Inflamabilidad (Rojo): 0 materiales que no se incendiarán. Riesgo de explosión (Amarillo): 0 normalmente estable; y por el ultimo también se presenta dentro la figura, la formula química del bórax.



Figura 2. Identificación del bórax.

Fuente: Técnicas alternativas para la extracción de oro sin el uso de mercurio y su potencial aplicación a pequeña escala y minería artesanal en Colombia [48].

En la siguiente tabla se presenta la información sobre la toxicidad y/o características del bórax, este compuesto químico es de baja toxicidad y no afecta la salud del ser humano como otros químicos (mercurio); es usado en la industria para la fabricación de productos de aseo y belleza.

Tabla 2. Toxicidad del bórax.

Característica	Descripción
Uso	Doméstico, urbano y de jardinería.
Tipo de plaguicida	Insecticida.
Propiedades físicas y químicas	Cristales de color blanco, sin olor, pero con sabor alcalino. Su punto de fusión es igual a 75 °C (temperatura a la que se descompone). Tiene una densidad igual a 1,73 g/cm ³ . Su solubilidad en agua es igual a 5,93 x 10 ⁴ mg/L a 25 °C. Es insoluble en ácidos. Sus soluciones no representan peligro de corrosión para metales ferrosos.
Peligrosidad	Salud (azul): una exposición intensa o continua (pero no crónica) podría causar incapacidad temporal o posibles lesiones residuales, a menos de que se proporcione un rápido tratamiento médico. Inflamabilidad (rojo): materiales que no se incendiarán. Riesgo de explosión (amarillo): normalmente estable, pero puede volverse inestable a temperaturas y presiones elevadas o puede reaccionar con el agua con cierta liberación de energía, pero no violentamente.
Destino en el medio ambiente	Se encuentra de forma natural en el ambiente, contenido en depósitos de lagos salados del período terciario de la era cenozoica y formando parte de minerales como la kernita, colemanita, ulexita y tincal. En suelo puede persistir por un año o más dependiendo del tipo y del régimen de lluvias al que esté sujeto. Su persistencia es más baja en suelos ácidos de zonas muy lluviosas, condiciones que favorecen su lixiviación hasta las aguas subterráneas. En suelos básicos se adsorbe a la fracción mineral y se lixivía lentamente. Se acumula en las plantas.
Toxicidad para los organismos y el medio ambiente	Es ligeramente tóxico para peces y no produce efectos adversos significativos en crustáceos y moluscos. En algunas especies de plantas (lenteja y cebada) reduce la producción, medida como peso de la biomasa seca. Tiene un alto potencial de afectar a los microorganismos de plantas de tratamiento de agua.

Fuente: Elaboración propia, basado en datos de toxicidad del bórax [49].

2.2.10 ASGM (Minería Aurífera Artesanal y a Pequeña Escala)

Significa la recuperación de oro llevada a cabo por mineros particulares o pequeñas empresas con una inversión de capital y una producción limitada; este sector produce alrededor del 12 – 15 % del todo el oro del mundo y se calcula que da empleo a unos 10 - 15 millones de mineros, de los que 4 - 5 millones son mujeres y niños. La ASGM es el mayor usuario de mercurio del mundo. Las emisiones atmosféricas de mercurio debidas a la ASGM se estiman en 727 toneladas anuales según el PNUMA (El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente), por lo que este sector es el mayor emisor, siendo el responsable de más del 35 % del total de emisiones atmosféricas antropógenas. Además, se estima que más de 800 toneladas anuales son vertidas directamente a los sistemas acuáticos [50].

El mercurio se usa en la recuperación de oro para extraerlo del mineral formando una "amalgama", una mezcla compuesta de aproximadamente partes iguales de mercurio y oro, la amalgama se calienta a una temperatura de 360 °C, evaporando el mercurio de la mezcla, dejando el oro. Los vapores de mercurio en el aire alrededor de los sitios de quema de amalgama pueden ser alarmantemente altos y casi siempre exceden el límite de la OMS para la exposición pública de 1,0 µg mL⁻¹. Estas exposiciones afectan no solo a los trabajadores de ASGM, sino también a las comunidades que rodean los centros de procesamiento. El mercurio vaporizado finalmente se deposita en el suelo y en los sedimentos de lagos, ríos, bahías y océanos y es transformado por organismos anaerobios en metilmercurio [50].

2.2.11 MAPE (Minería Artesanal y a Pequeña Escala)

La minería artesanal y de pequeña escala se refiere a las actividades informales llevadas a cabo utilizando poca tecnología y maquinaria, practicada por individuos, grupos o comunidades, usualmente de manera informal (ilegal) y en países en vías de desarrollo. Debido a la ambigüedad del concepto MAPE, es difícil estimar su

magnitud y la cantidad de personas que trabaja en este sector, ya sea de manera permanente o estacional [51].

Es una estrategia de subsistencia utilizada principalmente en las áreas rurales, en donde muchos casos la minería representa la más promisoría, si no la única, oportunidad disponible para obtener ingresos. La mayor parte de esta forma de minería se lleva a cabo en áreas rurales remotas, así proporciona medios de subsistencia para los mineros y estimula la demanda de bienes y servicios producidos en el lugar (alimentos, herramientas, equipo, vivienda y diversos tipos de infraestructura). Pero en los lugares en que la MAPE se ha desarrollado durante un período prolongado su aporte tiende sólo a complementar los medios de subsistencia ya existentes [52].

La minería informal no se dedica exclusivamente a la explotación del oro, sino que extrae cualquier mineral, lo que determina los riesgos finales. Por ejemplo, durante la extracción y transporte de carbón se genera una diversidad de material particulado, cuya toxicidad depende del tamaño de las partículas y otros factores como su naturaleza química. También, es importante mencionar que uno de los mayores riesgos de la minería del oro es el uso del mercurio, que es extremadamente tóxico, no sólo para los mineros, sino también para cualquier persona que se encuentre en las inmediaciones de las explotaciones mineras (o los lugares en los que se lleva a cabo el trabajo de depuración del oro). Mercury Watch (Observatorio del Mercurio) enfatiza que las medidas de protección de los mineros “no existen debido a las exclusivas peculiaridades químicas del mercurio, que hacen que se adhiera al cabello, la piel y la ropa durante días, lo que produce niveles de exposición muy elevados” [51].

2.2.12 Convenio Minamata

El Convenio de Minamata es el primer acuerdo ambiental mundial negociado en el siglo XXI, refleja un enfoque innovador e integral y aborda la cuestión del mercurio a lo largo de su ciclo de vida, desde su extracción hasta su gestión como desecho.

En 2003, la Evaluación Mundial del Mercurio fue presentada al 22° período de sesiones del Consejo de Administración del PNUMA, en ella se llegaba a la conclusión de que el mercurio y sus compuestos tienen importantes efectos adversos a nivel mundial que justifican la adopción de medidas internacionales. En respuesta, Suiza y Noruega propusieron que se elaborase un instrumento amplio y jurídicamente vinculante sobre el mercurio que solo hasta enero de 2013 se logró un acuerdo sobre el texto del Convenio de Minamata sobre el Mercurio [24]. Este Convenio es la respuesta del siglo XXI a la catastrófica contaminación ocurrida en Minamata (Japón), donde las liberaciones industriales de metilmercurio causaron la epidemia conocida como la enfermedad de Minamata en el decenio de los cincuenta y en años posteriores. Su nombre, “Convenio de Minamata”, permitirá asociar el nombre de Minamata no solo con un problema, sino también con una solución [24].

Este Convenio y otros acuerdos internacionales en el ámbito del medio ambiente y el comercio se apoyan mutuamente, poniendo de relieve que nada de lo dispuesto en él tiene por objeto afectar los derechos ni las obligaciones de que gocen o que hayan contraído las partes en virtud de cualquier otro acuerdo internacional existente, haciendo notar que nada se lo impide a las partes adoptar otras medidas nacionales que estén en consonancia con las disposiciones, como parte de los esfuerzos por proteger la salud humana y el medio ambiente de la exposición al mercurio, de conformidad con otras obligaciones de las partes [24].

2.2.13 PNUMA (El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente)

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) es el portavoz del medio ambiente dentro del sistema de las Naciones Unidas. El PNUMA actúa como catalizador, promotor, educador y facilitador para promover el uso racional y el desarrollo sostenible del medio ambiente mundial.

La labor del PNUMA abarca: evaluar las condiciones y las tendencias ambientales a nivel mundial, regional y nacional; elaborar instrumentos ambientales internacionales y nacionales; y fortalecer las instituciones para la gestión racional

del medio ambiente. El PNUMA tiene una larga historia de contribuir al desarrollo y la aplicación del derecho del medio ambiente a través de su labor normativa o mediante la facilitación de plataformas intergubernamentales para la elaboración de acuerdos principios y directrices multilaterales sobre el medio ambiente, que tienen por objeto hacer frente a los problemas ambientales mundiales [53].

2.3 BASES LEGALES

En la tabla 3 se presenta las principales leyes, decretos y resolución que han regulado las MAPEs en Colombia en los últimos 30 años y convenios internacionales en los cuales se ha basado.

Tabla 3. Normatividad de las MAPEs en Colombia.

Norma	Argumento
Constitución Política de Colombia	art. 79 Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines [54].
Ley 685 de 2001	art.1 El presente Código tiene como objetivos de interés público fomentar la exploración técnica y la explotación de los recursos mineros de propiedad estatal y privada; estimular estas actividades en orden a satisfacer los requerimientos de la demanda interna y externa de los mismos y a que su aprovechamiento se realice en forma armónica con los principios y normas de explotación racional de los recursos naturales no renovables y del ambiente, dentro de un concepto integral de desarrollo sostenible y del fortalecimiento económico y social del país [55].
Ley 1753 de 2015	Plan Nacional de Desarrollo 2014 – 2018 art.19 Mecanismos para el trabajo bajo el amparo de un título en la pequeña minería. art. 21 Clasificación de la minería. Para efectos de implementar una política pública diferenciada, las actividades mineras estarán clasificadas en minería de subsistencia, pequeña, mediana y grande. El Gobierno nacional las definirá y establecerá los requisitos teniendo en cuenta el número de hectáreas y/o la producción de las unidades mineras según el tipo de mineral. Para la exploración solo se tendrán en cuenta las hectáreas [56].
Convenio de Minamata sobre el mercurio 2013	El objetivo del Convenio es proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones y liberaciones antropógenas de mercurio y compuestos de mercurio [24].
Ley 1658 de 2013	art. 3 reducción y eliminación del uso de mercurio. Los Ministerios de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Minas y Energía; Salud y Protección Social y Trabajo, establecerán las medidas regulatorias necesarias que permitan reducir y eliminar de manera segura y sostenible, el uso del mercurio en las diferentes actividades industriales del país [25]. Basados en investigaciones realizadas por diferentes instituciones de educación superior para la eliminación y/o sustitución del mercurio.
Resolución 2254 de 2017	art. 4 Se establecen los niveles máximos permisibles a condiciones de referencias para contaminantes tóxicos del aire, teniendo en cuenta sus efectos adversos en la salud humana y el ambiente [57].
Decreto 1073 de 2015	“Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía” Objetivo: El Ministerio de Minas y Energía tiene como objetivo formular, adoptar, dirigir y coordinar las políticas, planes y programas del Sector de Minas y Energía [58].
Decreto 1076 de 2015	“Por el cual se adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, respecto de la adopción de medidas relacionadas con el Beneficio y Comercialización de minerales y se adiciona y modifica el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y

Norma	Argumento
	Desarrollo Sostenible, 1076 de 2015, respecto del licenciamiento ambiental para plantas de beneficio" [59].
Decreto 2166 de 2016	"Por medio del cual se determina la zona de protección del Rio Teusaca parte baja" [60].

Fuente: Elaboración propia a partir de los autores citados en la tabla.

3 CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

Para la determinación del uso de borato de sodio como sustituto del mercurio en el entable minero El Samán del municipio de Suárez - Cauca, se hizo un acercamiento, reconocimiento del entable, trabajo de campo, fases de resultados y por último un análisis como desarrollo del tema.

3.1 FASE 1: CARACTERIZACIÓN DEL ENTABLE MINERO EL SAMÁN

3.1.1 Zona de trabajo

El entable el Samán construido recientemente hace cuatro años, donde prima el uso desmedido del mercurio para la recuperación de oro, es un entable que cuenta con instrumentos y herramientas necesarias para el proceso de recuperación de oro a pequeña escala; dentro del entable se encuentra a una latitud de $2^{\circ}55'18.35''$ N y longitud de $76^{\circ}43'20.48''$ O, en el municipio de Suárez al noroccidente del departamento del Cauca, el cual limita al norte y oriente con el municipio de Buenos Aires, al suroriente y al sur con el municipio de Morales y al occidente con López de Micay como se muestra en la figura 3, a 1050 m.s.n.m.

El municipio de Suárez - Cauca, sus ríos más importantes son el Cauca, Ovejas, Inguitó, Asnazú y Marilópez, Damián, Marilopito además el embalse artificial Salvajina. Su economía está basada principalmente en la minería, la agricultura con productos como el café, caña de azúcar, el frijol, el maíz, la piscicultura, la avicultura y la ganadería [61].

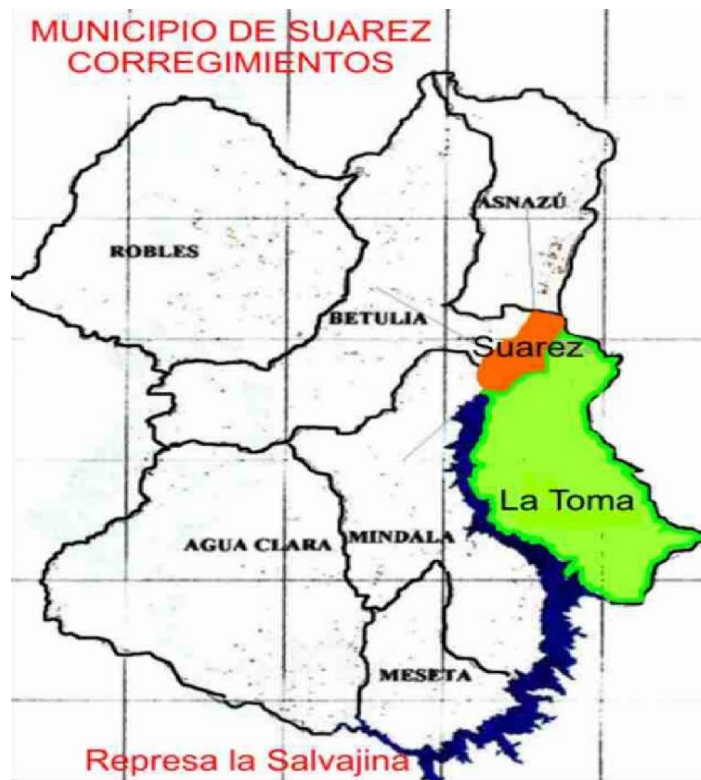


Figura 3. Municipio de Suárez - Cauca.

Fuente: Río Cauca [62].

3.1.2 Reconocimiento del entable

Se realizó el acercamiento al entable con el fin de brindar una alternativa viable de sustitución del mercurio y mejorar las condiciones socioambientales de la localidad; para ello se entabló una relación directa con la comunidad minera del entable El Samán con el objetivo de explicar el proyecto y los alcances del mismo, también se mencionó, los efectos nocivos que genera el uso del mercurio para la comunidad minera y a las fuentes de abastecimiento para consumo humano, así como la necesidad de emplear métodos que ayuden a reducir y/o eliminar el uso del compuesto químico para evitar el cierre completo de sus entables dictado por la ley 1658 del 2013; de manera en que se logró el compromiso de facilitar el entable, el mineral de prueba y mano de obra.

Posteriormente se realizó el reconocimiento del entable, para lo cual se tuvieron en cuenta los siguientes procedimientos y/o método de selección los cuales fueron: cantidad de mercurio utilizado dentro del entable (3 oz por cada barril), el tipo de proceso el cual es tradicional, lugar de fácil acceso, espacios adecuados para el desarrollo de las pruebas al igual que la cantidad de materiales y/o herramientas para trabajar y la disposición de los propietarios del entable y mineral.

3.1.3 Caracterización mineralógica del mineral

Debido a las limitaciones económicas del proyecto fue necesario basarse en las fuentes de información sobre estudios previos de caracterización mineralógica realizados en la zona de Suárez - Cauca, con el fin de conocer la composición de los minerales que llegan al entable El Samán y luego poder analizar los resultados de las pruebas de campo con respecto a ello. Por lo tanto, para la caracterización del mineral se tuvo en cuenta el estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano en el año 2018, donde se menciona las partículas de oro existentes en el municipio de Suárez - Cauca [63].

3.1.4 Caracterización de la infraestructura de molienda en el entable minero (barriles y cuerpos moledores)

Se realizó el conteo de barriles y cuerpos moledores (bolas de acero) en el entable, tomando así las mediciones de tamaño de barril usando un decámetro y el promedio de bolas de acero por barril. Se consignaron los datos de las revoluciones por minuto (RPM), tiempo en el cual son operados los barriles para las moliendas mediante observación y monitoreo con un cronómetro electrónico, y se determinó la cantidad promedio de material que es añadido a los barriles en kilogramos (kg).

3.1.5 Consumo de agua y medición de caudales

Para efectos del desarrollo de las pruebas era necesario conocer la cantidad de agua utilizada en el proceso tradicional de los mineros, por esto se midió la cantidad de agua que se agrega a los barriles, utilizando un recipiente (balde) con capacidad de medir el volumen de agua en litros (L), de tal forma que se llegó a conocer la cantidad de agua necesaria para el proceso de molienda, tanto para el mercurio como para bórax; también se logró medir el caudal que se consume durante el proceso que se desarrolla en el elutriador del entable, haciendo un promedio de caudales en unidades de L/s; es decir, la cantidad de agua que entra al elutriador por un determinado tiempo. Posteriormente, se tomó el tiempo que tarda el proceso de deslode en el elutriador con un cronómetro electrónico el cual es de 1 - 2 horas; además durante este proceso se logró evidenciar que el manejo de los vertimientos de los lodos no presentan un tratamiento ni una disposición final adecuada, siendo esto uno de los causantes de impactos ambientales negativos dentro de la zona, frente a ello se realiza una Matriz de Vester para la priorización de los problemas ambientales presentes en la zona de estudio.

3.1.6 Matriz de Vester para la priorización de problemas presentes en el municipio de Suárez - Cauca

La matriz de Vester logra emplearse en el desarrollo del proyecto para evaluar de forma objetiva algunos problemas ambientales, sociales y de salud que enfrenta la comunidad minera del municipio de Suárez, y con ello se tiene la relación, identificación y determinación del problema central, las causas y los efectos; en una serie de filas y columnas se muestran tanto horizontal (filas) como verticalmente (columnas) las posibles causas de una situación actual. La matriz Vester es un instrumento de desarrollo que forma parte de la matriz del marco lógico, y se realizó porque ayuda y facilita la identificación de la problemática con mayor impacto; los cuales reflejan la importancia de encontrar una alternativa que contribuya a la reducción de los impactos ambientales.

3.2 FASE 2: PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO CON BÓRAX

3.2.1 Prueba de campo

Para dar cumplimiento al segundo objetivo, uno de los parámetros estandarizados fue el de trabajar con la cantidad de mercurio que el minero tradicionalmente utiliza (3 oz de mercurio por cada barril), ya que en el acercamiento y reconocimiento se aceptó como una condición. Con esta cantidad el minero establece una recuperación de oro eficiente en su proceso, esto se tuvo en cuenta para visualizar y comparar la recuperación de oro con los dos insumos químicos (bórax y mercurio). Como base para el desarrollo de las pruebas de campo se utilizaron 100 y 200 g de bórax, cantidades reportadas previamente con una recuperación de oro eficiente. Cabe mencionar que a partir de este rango se seleccionó de forma aleatoria cantidades de bórax de 125, 150 y 175 g para el desarrollo de cada una de las pruebas [18] [27].

Se debe resaltar que los valores o cantidades anteriormente presentadas de bórax y demás insumos (mercurio, jabón y miel), se agregaron en cada uno de los barriles por molienda realizada; por consiguiente, la cantidad total de bórax e insumos utilizados en cada prueba o proceso depende del número de moliendas que necesita el mineral, el cual varía según el grado de dificultad para liberar el oro encapsulado en el mineral. Si se necesitan dos o más moliendas este será el número de veces en que se agregara cada insumo, el número de moliendas realizadas fueron a consideración del minero basándose en su experiencia empírica. La tabla 4 describe la cantidad de insumos por número de molienda y las cantidades totales de cada prueba.

- Primera prueba en el entable: La cantidad empleada de bórax fue de 150 g, y 3 oz de mercurio en barriles separados. Para esta primera prueba se realizaron dos tiempos de moliendas y en cada proceso se agregaron los insumos químicos bórax y mercurio. Por lo tanto, al final de cada prueba se agregaron por cada barril 300 g de bórax y 6 oz de mercurio.

- Segunda prueba en el entable: La cantidad de bórax fue de 175 g y para el mercurio fue una cantidad de 3 oz en distintos barriles; para esta segunda prueba al igual que la primera se realizaron dos tiempos de moliendas, para cada proceso de molienda se agregaron insumos químicos obteniendo al final de esta prueba una cantidad de 350 g de bórax y para el mercurio 6 oz.
- En la tercera y última prueba, la dosis fue de 125 g de bórax con relación al mercurio que fue de 3 oz por barriles separados. Para esta tercera prueba se realizaron también dos tiempos de moliendas, en cada proceso de molienda se agregaron insumos químicos, teniendo como resultados de cada barril 250 g de bórax y 6 oz para el mercurio.

Tabla 4. Relación de bórax y mercurio adicionados en los barriles por moliendas.

Pruebas	Primera Molienda		Segunda Molienda		Cantidades Totales	
	Cantidad de Bórax	Cantidad de Mercurio	Cantidad de Bórax	Cantidad de Mercurio	Bórax	Mercurio
1	150 g	3 oz	150 g	3 oz	300 g	6 oz
2	175 g	3 oz	175 g	3 oz	350 g	6 oz
3	125 g	3 oz	125 g	3 oz	250 g	6 oz

Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la tabla 4, en cada una de las pruebas la cantidad de mercurio fue constante con respecto a las variaciones de la cantidad de bórax, en cada una de las pruebas realizadas se logra determinar la recuperación de oro con el sustituto del mercurio. Es importante aclarar que, en las seis pruebas realizadas, los equipos e instrumentos utilizados en las pruebas contienen residuos mercuriales, debido a ello no se logra tener un desarrollo correcto de las pruebas; ya que no fue posible

encontrar un entable en el cual los instrumentos y equipos no estuviesen con residuos mercuriales es decir que se contara con equipos e instrumentos completamente nuevos.

Los resultados obtenidos en las pruebas fueron analizados con respecto a la literatura que incluye además la caracterización mineralógica de la zona de Suárez - Cauca. A partir de la literatura también se menciona la granulometría del oro para el desarrollo del análisis del proyecto, ya que son factores importantes para el proceso de molienda y con ello la recuperación de oro.

3.3 FASE 3: ELABORACIÓN DE PROTOCOLO

Para la elaboración de la guía metodológica del bórax como sustituto del mercurio, se logró realizar un diálogo con la comunidad minera del entable El Samán durante el respectivo acercamiento en el municipio de Suárez – Cauca. Dentro del diálogo se mencionaron aspectos importantes para el desarrollo del tema que son los siguientes: El alcance del proyecto y su facilidad de poderse desarrollar en el entable, el poder determinar el borato de sodio como sustituto de mercurio, los estudios previos con bórax ya realizados en los entables cercanos a la zona de estudio, las sanciones que implican el utilizar el mercurio según la ley 1658 del año 2013, los impactos ambientales negativos que genera el uso del mercurio y con ello las afectaciones a la salud que tiene el minero al estar expuesto a este químico. Después del acercamiento con la comunidad minera se realizaron cuatro preguntas a cada minero para un total de ocho mineros en el entable. Las preguntas fueron las siguientes:

1. ¿Hace uso de los elementos de protección personal?
2. ¿Conoce usted, si el mercurio en el proceso de extracción de oro es eficiente?
3. ¿Habías utilizado el bórax en el proceso de extracción de oro?

4. ¿Utilizaría el bórax para el proceso de extracción de oro?

3.3.1 Proyección de escenarios favorables para la guía metodológica para el uso del bórax

Mediante el aprendizaje basado en el proyecto y la participación de los mineros, en el desarrollo de este se logró identificar escenarios favorables para la puesta en marcha del proceso, en donde los mineros tuvieron la capacidad de observar el proceso con el bórax y en conjunto con ellos se evidenció una serie de problemas y limitantes en el proceso, los cuales abren paso a investigaciones futuras.

Basado a lo anterior, se llevó a cabo una serie de preguntas respecto al tema minero en la recuperación de oro, teniendo en cuenta algunas problemáticas sociales, ambientales y/o económicas que se presentan en el lugar y las cuales se fueron respondiendo con el desarrollo del trabajo. Las preguntas son las siguientes:

- ¿Cuál es la situación actual de la minería de oro en el entable de Suarez - Cauca?
- ¿Qué se busca en la minería de oro con relación a la nueva normatividad colombiana (ley 1658 de 2013)?
- ¿Qué visión tiene el minero en cuanto a un nuevo insumo como alternativa para la recuperación de oro?
- ¿Cómo desarrollar el proceso con bórax?
- ¿Posibles limitantes en el proceso con bórax?

A partir de las respuestas a estos interrogantes, se identificó cuáles eran los factores que llevaban a la búsqueda de una alternativa y cuáles eran sus beneficios y/o limitantes. Luego se planteó elaborar una guía donde el minero obtuviese los pasos a seguir en el proceso de recuperación de oro con bórax y así poder adaptarlo a su entorno.

Teniendo en cuenta las preguntas realizadas a la comunidad minera y los aspectos mencionados durante el acercamiento al entable se logró validar con la comunidad minera el desarrollo del proyecto. Dentro de la guía metodológica se menciona el procedimiento del uso del bórax para la recuperación de oro en las MAPES y con ello también los beneficios de uso del bórax con relación a los impactos ambientales y las afectaciones a la salud.

4 CAPÍTULO IV. RESULTADOS

El proyecto de investigación se desarrolló en el entable El Samán en el municipio de Suárez - Cauca, para la recuperación de oro en las MAPES, usando el bórax como sustituto químico del mercurio. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la investigación, los cuales corresponden a la caracterización del entable y la caracterización mineralógica basada en la literatura, además, se presentan los resultados de las pruebas de campo.

4.1 FASE 1: CARACTERIZACIÓN DEL ENTABLE MINERO EL SAMÁN

Se realizó el reconocimiento del entable El Samán en el municipio de Suárez - Cauca, el cual permitió identificar las condiciones del lugar y en conjunto la validación de la comunidad para el desarrollo de cada una de las pruebas; dentro de ese reconocimiento se realizó el conteo y mediciones de los materiales y herramientas que fueron propicios para el trabajo de campo. Dentro de las mediciones y conteo se pudo conocer el consumo del agua que se utiliza en los barriles, el caudal que se consume en el proceso del hidroseparador o elutriador del mineral proveniente del proceso de molienda en los barriles, también se conoció las distintas zonas de las cuales proviene el mineral y las condiciones sobre el manejo de los vertimientos de lodos los cuales carecen de un tratamiento y una disposición adecuada. Los mineros que realizan el proceso de recuperación de oro con mercurio en este entable lo hacen sin elementos de protección personal aumentando el riesgo y daños a la salud por exposición a este insumo.

En la siguiente tabla se muestran datos de la caracterización de entable, materiales y herramientas para el desarrollo de las pruebas.

Tabla 5. Caracterización del entable El Samán.

Detalle	Descripción
Barriles	10 unidades
Cuerpos moledores	55 unidades/barril
Tiempo de molienda	3 - 4 horas
RPM	56
Volumen de carga	50 kg
Caudal	1,62 L/seg
Zona del mineral	Maraveles, Desquite, Turbina, Tamboral y la Toma
Trituradora	1
Elutriador	1
Balde	2
Ponchera	6
Pala	2
Batea	1
Tanque de almacenamiento de agua	1
Pesa	1
Tela	2

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4 se presenta parte de la estructura del entable minero El Samán en Suárez - Cauca, el cual cuenta con un total de 10 barriles.



Figura 4. Entable minero en Suárez - Cauca.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.1 Caracterización mineralógica

Es importante conocer la composición mineralógica de los depósitos la cual determina el comportamiento de las menas en los procesos de beneficio o recuperación de oro. En la tabla 6 se presenta la caracterización de los sulfuros asociados a la mena del municipio de Suárez - Cauca, información que se obtuvo de los estudios del Servicio Geológico Colombiano, Ministerio de Minas y Energía, en la guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso del mercurio, en la cual se logra conocer características mineralógicas obtenidas a partir de análisis petrográficos, de metalografía, análisis por microsonda electrónica (EPMA), espectroscopía infrarroja, espectrometría Raman y microtermometría de inclusiones fluidas [63]. El material proveniente de zonas aledañas al entable minero El Samán como Maraveles, Desquite y la Toma, es triturado y empacado en costales para su posterior molienda en los barriles.

Tabla 6. Análisis de caracterización de los sulfuros asociados a la mena del municipio de Suárez – Cauca.

Metales Asociados a la Mena	Composición química y física	Ocurrencia de oro en los metales	Tipo de oro en metales	Forma del oro	Tamaño
Arsenopirita - Aspy (sulfuro de arsénico)	Fórmula: FeAsS Dureza: 5,5-6 Mohs Color: blanco a gris	El oro es incluido en arsenopirita (Aspy), asociado a galena (Gn) y rellenando grietas en marcasita, y un cristal de oro libre.	El tipo de oro presente en la zona de estudio es un oro amarillo entre 18 (750,00 milésimas) y 21,6 (900.00 milésimas) quilates, el porcentaje de oro puro es de 75 % y 90 %. Tipo electrum con contenido detectable de mercurio en algunas minas del municipio de Suárez la plata varía entre el 27 al 31 %; otros elementos identificados como anómalos en los granos de oro fueron el bismuto, con alto contenido de telurio (7 %), identificado en la partícula de oro de la muestra tomada en una de las minas de Suarez – Cauca.	Una de las formas en que se encuentra el oro adherido a otros metales es en vetas, diseminado cuando aparece en vetas, el oro se ha acumulado en una roca de forma tabular, por lo general en filones de cuarzo, cuando se desintegran las vetas o las rocas que contienen oro diseminado este es llevado por las corrientes de agua y constituye lo que se llama oro aluvial. Los filones auríferos formados por fracturamiento y relleno a partir de la inyección de fluidos hidrotermales generan halos de alteración de poca extensión en las zonas de cizalla o gouge con espesores se observa alteración fílica o cuarzo-sericítica, veta con relleno de cuarzo y alteración fílica asociada a la estructura con alteración propílica.	En el municipio de Suarez - Cauca el oro se presenta en tamaños que varían entre 10 y 70 µm, a un tamaño de 600 µm prácticamente todos los sulfuros aparecen como partículas libres; en un tamaño de 45 µm se habían liberado el 90 % de ellos (durante el proceso de recuperación de oro). Los sulfuros metálicos se presentan de manera masiva en el material de veta, el rango de tamaño del 81 % del oro en proporción por masa está en entre 1 y 50 µm, y son preponderantemente menores de 20 µm y el 19 % del oro se halla en partículas de entre 50 y 150 µm.
Esfalerita – Sp (sulfuro de zinc)	Fórmula: ZnS Dureza: 3.5-4 Mohs Color: varía entre amarillento y gris	El oro se encuentra incluido en la esfalerita			
Calcopirita – Cp (mena de cobre)	Fórmula: CuFeS ₂ Dureza: 3,5-4 Mohs Color: amarillo latón.	El oro se encuentra asociado e incluido en calcopirita			
Pirita –Py (sulfuro de hierro)	Fórmula: FeS ₂ Dureza: 6-6.5 Mohs Color: amarillo latón con una gama de color pálida	El oro se encuentra incluido en pirrotina			
Galena – Gn (mena de plomo)	Fórmula: PbS ₂ Dureza: 2,5 Mohs Color: Gris plomo	El oro asociado a galena			

Fuente: Elaboración propia. Basado en análisis del SGC [63].

El mineral que proviene de las minas principalmente del sector de maraveles es llevado a el entable en costales de 50 kg; con el fin de generar condiciones similares se peso el mineral antes de ser agregado a cada barril para las respectivas pruebas, el cual mediante poncheras se lleva a los barriles para posterior molienda.



Figura 5. Material proveniente de las minas.

Fuente: Elaboración propia, trabajo de campo.

4.1.2 Matriz de Vester de impactos ambientales

La herramienta utilizada para la determinación de impactos ambientales es una matriz que permite identificar los problemas de mayor relevancia en la zona de estudio. Esta matriz facilita la identificación de causas y efectos de una situación problemática. La tabla 7 presenta la identificación de cada problema con su respectivo código para así facilitar el análisis relacional.

Tabla 7. Asignación numérica de los problemas.

Código	Problemas
P1	Contaminación del aire
P2	Contaminación hídrica
P3	Contaminación del suelo
P4	Contaminación auditiva
P5	Contaminación paisajística
P6	Afección a la flora y fauna
P7	Efectos negativos a la salud
P8	El uso desmedido del mercurio
P9	Generación de vertimientos sin tratamiento
P10	Agotamiento de los recursos naturales no renovables

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los problemas identificados se debe proceder a realizar el análisis relacional. Para ello, se deben asignar ponderaciones que van desde 0 a 3 según el grado de influencia o causalidad a cada par de problemas identificados. El análisis relacional se realizó con base a las asignaciones de las siguientes ponderaciones como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 8. Ponderaciones según el grado de causalidad.

Valor	Descripción
0	No es causa
1	Es causa indirecta /causa leve
2	Es causa medianamente
3	Es causa muy directa/causa fuerte

Fuente: Elaboración propia.

En el análisis relacional de fila por fila es importante mantener la misma lógica durante todo el ejercicio donde se realiza la siguiente pregunta: ¿Qué grado de causa tiene el problema 1 sobre el problema 2?, hasta lograr completar toda la fila del problema 1. Se prosigue con el problema 2, enunciando el mismo interrogante y así sucesivamente hasta el problema 10. Los espacios sin ponderación numérica se deben a que no se logra hacer comparaciones con el mismo problema. Los resultados del análisis se indican en la tabla 9.

Tabla 9. Matriz de Vester.

PROBLEMAS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	TOTAL, ACTIVOS
Contaminación del aire	1		3	3	0	1	1	2	0	0	0	10
Contaminación hídrica	2	3		3	0	1	3	2	0	0	1	13
Contaminación del suelo	3	1	3		0	1	2	1	0	0	1	9
Contaminación auditiva	4	2	0	0		0	2	2	0	0	0	6
Contaminación paisajística	5	0	0	0	0		1	2	0	0	0	3
Afección a la flora y fauna	6	0	0	1	0	2		2	0	0	0	5
Efectos negativos a la salud	7	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
El uso desmedido del mercurio	8	3	3	3	0	1	3	3		2		18
Generación de vertimientos sin tratamiento	9	2	3	3	0	3	3	2	0		1	17
Agotamiento de los recursos naturales no renovables	10	0	0	0	0	2	1	1	0	0		4
	TOTAL, PASIVOS	11	12	13	0	11	16	17	0	2	3	

Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, es necesario asignar el rol de los problemas, observando su ubicación en el plano cartesiano de influencias y dependencias como se exhibe en la siguiente tabla.

Tabla 10. Asignación de rol de problemas.

Código	Problemas	Motricidad (Y)	Dependencia (X)	Rol del problema
P1	Contaminación del aire	10	11	Problemas pasivos
P2	Contaminación hídrica	13	12	Problema critico
P3	Contaminación del suelo	9	13	Problemas pasivos
P4	Contaminación auditiva	6	0	Problemas indiferentes
P5	Contaminación paisajística	3	11	Problemas pasivos
P6	Afección a la flora y fauna	5	16	Problemas pasivos
P7	Efectos negativos a la salud	0	17	Problemas pasivos
P8	El uso desmedido del mercurio	18	0	Problemas activos
P9	Generación de vertimientos sin tratamiento	17	2	Problemas activos
P10	Agotamiento de los recursos naturales no renovables	4	3	Problemas indiferentes

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Resultado de la Matriz de Vester

Cuadrante I (superior derecho) Problemas Críticos: Dentro del desarrollo de la Matriz de Vester en la gráfica de resultados se presentó un problema crítico, el cual se debe principalmente a la contaminación hídrica. La causa de esta problemática se presenta por el uso desmedido del mercurio y la generación de vertimientos sin tratamiento en la zona de Suárez - Cauca.

Cuadrante II (superior izquierdo) Problemas Pasivos: Dentro de este cuadrante se presentan los efectos de la contaminación del aire, la contaminación del suelo, la contaminación paisajística, afección a la flora y fauna y los efectos negativos a la salud. Estos problemas son el resultado del excesivo uso del mercurio, de las explotaciones no tecnificadas para la extracción del mineral, la

disposición final inadecuada de lodos que utiliza el minero para el proceso de recuperación de oro en la zona de Suárez - Cauca.

Cuadrante III (inferior izquierdo) Problemas Indiferentes: Dentro de este cuadrante se presentan la contaminación auditiva y el agotamiento de los recursos naturales no renovables, los cuales no se incluyen en el árbol de problemas debido a que son indiferentes ante el impacto ambiental en general. Aunque son de alta prioridad de manera individual, no tienen gran influencia frente al resto de factores, por ende, estos se consideran de baja prioridad dentro del sistema analizado.

Cuadrante IV (inferior derecho) Problemas Activos: En este cuadrante se refleja las causas principales del problema crítico los cuales son la generación de vertimientos sin tratamiento y el uso desmedido del mercurio, estos también tienen una alta influencia sobre el resto de los factores. El minero no tiene un control en cuanto al uso necesario del mercurio; adicionalmente no logra tener un aprovechamiento de los recursos minerales, esto se debe a la desinformación que algunos mineros acarrea y como resultado se presentan este tipo de entorno el cual conlleva a generar un gran impacto ambiental [64] [65].

La figura 6 muestra la distribución de los factores que tienen influencia en el sector del entable el Samán de Suárez, estos dan una percepción del problema existente por el uso del mercurio e indican cual es el problema crítico que a su vez puede influir en otros. Aquellos factores ubicados en la parte inferior izquierda son considerados indiferentes, porque se generan a partir del uso del mercurio, pero su impacto en el medio ambiente es irrelevante.

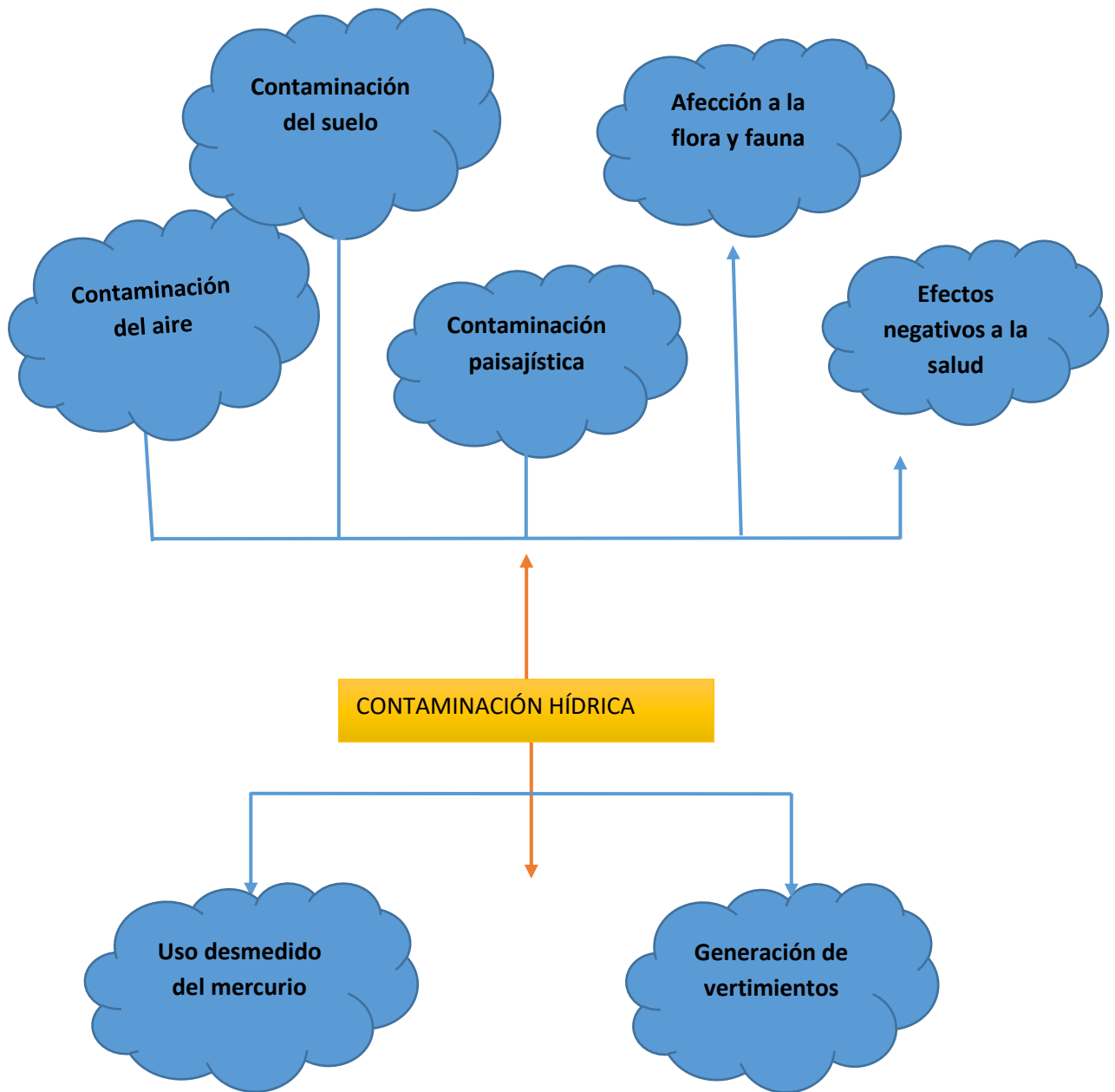


Figura 7. Árbol de problema Matriz de Vester.

Fuente: Elaboración propia.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA DEL ENTABLE MINERO

4.2.1. Proceso de recuperación de oro

Durante el proceso de extracción de oro se realizó la técnica que tradicionalmente usan los mineros en las MAPES en el municipio de Suárez - Cauca. El propósito fue mantener las mismas condiciones y así no generar mayores cambios en su metodología de trabajo salvo por el uso de bórax como sustituto; el proceso que se describe a continuación de recuperación de oro es el mismo para ambos insumos (mercurio y bórax).

Extracción: La minería que se realiza en esta zona es de tipo subterránea, por lo cual para el proceso de extracción los mineros explotaron los yacimientos de roca dura mediante el uso de explosivos.

Transporte: El mineral extraído del interior de las minas fue llevado a los entables mineros en bultos de 50 kg aproximadamente haciendo uso de animales para el transporte de carga como los caballos y/o en camionetas cuando la carga era muy grande.

Trituración: El proceso de trituración del mineral se hizo de forma manual y mediante el uso de porras para reducir los grandes tamaños de la roca, luego se colocó el material en trituradoras de quijadas para obtener tamaños de 12 mm aproximadamente.

Molienda: Proceso posterior a la trituración en donde se buscó reducir el tamaño del material en barriles los cuales contienen 55 bolas de acero que permiten la pulverización. El material se colocó inicialmente por 3 horas y al cabo de este tiempo se interrumpió el proceso de los barriles para agregar miel, jabón, mercurio o en su defecto bórax al barril comparativo para la sustitución con las cantidades indicadas en la tabla 11. Luego de esto se colocó por 30 minutos adicionales. La molienda se realizó de 2 a 4 veces dependiendo del mineral hasta alcanzar la liberación de oro.

Tabla 11. Cantidad de insumos adicionados por barril en cada molienda.

Insumo	Cantidad
Mercurio	3-5 oz
Bórax	125-175 g
Jabón de loza	3-5 g
Miel purga	7-15 oz

Fuente: Elaboración propia.

Se adicionó miel durante el proceso de molienda para que el mercurio se conserve y el jabón se agregó con el fin de precipitar el oro, etapas empíricas realizadas por los mineros. La molienda fue un factor muy importante en la conminución del mineral que permitió recuperar el oro.

Lavado en elutriador y poncheras: Luego del proceso de molienda se sacó el material y se realizó un lavado en el elutriador que es un envase de forma cilíndrica donde se procedió a la recolección de la amalgama (mercurio y oro). El agua se inyecta lateralmente con una manguera por un orificio en la parte inferior, generando así un remolino que se drena por un agujero elevado en el centro. El mineral se vierte a un recipiente de forma circular, ubicado en la parte superior del elutriador de 42 cm de ancho y al girar el agua, las partículas ligeras se suspenden mientras que las partículas más pesadas (como el oro) quedan precipitadas. Las partículas suspendidas pasan por el orificio elevado a un canal rectangular. En algunas ocasiones el lavado se realiza de forma manual en poncheras.

Recuperación en batea: En esta parte del proceso se separa el mercurio del concentrado por medio de bateas de madera (recipiente de forma cóncava) en donde el oro por ser más denso que la arena se asienta en el fondo del recipiente al ser agitado, utilizando luego una tela para separar el mercurio líquido (que es reutilizado en las otras moliendas) de la amalgama de color plata. De igual forma el proceso de recuperación de oro con bórax se realiza en batea donde las partículas son sedimentadas.

Fundición: Finalmente se calienta la amalgama con el fin de evaporar el mercurio y eliminar impurezas de este. El bórax contribuyó en el proceso de quema evitando que se perdiera una mayor cantidad de oro.

4.2.2. Resultados obtenidos en pruebas de campo

Para el desarrollo de las pruebas de campo se tuvo en cuenta las investigaciones preliminares sobre el uso del bórax, en donde se encontró que la dosis adecuada para la recuperación de oro estaba en un rango de 100 a 200 g. A partir de estos estudios se realizaron tres pruebas con valores dentro de ese rango (125, 150 y 175 g), de las cuales algunas proporcionaron resultados favorables con la implementación del borato de sodio en el proceso tradicional de recuperación de oro en el entable minero El Samán en el departamento de Suárez - Cauca.

4.2.2.1. Primera prueba

Las cantidades de bórax propuestas en la metodología para utilizar en el proceso de recuperación de oro se presentan por cada molienda, en el caso de la primera prueba el valor propuesto es de 150 g la cual se utilizó esta cantidad por molienda, obteniendo así una cantidad total al finalizar el proceso de 300 g; puesto que el número de moliendas puede variar según la facilidad y el grado de molienda que el mineral requiere para el proceso de recuperación de oro, este proceso es importante ya que de este depende la liberación del mineral. Adicionalmente, cada vez que se agregó bórax a una molienda se adicionó el resto de los insumos (miel y jabón), e igualmente en el caso del mercurio por cada molienda se agregaron las cantidades de insumos propuestos.

En la primera prueba se dispuso en los barriles una cantidad de 50 kg por barril, en donde se agregó 20 L de agua a cada barril y se inició un proceso de molienda de 3 horas, al cabo de este tiempo se detuvo el proceso para agregar 3 oz de mercurio a uno de los barriles y simultáneamente 150 g de bórax a otro barril, se agregó

también 7 oz de miel y 3 g de jabón en ambos con el fin de lograr que la técnica sea la misma. Posteriormente se colocó a molienda por 30 minutos adicionales para luego realizar el lavado en 3 recipientes semiesférico (poncheras). La figura 8 describe el diagrama comparativo de bórax y mercurio en la primera prueba.

Después del lavado en los recipientes (poncheras) se inició la segunda molienda y para el barril que contiene bórax se agregaron 3 g de jabón y 7 oz de miel con una cantidad adicional de 150 g de bórax. El mismo proceso se replicó para el barril que contiene mercurio en cuanto a las cantidades de jabón y miel, pero la cantidad de mercurio adicionada fue de 3 oz. En esta segunda molienda el proceso tardó 1 hora respectiva y finalmente se realizó la recuperación en batea y se llevó a fundición. El minero dentro de su proceso de recuperación de oro en cada molienda agrega insumos que favorecen una mayor recuperación de oro. Cabe mencionar que el proceso de fundición no se realiza en el entable.



Proceso de Molienda

50 kg de mineral/barril
20 litros H₂O

Primera molienda: 3 horas en barriles sin insumos

Termina primera molienda:
Se agrega insumos

Barril con mercurio

Se agrega:
3 onzas de mercurio
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón

Barril con bórax

Se agrega:
150 gramos de bórax
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón



Submolienda: 30 min

Deslode

Concentración de material para posterior deslode.

Mercurio

Lavado en elutriador: 1 hora
aproximadamente
Caudal: 1,62 L/s
Paso siguiente material en canaletas

Bórax

Lavado: 1,5 horas aproximadamente
40 L/ponchera

Segunda molienda

El material deslodgeado es cargado nuevamente en los barriles para segunda molienda de 1 hora

Mineral deslodgeado
10 litros H₂O
Se agrega:
3 oz de mercurio
7 oz de miel
3 g de jabón

Mineral deslodgeado
10 litros H₂O
Se agrega:
150 g de bórax
7 oz de miel
3 g de jabón

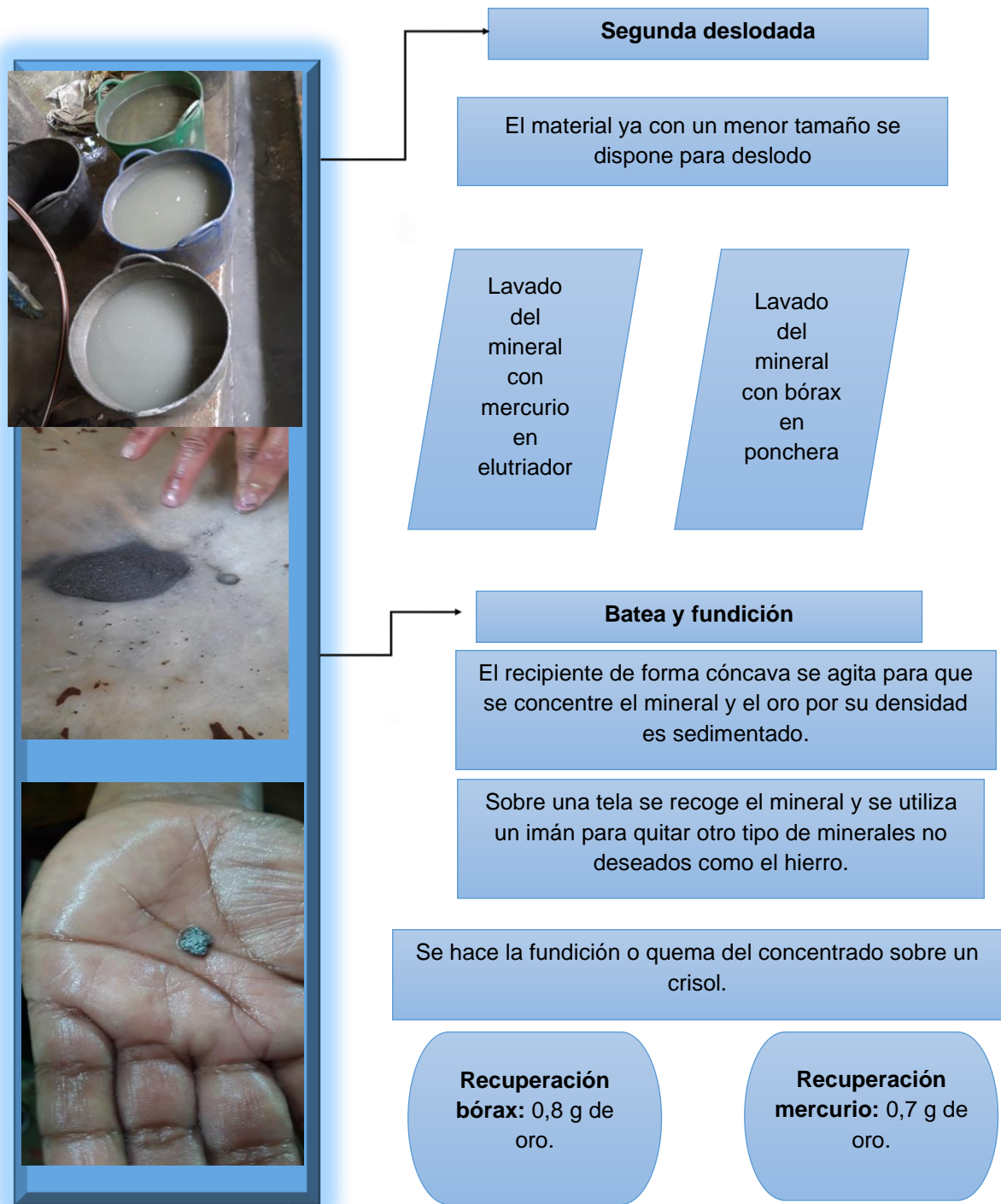


Figura 8. Diagrama de la primera prueba comparativa.

En esta primera prueba el proceso de recuperación de oro fue eficaz para ambos procesos utilizando como insumos químicos el bórax y mercurio. Cabe resaltar que el proceso de bórax en la recuperación de oro es mayor que la del mercurio, el resultado para el bórax es de 0,8 g de oro y para el mercurio es de 0,7 g de oro las diferencias es tan solo de 1 décima, la dosis de bórax implementada en esta primera prueba es de gran beneficio para el minero aunque su resultado haya sido muy similar con la del mercurio; en cada una de las pruebas los resultados de recuperación de oro son reflejados en amalgama, como se menciona en la metodología esto se debe a la contaminación de mercurio de los instrumentos y/o herramientas que posee el entable.

4.2.2.2. Segunda prueba

En la segunda prueba la cantidad de bórax trabajada fue de 175 g y de 3 oz para el mercurio, en conjunto con la primera prueba la cantidad del material trabajada por cada barril fue de 50 kg y 20 L de agua. Se inició el proceso de molienda con un tiempo de 3 horas, una vez finalizada el tiempo de molienda el proceso se detuvo por 9 horas por autorización del propietario del entable y del mineral. Una vez transcurrida las 9 horas se continuó con el debido proceso y se agregaron por cada barril 7 oz de miel y 3 g de jabón, para el barril del bórax la cantidad fue 175 g de bórax y para el barril de mercurio una cantidad de 3 oz. Una vez agregado cada insumo a cada barril se dejó moler por 50 minutos, éste aumento adicional de 20 minutos con respecto a la primera prueba se debe a que el minero consideró que el material necesitaba un tiempo extra de molienda por las 9 horas que estuvo en suspensión o reposo. Uno de los alcances del minero en el proceso de recuperación de oro es dejar que el mineral este completamente liberado.

Terminado la primera molienda se pasó al elutriador para su respectivo lavado y luego se transfirió a los barriles para la segunda molienda adicionando los insumos en la misma cantidad que en la primera molienda y se dejó moler por 3 horas. El

incremento en el tiempo se hizo considerando que al material le faltaba alcanzar la textura adecuada o grado de liberación, el cual permitiera tener el tamaño necesario para liberar la mena del resto de la ganga, la ganga son los elementos que carecen de un valor comercial y no son de interés en el proceso de recuperación de oro; de este modo la recuperación de oro podría ser eficaz. Una vez transcurridas las 3 horas se realizó el lavado en elutriador y finalmente se llevó a cabo la recuperación en batea y fundición.



Proceso de Molienda

50 kg de mineral/barril
20 litros H₂O

Primera molienda: 3 horas en barriles sin insumos

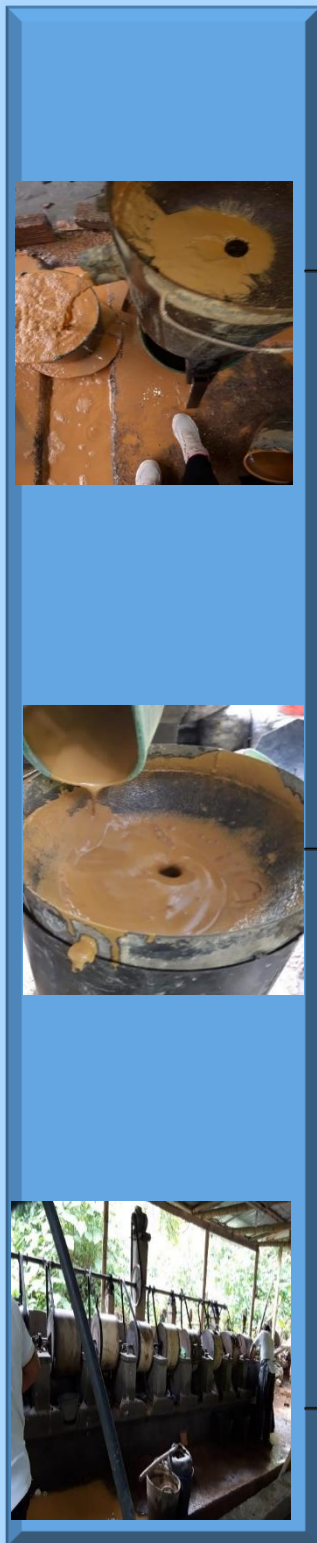
Termina primera molienda:
Se agrega insumos

Barril con mercurio

Se agrega:
3 onzas de mercurio
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón

Barril con bórax

Se agrega:
175 gramos de bórax
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón



Submolienda: 50 min

Deslode

Concentración de material en poncheras para posterior deslode.

Mercurio

Lavado en elutriador: 1 hora aproximadamente
Caudal promedio: 1,62 L/s
Paso siguiente material en canaletas

Bórax

Lavado en elutriador: 1,20 horas aproximadamente
Caudal promedio: 1,62 L/s
Canaletas lavadas antes de mineral con bórax

Segunda molienda

El material deslodgeado es cargado nuevamente en los barriles para tercera molienda de 3 horas.

Mineral deslodgeado
20 L H₂O
Se agrega:
3 oz de mercurio
7 oz de miel de purga
3 g de jabón

Mineral deslodgeado
20 L H₂O
Se agrega:
175 g de bórax
7 oz de miel de purga
3 g de jabón

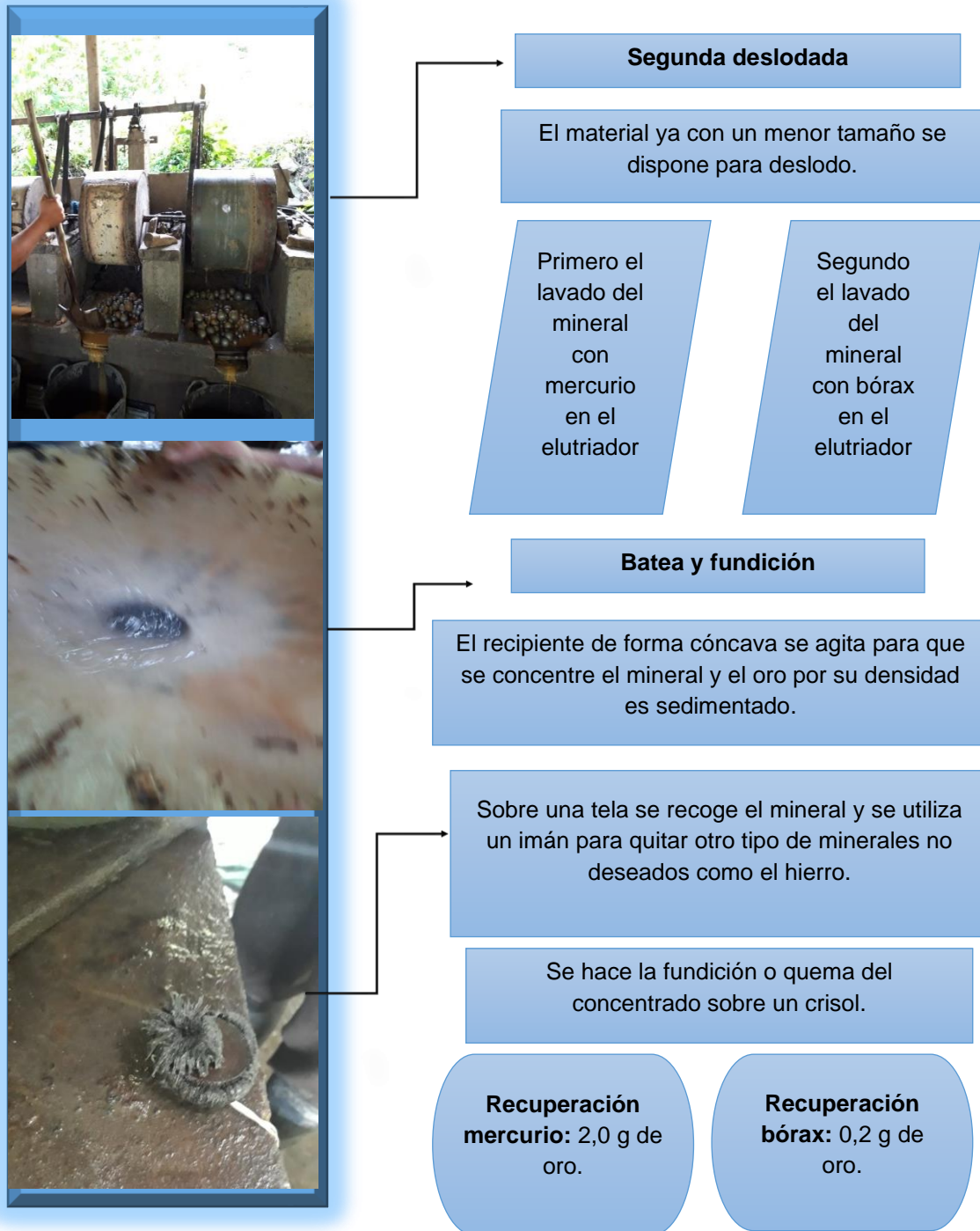


Figura 9. Diagrama de la segunda prueba comparativa.

En esta segunda prueba el proceso de recuperación de oro fue eficaz para el método del mercurio, las diferencias en sus resultados fueron representativas, el mercurio con recuperación de 2,0 g de oro y el bórax con una recuperación de 0,2 g de oro teniendo una diferencia de 1,8 g de oro para esta segunda prueba. Se deduce que la cantidad de 175 g de bórax utilizada en el método de extracción de oro no es conveniente para una recuperación eficaz de oro y una sustitución del mercurio en minería de oro artesanal y a pequeña escala.

4.2.2.3. Tercera prueba

Para el proceso de recuperación de oro en la tercera y última prueba al igual que en las anteriores, las cantidades de material y agua fueron exactamente las mismas para cada barril (50 kg de material y 20 L de agua). Para el barril con bórax se adicionaron 125 g de bórax, 7 oz de miel y 3 g de jabón. Con respecto al barril con mercurio se agregaron 3 oz de mercurio y se mantuvieron las mismas dosis para la miel y jabón. Luego se procedió al proceso de molienda el cual tardó 3 horas. Al finalizar el tiempo de molienda se depositó el material en los recipientes semiesféricos (poncheras) para su respectivo lavado en el elutriador.

En la segunda molienda se mezclaron los insumos en las mismas proporciones como se describieron anteriormente en la primera molienda, con la única diferencia en su tiempo. La segunda molienda tomó 1 hora y luego se procedió a la recuperación de oro en batea y fundición.



Proceso de molienda

50 kg de mineral/barril
20 litros H₂O

Primera molienda: 3 horas en
barriles

Primera molienda:
Se agrega insumos

Barril con mercurio

Se agrega:
3 onzas de mercurio
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón

Barril con bórax

Se agrega:
125 gramos de bórax
7 onzas de miel de purga
3 gramos de jabón



Deslode

Concentración de material en poncheras para posterior deslode.

Bórax

Mercurio



Lavado en el elutriador: 37 min aproximadamente
Caudal: 1,62 L/s
Paso siguiente material en canaletas

Segunda molienda

El material deslodgeado es cargado nuevamente en los barriles para tercera molienda de 1 hora.



Mineral deslodgeado
15 litros H₂O
Se agrega:
3 oz de mercurio
7 oz de miel de purga
3 g de jabón

Mineral deslodgeado
15 litros H₂O
Se agrega:
125 g de bórax
7 oz de miel de purga
3 g de jabón

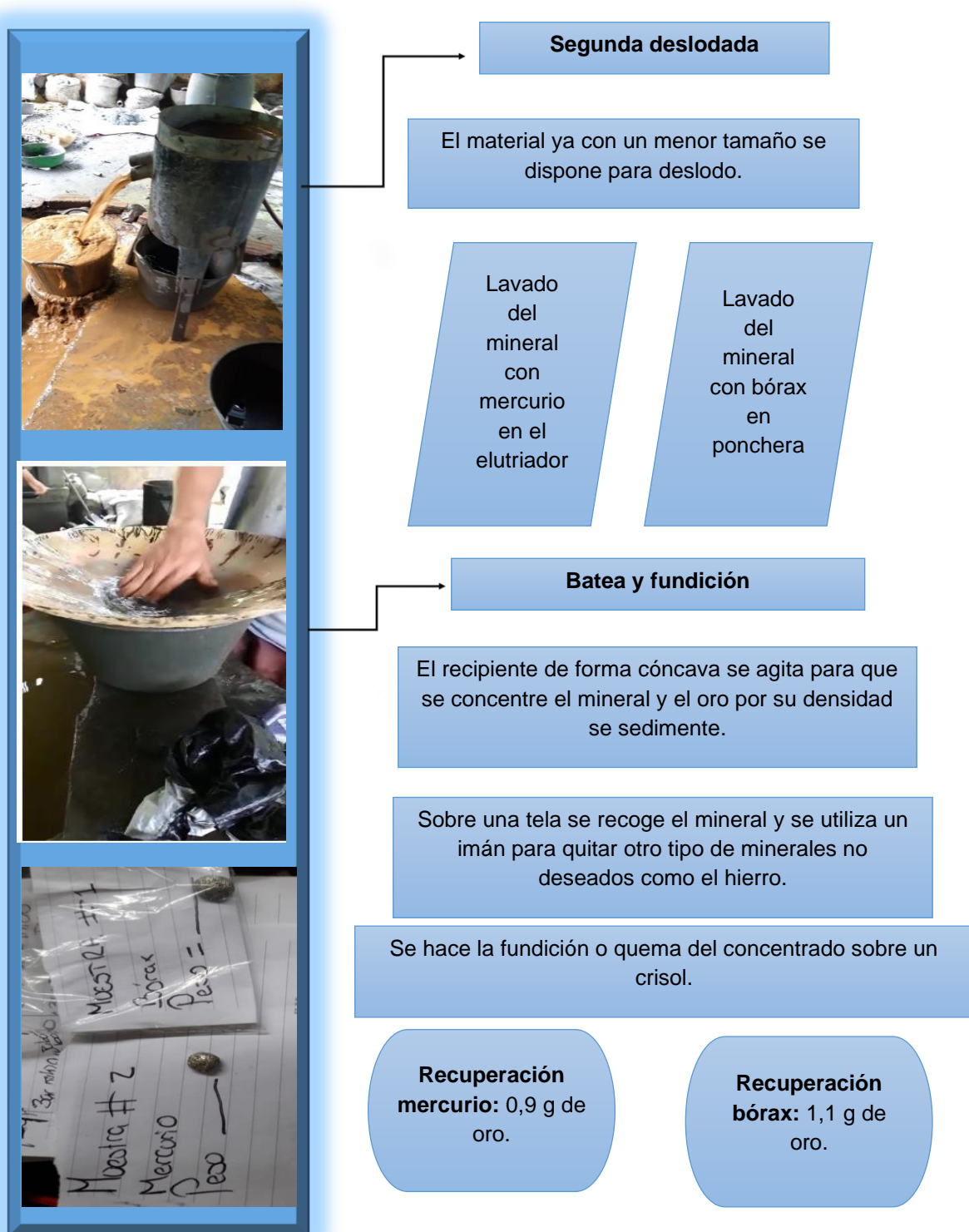


Figura 10. Diagrama de la tercera prueba comparativa.

En la última prueba como se logra evidenciar en los resultados, los procesos de recuperación de oro en minería de oro artesanal y a pequeña escala con bórax y mercurio fueron favorables, obteniendo para el proceso de mercurio cantidades de recuperación de oro de 0,9 g y para el bórax cantidades de 1,1 g de oro, siendo más favorable los resultados obtenidos con bórax. Esta prueba demuestra que la dosis a recuperar una cantidad favorable de oro es de 125 g de borato de sodio para los procesos de minería artesanal. Es importante tener en cuenta lo relevante que deberá ser la composición mineralógica donde se extrae el mineral bruto o mena ya que de ello también depende las cantidades de molienda que requiere el mineral.

La siguiente tabla contiene los resultados del proceso de recuperación de oro donde se usaron insumos químicos (bórax, mercurio, jabón y miel), por cada cantidad agregada de insumos químicos también se muestra la cantidad en gramos de oro recuperada en cada prueba.

Tabla 12. Cantidad de insumos y recuperación de oro.

Prueba de campo					
N°	Insumos Químicos	Cantidad Insumo	Jabón	Miel	Recuperación de oro
1	Bórax	150 g	3 g	7 oz	0,8 g
	Mercurio	3 oz	3 g	7 oz	0,7 g
2	Bórax	175 g	3 g	7 oz	0,2 g
	Mercurio	3 oz	3 g	7 oz	2,0 g
3	Bórax	125 g	3 g	7 oz	1,1 g
	Mercurio	3 oz	3 g	7 oz	0,9 g

Fuente: Elaboración propia.

4.3. FASE 3. ELABORACIÓN DE PROTOCOLO

La guía metodológica se realizó basada en las preguntas y respuestas que surgieron durante el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta la técnica utilizada por los mineros en el entable El Samán en Suárez - Cauca y de los resultados que se obtuvieron en este proceso. No contiene pruebas para los distintos tipos de materiales, tamaño de oro y otros factores mineralógicos que son de gran importancia en la recuperación de oro, por tal motivo, este protocolo solo puede ser utilizado como una referencia o estudio preliminar sobre los pasos que se siguieron y las variables que se deben tener en cuenta para futuras investigaciones, es conveniente recalcar que se deben ampliar las investigaciones sobre el uso del bórax a fin de estandarizar el método.

4.3.1. Encuesta

La encuesta fue realizada con el fin de conocer al minero, la experiencia que lleva con el mercurio y el conocimiento que tiene del sustituto (borato de sodio), con el desarrollo de la encuesta se cumple el objetivo de poder llegar al minero y enlazar la propuesta del bórax para la recuperación de oro en el entable. Cada una de las preguntas fueron esenciales para la elaboración del manual práctico del bórax como sustituto de mercurio, las preguntas se presentan a continuación:

1. ¿Hace uso de los elementos de protección personal, EPP?

CANTIDAD DE MINEROS	Si	No	A veces
1		X	
2		X	
3			X
4		X	
5		X	
6			X
7			X
8		X	

En la encuesta realizada a los mineros del entable, se observó que el uso de EPP es deficiente, puesto que ninguno de ellos hace uso correcto de los mismos; en ocasiones, algunos de ellos utilizan partes de los EPP, los elementos que frecuentemente utiliza el minero son las botas y adicionalmente guantes de seguridad. De esta forma exponen su salud ante los posibles efectos nocivos a causa del uso del mercurio en el proceso de extracción de oro.

2. ¿Conoce usted, si el mercurio en el proceso de extracción de oro es eficiente?

CANTIDAD DE MINEROS	SI	NO
1	X	
2	X	
3	X	
4	X	
5	X	
6	X	
7	X	
8	X	

De acuerdo con las descripciones hechas por los mineros, las respuestas fueron asertivas porque es un proceso que han venido desarrollando tradicionalmente y de forma empírica por varias generaciones, de tal forma que ellos han aprendido a utilizar el mercurio y la cantidad promedio utilizada es de 3 oz relativamente, cantidad que el minero asegura tener una garantía de recuperación eficiente de oro.

3. ¿Había utilizado el bórax en el proceso de extracción de oro?

CANTIDAD DE MINERO	Sí, pero no funcionó	Sí, me funcionó	No he trabajado
1			X
2			X
3	X		
4			X
5			X
6	X		
7			X
8			X

Solo dos de ocho mineros en el entable utilizaron el bórax para la extracción de oro, los resultados obtenidos en ese proceso no fueron satisfactorios ya que no conocían una técnica y/o proceso que pudiesen seguir y además no tenían una dosis o rango en la cual lograsen obtener resultados favorables, por lo cual este proyecto que involucra la recuperación de oro con bórax fue un aprendizaje para los mineros y fue de importancia la idea de detallar el procedimiento.

4. ¿Utilizaría el bórax para el proceso de extracción de oro?

CANTIDAD DE MINEROS	SI	NO
1	X	
2	X	
3	X	
4	X	
5	X	
6	X	
7	X	
8	X	

A pesar de que sólo dos mineros sabían del proceso con bórax con resultados desfavorables, todos estuvieron de acuerdo en utilizar el bórax como insumo para

la extracción de oro con el fin de generar nuevos conocimientos y mejorar las condiciones sociales, saludables, ambientales y económicas de la zona.

4.3.2. Proyección de escenarios favorables para la guía metodológica para el uso del bórax

Para la presentación de los escenarios favorables, se tuvo en cuenta las variables del proceso con bórax para la apropiación del método en cada MAPE que permitirán la validación del método en un futuro, estos se encuentran en la guía. Además, de los interrogantes que surgieron a partir de del desarrollo del proceso de recuperación de oro utilizando el bórax como sustituto químico, estos interrogantes se responden de acuerdo a la percepción del minero y las observaciones hechas a medida en que avanzaba el proyecto los cuales contribuyeron a el aporte teórico, indicando que es importante aplicar adecuadamente la dosis, tiempo y grado de molienda para cada tipo de mineral.

4.3.3. Interrogantes durante el proceso de recuperación de oro con bórax

- ¿Cuál es la situación actual de la minería de oro en el entable de Suárez - Cauca?

Actualmente, en el entable se desarrollan procesos de extracción de oro con mercurio, los cuales se realizan sin EPP, no cuentan con vertimientos adecuados de sus lodos, el costo que deben pagar por el uso de mercurio es alto y no favorece a las familias que tienen como única fuente de ingresos los recursos provenientes de la minería de oro. Estos según la ley colombiana deben eliminar de sus procesos el mercurio, el cual causa daño en el ambiente y a la salud de los mineros.

- ¿Qué se busca en el entable con relación a la nueva normatividad colombiana (ley 1658 de 2013)?

En el entable se busca conseguir insumos o procesos que eliminen el mercurio de sus procesos mineros con el fin de reducir los impactos ambientales ocasionados, por ende, los mineros están prestos a probar nuevos procesos que cumplan con la normatividad sin afectar su economía.

- ¿Qué beneficios se esperan del bórax como alternativa de recuperación de oro y cómo desarrollar el proceso con bórax?

Se espera que este sea capaz de recuperar cantidad similares o mayores al mercurio, que permita al minero optar por una alternativa limpia que no perjudique su salud y cumpla con los estándares mínimos de la ley colombiana en cuanto a seguridad en el territorio y reducción de impactos ambientales.

Para que el minero pudiese seguir el procedimiento, se sugirió un formato guía en el cual se describe el proceso paso a paso basado en los mejores resultados obtenidos en esta investigación preliminar.

- ¿Posibles limitantes en el proceso con bórax y escenarios favorables para el uso del bórax?

Dentro del procesos se evidenció que los barriles estaban contaminados con mercurio por ende uno de los escenarios favorables para la implementación de este proceso debe ser un entable limpio, es decir, donde no se haya utilizado antes el mercurio para tener mejores resultados y poder comprobar el porcentaje de eficiencia del bórax; otro dato a tener en cuenta es el de realizar pruebas para la identificación del cantidad de oro presente en el mineral y saber con mayor exactitud los porcentajes de recuperación.

Con base a lo mencionado anteriormente, se desarrolló la guía metodológica del bórax, teniendo como eje central el proceso tradicional del entable El Samán y los resultados favorables del proceso de sustitución de mercurio bajo esas condiciones.

4.4. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE RECUPERACIÓN DEL BÓRAX

En el proceso de recuperación de oro en la minería artesanal del entable El Samán del municipio de Suárez - Cauca en el año 2019, se realizaron una serie de pruebas de recuperación de oro con bórax y mercurio. Con respecto al bórax, se obtuvieron datos favorables de recuperación de oro en dos de las tres pruebas y en el caso del mercurio en las tres pruebas realizadas se obtuvieron resultados favorables.

Cabe destacar que para el desarrollo de cada una de las pruebas en el entable no se realizó un experimento sino una prueba de ensayo y error, por tal motivo, se tomó exactamente las condiciones y/o variables que la comunidad minera del entable tradicionalmente trabaja; el minero estableció: la cantidad de mercurio, cantidad de material (mena), cantidad de agua, barriles, cantidades de insumos (miel y jabón), los tiempos de molienda (los cuales fueron distintos en cada prueba), y los equipos e instrumentos para su recuperación. Para las cantidades de bórax utilizadas en el estudio preliminar en mención, fueron tomadas del estudio realizados por Rojas *et al.* y Juanillo *et al.*, donde se mencionan datos favorables de recuperación de oro en cantidades de bórax de 100 - 200 g.

Los resultados obtenidos en las tres pruebas realizadas se muestran en la figura 11. En cada prueba se llevó a cabo el proceso tradicional del entable para la extracción de oro, en donde la cantidad de mercurio permaneció constante (3 oz) y solamente se varió la cantidad de bórax (125, 150 y 175 g), con el fin de identificar o encontrar un rango más cercano a la dosis óptima que permita tener mejores resultados en el producto final con las condiciones expuesta anteriormente.

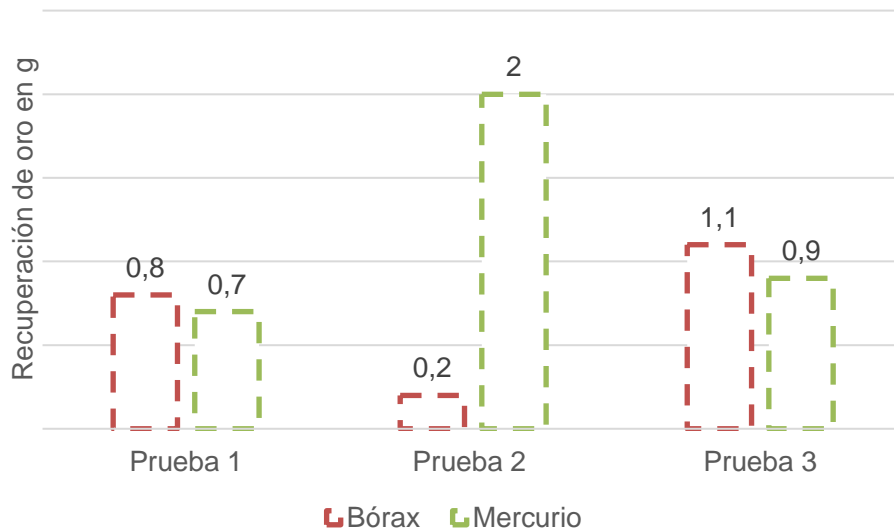


Figura 11. Comparación de la recuperación de oro con mercurio vs. recuperación de oro con bórax en las MAPEs en Suárez - Cauca.

Fuente: Elaboración propia.

Como se evidencia en la figura 12, las cantidades agregadas de bórax fueron 150 g para la primera prueba, 175 g para la segunda prueba y 125 g para la tercera prueba. Se puede observar que a medida en que se incrementa la dosis de bórax para el proceso de extracción de oro, la cantidad de recuperación de oro disminuye. Se coincide con una de las revisiones bibliográficas de Juanillo *et al.* y Rojas *et al.*; donde logran determinar que a partir de cantidades mayores o iguales a 100 g de bórax, se obtiene una recuperación favorable de oro; pero para valores similares a 200 g ésta disminuye. De manera similar, los resultados con mayor recuperación en este proceso se encontraron en un rango de 125 g – 150 g, en tal sentido los resultados anteriores permiten identificar este rango como propicio para investigaciones futuras a fin de encontrar la dosis óptima. [18] [27]

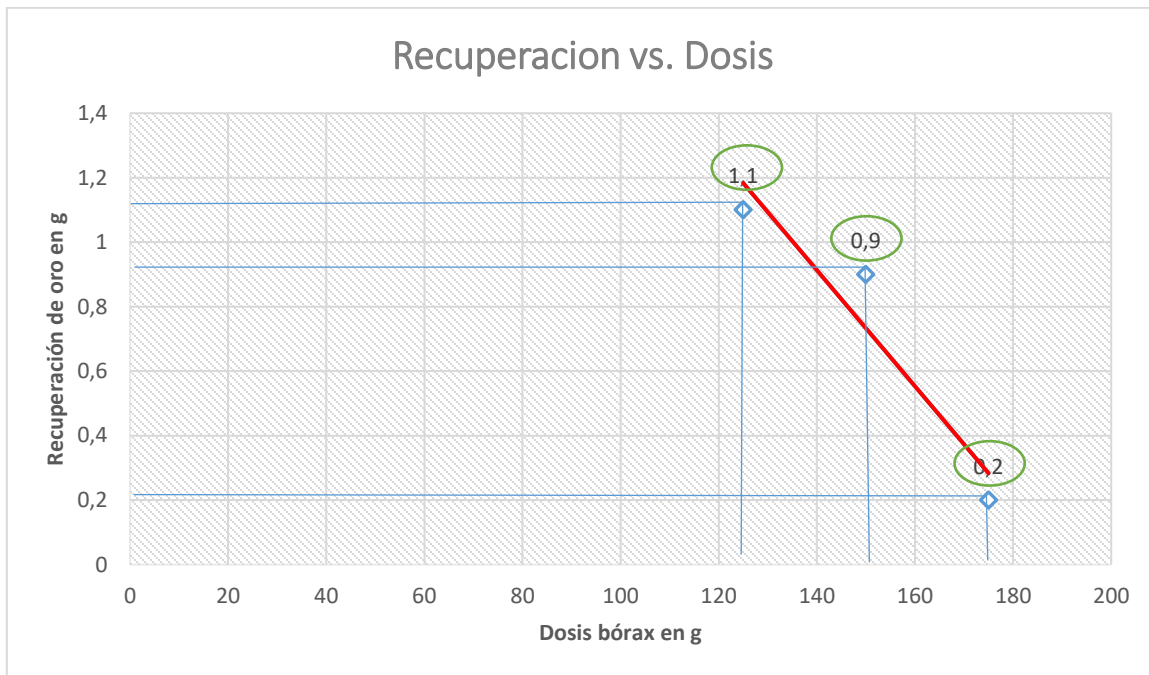


Figura 12. Comportamiento de recuperación de oro respecto a la cantidad de bórax utilizado.

Fuente: Elaboración propia.

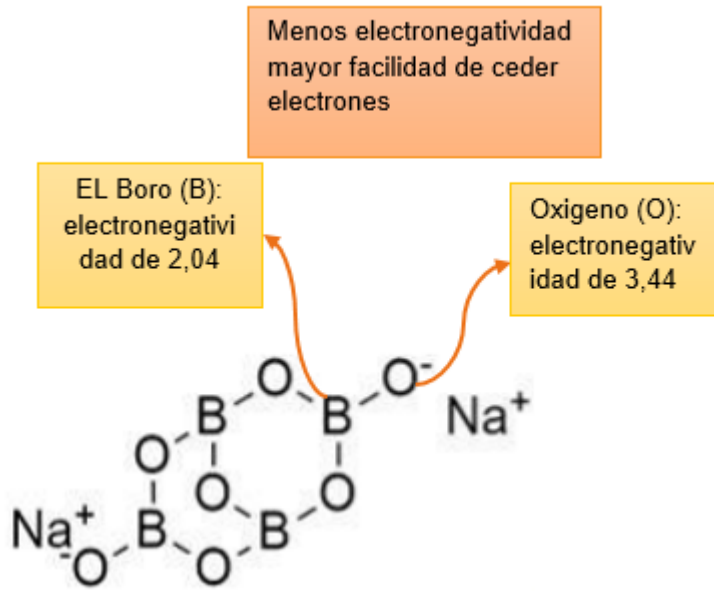
En el entable donde se realizaron cada una de las pruebas, en el proceso de molienda se encontró que los barriles estaban altamente contaminados con mercurio y en todas las pruebas realizadas con bórax la recuperación de oro se dio con contaminación de mercurio (oro amalgamado), debido a las altas cantidades que los mineros utilizan y porque este es altamente acumulable [28].

En este sentido se comprende que, los resultados con bórax en la recuperación de oro en el entable, las condiciones, el tipo de material de la mena entre otros factores mencionados anteriormente en la metodología, fueron causales para el rendimiento en la prueba 1 y 3. En cuanto a la segunda prueba realizada con bórax en donde no

hubo satisfactorios resultados de beneficio de oro, es inevitable mencionar que las condiciones de la metodología implementada por la comunidad minera del entable para este proceso no fueron de gran beneficio para el uso del bórax, ya que en cuanto al mercurio ocurre totalmente lo contrario.

En los estados de Goa y Karnataka en la India, aunque no mencionan la metodología del uso del bórax en la recuperación de oro, los mineros de la zona durante el desarrollo de las pruebas afirman que los resultados de recuperación de oro con bórax mejoraron significativamente la captura del metal oro, siendo este más económico que el método de amalgamación y siendo un proceso de evidencia de un caso de innovación para la minería artesanal y a pequeña escala [66]. Es importante mencionar que el proceso de recuperación de oro con el método del bórax no es apropiado para cualquier tipo de mineral, puesto que en casos donde el tamaño del grano es muy fino o rico en azufre puede llegar a no ser susceptible; estos resultados dependerán si se tiene presente un análisis de laboratorio de la caracterización del mineral antes del proceso de recuperación, para así lograr tener un proceso de molienda eficiente [67].

A.



B.

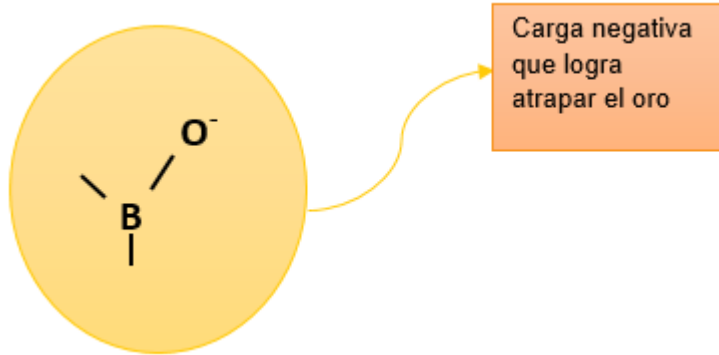


Figura 13. Proceso del bórax.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 13 (A) el oxígeno es negativo, pero al unirse con el boro logra aumentar su carga negativa ya que recibe electrones del boro. La carga negativa es aquella que le permite atrapar el oro generando una interacción de Van der Waals (conjunto de fuerzas atractivas y repulsivas que se producen en las moléculas por la presencia

y ausencia de electrones) aún así, la interacción es débil ya que no logra que el oro cambie de estado de oxidación [68].

El uso del bórax genera una rentabilidad económica como se observa en la tabla 13, debido a que su costo es muy bajo comparado con el mercurio; por otro lado, los impactos ambientales que el mercurio ocasiona tienen una alta incidencia en la zona de Suárez - Cauca, donde se ha visto afectada la población minera y la comunidad cercana donde se realiza el proceso de recuperación.

A continuación, la tabla de costos vs. beneficio en el entable minero El Samán en Suárez – Cauca, el cual consta de 10 barriles.

Tabla 13. Costos vs. beneficio.

Elemento	Unidad	Precio	Cant.	Consumo por barril	Promedio barriles	Total \$ Entables
Mercurio	Kilo	\$1'500.000	37 oz	3-5 oz	10	\$1'217.000
Bórax	Kilo	\$7.180	1000 g	100 g		\$7.180

Fuente: Elaboración propia [27].

En la tabla 13 se puede decir que la cantidad en gramos de borato de sodio utilizada es mucho mayor a la cantidad de mercurio en gramos que se utilizó en la recuperación de oro, pero si es convertido a términos económicos, será mucho más rentable. Por otra parte, y de acuerdo con los resultados de la Matriz de Vester trabajados en la zona de estudio, debido a los altos niveles del uso de mercurio y la generación de vertimientos sin tratamiento, esto ha conllevado a una contaminación en las fuentes hídricas el cual es un recurso importante para las demás actividades de subsistencias que desarrollan en el municipio de Suárez. En relación con la problemática expuesta, el bórax se constituye no sólo como insumo rentable económicamente, sino que ofrece la posibilidad de reducir los impactos generados por la minería de oro al ser un insumo de baja toxicidad.

Finalmente, se puede deducir que el proceso con bórax fue efectivo en dos de las tres pruebas realizadas en esta investigación, por lo cual, se propone la técnica utilizada en el municipio de Suárez - Cauca bajo las condiciones y dosis mencionadas anteriormente para continuar con investigaciones en el proceso de extracción de oro, para esto fue creado el manual práctico del uso del borato de sodio como sustituto del mercurio en la extracción de oro en la minería artesanal y a pequeña escala bajo las condiciones presentadas en cada una de las pruebas.

Los resultados obtenidos en el proceso de recuperación de oro con mercurio en el entable fueron favorables debido al fuerte enlace entre el mercurio y el oro, el mercurio se adhiere al oro; este tiene una alta eficiencia la cual permite recuperar mayores cantidades del metal, ya que el oro comienza a desvanecerse gradualmente, plegándose alrededor de la bola plateada hasta que se disuelve; el mercurio se disuelve en los metales formando una aleación a la cual se le llama amalgama. La recuperación final del oro se realiza calentando la aleación de manera en que se evapora el mercurio y queda el oro [69] [70].

Dentro del desarrollo de recuperación de oro en el entable El Samán se obtuvieron datos favorables y no favorables; como estudio preliminar fue necesario tener en cuenta que la técnica de extracción de oro para la comunidad minera del entable, le es necesario tomar en cuenta para un próximo estudio o experimento, variables y/o parámetros que motiven a una mayor eficiencia de beneficio de oro; dentro de los cuales se encuentran los siguientes:

- Pruebas metalúrgicas: realizar pruebas metalúrgicas con muestras representativas en un laboratorio; no todos los depósitos de oro tienen las mismas características mineralógicas, este puede encontrarse en varias formas como, por ejemplo:
 1. Oro libre de los otros minerales de ganga (minerales que no son útiles).
 2. Oro asociado a la ganga a lo largo de los límites de grano.
 3. Oro completamente ocluido dentro de un grano de partícula de ganga.

4. Oro finamente diseminado dentro de una estructura de minerales de ganga. [71]

- Distribución del mineral: cuánto (en %) del oro va al concentrado o a los medios o a los relaves (colas). La distribución se calcula con el peso del metal o mineral de interés (oro) en un producto dividido por el peso del metal o mineral de interés (oro) en la cabeza (alimentación de un proceso). La selección de un equipo de concentración depende de diversas variables, tales como: la mineralogía del mineral, la forma de las partículas de oro, la densidad de la pulpa, la viscosidad de la pulpa, el costo, la disponibilidad de repuestos y lo más importante, el tamaño del grano de las partículas de oro. La aplicabilidad del equipo de concentración por gravedad está generalmente relacionada con el tamaño del grano de las partículas de oro del material [71].
- Dureza: la resistencia que opone un material a dejarse rayar por otro, para medir la dureza de un material se utiliza la escala de Mohs, escala de 1 a 10, correspondiendo la dureza 10 al material más duro [72].
- La conminución: necesaria para liberar el mineral de interés antes de su concentración; sin embargo, el oro no necesita ser completamente liberado de los otros minerales no usables conocidos como “ganga”, para ser concentrado por gravedad; mientras que la partícula de oro más la ganga sea más pesada que las otras partículas, la concentración por gravedad puede ser eficiente [71].
- Tiempo: los molinos de bolas deberían operar a una velocidad óptima de rotación que es típicamente del 70 % de la velocidad crítica del molino; es decir, la velocidad en la cual el contenido se muele por completo y no se adhiere o atora en la cubierta del molino. Algunos entables muelen por dos horas, mientras otros hasta ocho horas, dependiendo de la dureza del

mineral; el tiempo usual es de cuatro horas de molido. La mayoría de los molinos en Colombia funcionan con una velocidad por encima de 70 % de la velocidad crítica, por lo tanto, los tiempos de molienda son exagerados y la molienda es ineficiente [71].

- Volumen o nivel de carga: están relacionadas con la dureza del mineral y el tonelaje de alimentación. Así, un aumento de tonelaje de alimentación involucra un menor tiempo de residencia, pero se debe compensar con una carga mayor de bolas. Lo mismo sucede si el mineral es de mayor dureza [73].

- Tenacidad: se denomina el comportamiento de los minerales cuando se intenta romperlos, golpearlos, aplastarlos, curvarlos o desgarrarlos, las clases de tenacidad más importantes son las siguientes:
 1. Frágil: que se rompe o hace polvo con facilidad y no se puede cortar en láminas.
 2. Séctil: se puede cortar y forma virutas que se desmenuzan al golpearlos (yeso).
 3. Maleable: puede machacarse y da lugar a finas láminas (oro, plata, cobre).
 4. Dúctil: se puede estirar para formar alambres (cobre, plata).
 5. Flexible: finas capas de mineral que se pueden curvar sin llegar a romperse y no recuperan su forma aunque se quite la presión ejercida.
 6. Elástico: finas capas de mineral que se pueden curvar sin llegar a romperse pero recuperan su forma cuando se quita la presión [74].

- Conocer la granulometría del oro encapsulado en la mena y/o mineral ya que de esto depende el tiempo de molienda que se requiere para la recuperación de oro en el entable. Esta información se consultó en la en la Guía Metodológica del Servicio Geológico Colombiano y estudios de

INGEOMINAS, ya que no fue posible tomar la medida de la granulometría del oro debido a las limitaciones económicas del proyecto [63] [75].

El tamaño del oro en la zona de Suárez - Cauca es de 10 a 70 μm , rango que podría el mercurio atrapar en la amalgama y el bórax precipitarlo dependiendo del mineral en el que el oro se encuentre encapsulado [63]. En la literatura se encontraron los rangos de tamaño que se obtienen en el tiempo o grado de molienda en las MAPEs:

1. Molienda fina: de 1000 μm a 100 μm
2. Molienda ultrafina: 100 μm a 10 μm
3. Micronización: 10 μm a 1 μm [76]

El oro es un mineral que no se encuentra siempre como oro libre, este puede estar encapsulado y particularmente en el caso de Suárez-Cauca como lo reportó el Servicio Geológico Colombiano, este se encuentra asociado especialmente a cuarzo y sulfuros como la pirita requiriendo un grado de molienda adecuado a tal punto de liberar el oro. Según estudios realizados en países como Perú, el tamaño de partículas debe ser de 74 μm o menor; si bien las partículas de oro se encuentran en tamaños que oscilan entre los 10 y 70 μm siendo favorable para una adecuada recuperación en el municipio de Suárez. De acuerdo con lo expresado con los mineros desde su experiencia en el campo de la minería el material de la prueba 1 y 3 eran de fácil recuperación y por la cual no requerían de un gran número de moliendas, haciendo el proceso eficaz; quizás esta afirmación se debe a la clase o tipo de tenacidad, la cual es el comportamiento de los minerales que tienen al romperse. Siendo este una variable ya mencionada anteriormente para la eficiencia en los MAPEs [19].

Además, lo expuesto anteriormente está relacionado con la liberación o separación física de las partículas que puede contener una especie mineralógica, conocido como el “grado de liberación” del mineral que se correlaciona con la molienda necesaria para liberar el oro, de acuerdo al tamaño de las partículas, por lo que está

basado en un parámetro que indica la ley de oro y así separarlo del resto de minerales [77].

5 CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Se concluye que, para la recuperación de oro en minería artesanal, es importante conocer la composición y características que tiene el mineral ya que, a partir de ello, se asigna un adecuado tiempo de molienda. Por lo tanto, es necesario realizar pruebas de laboratorio para establecer el grado de liberación e identificar minerales que interfieran en el proceso con bórax.
- Se concluye que el bórax tiene un buen rendimiento de recuperación de oro bajo similares condiciones y dosis implementada en el presente proyecto, donde el tiempo de molienda oscila alrededor de cuatro horas y la dosis de bórax implementada es de 125 y 150 g. La recuperación de oro en estas dosis fue de gran beneficio en dos de las tres pruebas realizadas con bórax.
- El mercurio tanto en su forma elemental como orgánica tiene efectos neurológicos adversos y es especialmente tóxico para la comunidad minera; aun así, el uso de mercurio en el proceso de recuperación de oro en el entable El Samán arrojó en cada prueba datos favorables de recuperación, concluyendo que el mercurio es un compuesto químico capaz de atrapar el oro en las MAPEs.
- Al finalizar de las pruebas en el entable se evidenció residuos mercuriales en los relaves, equipos e instrumentos que se presentan a causa del uso desmedido de mercurio para la recuperación de oro. Por esta razón es importante la educación a los mineros, los miembros de su familia y las comunidades cercanas sobre los riesgos de las MAPEs.

- Se puede concluir, que uno de los problemas que se presentan en la zona minera de Suárez - Cauca, es el inadecuado proceso y control del grado de liberación, esto se debe al desconocimiento de la composición y características del material que entra a proceso, la cual conlleva al uso desmedido del mercurio y a la ineficiente obtención de oro; a ello se le suma, el desconocimiento de la técnica con bórax, por lo que la guía metodológica brinda a la comunidad minera una opción viable y fácil para la sustitución del mercurio bajo las condiciones presentes en este trabajo.
- Se concluye que el uso del bórax para el proceso de recuperación de oro es de bajo costo, logrando obtener una ventaja económica para el minero si este sustituye el mercurio en el proceso de recuperación de oro; además de esto, el minero se evita una sanción económica y el cierre del entable, ya que daría cumplimiento a la ley 1658 del 2013 que entró en vigencia en el año 2018, también logra reducir los impactos ambientales ya que el bórax no contamina como el mercurio y genera una mejora en el bienestar social de la comunidad.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el proceso de recuperación de oro con bórax puesto es eficiente, con este proceso se recupera tanto oro grueso como oro fino, se debe implementar en un rango de 100 a 150 g de dosis de bórax para que en una próxima investigación se logre establecer una dosis óptima. Además, se debe realizar en entables sin contaminación con mercurio tanto en herramientas como en los equipos de los entables a trabajar y tener presente las características del mineral para la definición de los tiempos de molienda.
- Se recomienda realizar los análisis mineralógicos en futuros experimentos para conocer el grado de liberación del oro, los cuales permitan obtener los tiempos de molienda óptimos para la recuperación eficiente del oro.
- Dirigir a la comunidad minera a que se concienticen de obtener una condición óptima de seguridad en el área minera y en la salud ocupacional para evitar riesgos laborales que limiten a un futuro poder tener una mejor calidad de vida; así mismo las autoridades ambientales, los entes territoriales y las organizaciones mineras junto con los mineros artesanales del municipio de Suárez se propongan realizar proyectos y programas que conduzcan a una innovación técnica de producción más limpia.
- Considerar y promover la guía práctica como protocolo en el proceso de beneficio de recuperación de oro con el proceso de bórax para la comunidad minera, para así lograr tener la permanencia de sus entables por dar cumplimiento a la ley 1658 del 2013. Se aconseja utilizar el bórax para recuperación de oro en lugares con menor incidencia de sulfuros como en el municipio de El Tambo - Cauca para la identificación de niveles de eficiencia de recuperación de oro.

6 REFERENCIAS

- [1] QuimiNet.com, «Características y aplicaciones del bórax,» 2011.
- [2] L. Esdaile y J. M. Chalker, «The Mercury Problem in Artisanal and Small-Scale Gold Mining,» *Chemistry*, vol. 24, 2018.
- [3] P. W. Appel y N.-O. Leoncio, «The Borax Method of Gold Extraction,» *Health & Pollution*, vol. 2, nº 3, pp. 8-9, 2012.
- [4] G. Poveda Ramos, «Banrepcultural,» 06 2002. [En línea]. Available: <https://www.banrepcultural.org/biblioteca-virtual/credencial-historia/numero-151/la-mineria-colonial-y-republicana>. [Último acceso: 25 05 2020].
- [5] B. Gworek, W. Dmuchowski, A. Baczewska, P. Bragoszewska, O. Bemowska-Kalabun y J. Iwrzosek-Jauvowska, «Air Contamination by Mercury, Emissions and Transformations—a Review,» *Water, air, and soil pollution*, vol. 228, nº 4, 2017.
- [6] I. C. Casas , E. Gomez , L. M. Rodriguez, S. L. Girón y J. C. Mateus, «Hacia un plan nacional para el control de los efectos,» *Biomédica*, vol. 35, 2015.
- [7] S. Español Cano, «Contaminación con mercurio por la actividad minera,» vol. 32, nº 3, 2012.
- [8] P. E. López Africano, «Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca,» Popayán, 2006.
- [9] K. Elgstrand, D. Sherson, E. Jørs, C. Nogueira, J. Thomsen, M. Fingerhut, L. Burström, H. Rintamäk, E. Apud, E. Oñate, N. Coulson, L. McMaster y E. Clarke, «Safety and health in mining: Part 2,» *Occupational Health Southern Afric*, vol. 23, nº 4, p. 29, 2017.
- [10] L. Pressly, «Cómo el mercurio mata lentamente a los mineros,» 2013.

- [11] S. R. Galvis, «Gaia Amazonas,» 08 2018 . [En línea]. Available: https://www.gaiaamazonas.org/uploads/uploads/books/pdf/Informe_Hg_FGA_RAISG_-_con_mapas.pdf. [Último acceso: 22 05 2020].
- [12] F. A. Díaz-Arriaga, «Mercurio en la minería del oro: impacto,» *salud pública*, vol. 16, nº 6, 2014.
- [13] A. Corrales Castrillo , Analisis y evaluación de la problemática socioambiental ocasionada por el uso del mercurio en la minería aurifera artesanal en Colombia, Bogotá, 2013.
- [14] P. E. Lopez Africano , «Corporación Autonoma Regional del Cauca (CRC),» [En línea]. Available: <http://crc.gov.co/wp-content/uploads/2019/04/MINERALIZACION-Suarez.pdf>. [Último acceso: 22 05 2020].
- [15] Alianza por la Minería Responsable , «Estudio de caso Suárez y el Tambo Cauca,» Suárez, Tambo (Cauca), 2018.
- [16] Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), «Diagnostico ambiental en el municipio de suárez, área de influencia corregimientos de Mindala y la Toma,» Popayán.
- [17] Programa de las naciones unidas para el medio ambiente – PNUMA, «El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala,» Nairobi, Kenya, 2008.
- [18] E. C. Rojas y O. S. Muñoz Daza , Identificación de los niveles de eficiencia del boráx como sustituto del mercurio en dos plantas artesanales de extracción de oro, municipio Suarez departamento, Cauca., Popayan, 2017.
- [19] O. Eppers , «El uso de bórax para una producción de oro sin mercurio en la minería a pequeña escala,» 2017.
- [20] CORQUIVEN, C.A., *Hoja de seguridad del borato de sodio*, Carabobo-Venezuela, 2007.
- [21] Fundación Plagbol, «Manual extracción sin uso del mercurio el bórax en la extracción de oro,» La Paz- Bolivia , 2014.

- [22] M. O. Bustamante Rúa, A. C. Gaviria Cartagena y O. J. Restrepo Baena , «Concentración de mineral,» Medellín, 2008.
- [23] A. Boischio, «Asamblea Mundial de la Salud - Resolución sobre el Convenio de Minamata,» OMS, E.E. U.U., 2014.
- [24] ONU, «Convenio de Minamata sobre el Mercurio,» Japón, 2013.
- [25] El Congreso de Colombia , «Ley 1658 de 2013,» Bogotá, 2013.
- [26] MINAMBIENTE , «Entra en vigencia prohibición del mercurio en la minería de oro en Colombia,» Bogotá, D.C., 2018.
- [27] W. F. Juanillo Bravo y C. A. Garces , Boráx en el proceso de recuperación de oro como un sustituto del mercurio en dos entables de la cooperativa minera de Suarez Cauca, Popayan, 2017.
- [28] A. León Amaya y L. A. López Erazo , «La extracción de oro: ¿ maldición en Colombia oportunidad en India?,» *Zero Impresa*, 2014.
- [29] Minambiente , «Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña,» Bogotá, 2012.
- [30] J. Marrugo-Negrete, J. Olivero Verbel , E. Lans Ceballos y L. N. Benitez , «Total mercury and methylmercury concentrations in fish from the Mojana region of Colombia,» *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 30, nº 1, 2008.
- [31] M. L. Vargas B y C. Quiroz P., «Alteraciones neuropsicológicas en escolares de un municipio con niveles elevados de vapor de mercurio medioambiental,» *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, vol. 24, nº 4, 2008-2011.
- [32] Y. Traslaviña, G. Páez, P. Rosas y L. Cataño, «Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar-Colombia), para la selección de los procesos de extracción,» *DYNA*, vol. 72, nº 145, 2005.
- [33] «Nuevos métodos y técnicas para extraer el oro sin contaminar a las regiones,» 25 07 2018. [En línea]. Available: <https://www.semana.com/contenidos-editoriales/colombia-sin->

mercurio/articulo/nuevos-metodos-y-tecnicas-para-extraer-el-oro-sin-contaminar-a-las-regiones/576604. [Último acceso: 01 03 2019].

- [34] A. dos Santos Vianna, E. Pedra de Matos, I. Maura de Jesus, C. I. Rodrigues Fróes Asmus y V. d. M. Câmara, «Exposição humana ao mercúrio e seus efeitos hematológicos: uma revisão sistemática,» *Cad. Saúde Pública*, vol. 35, nº 2, 2019.
- [35] Lenntech, «lenntech,» [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/au.htm>. [Último acceso: 05 11 2019].
- [36] A. V. Ramírez, «Mejora de los indicadores biológicos de exposición al mercurio en trabajadores de una refinera de oro,» *Anales de la Facultad de Medicina*, vol. 72, nº 3, 2011.
- [37] M. e. a. Palma-Parra, «Niños y adolescentes expuestos ambientalmente a mercurio, en diferentes municipios de Colombia,» *Universidad Industrial de Santander. Salud*, vol. 51, nº 1, 2019.
- [38] M. G.-E. e. al., «Exposición al metilmercurio en la población general; toxicocinética; diferencias según el sexo, factores nutricionales y genéticos,» *Nutrición hospitalaria*, vol. 30, nº 5, 2014.
- [39] European commission, «Metilmercurio,» greenfacts , 2008. [En línea]. Available: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/es/amalgamas-dentales/glosario/mno/metilmercurio.htm. [Último acceso: 4 11 2019].
- [40] J. Marrugo y S. Vargas, «Mercurio, metilmercurio y otros metales pesados en peces de colombia: riesgo por ingesta,» *Acta Biológica Colombiana*, vol. 24, nº 2, pp. 232-242, 2019.
- [41] Ministerio de medio ambiente, dirección general de ambiente sectorial, «Hacia una producción más limpia en la minería de oro,» Sur y Occidente colombiano.
- [42] M. Benavides, «Tecnologías asociadas al procesamiento del oro,» Miranda, 2017.

- [43] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, «ONUDI - Manual de Producción más Limpia,» 2008.
- [44] S. L. Caicedo, «Planteamiento de una tecnología de producción más limpia para el proceso de beneficio de oro sin mercurio,» Bogotá, 2014.
- [45] Ministerio de Energía y Minería (Argentina) , «Panorama de Mercado de Rocas y Minerales industriales,» 04 2018. [En línea]. Available: <http://cima.minem.gob.ar/assets/datasets/Panorama%20de%20mercado%20BORATOS%202018.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [46] Diario el tribuno , «Bórax Argentina S.A.,» 12 12 2016. [En línea]. Available: <http://boraxargentina.com/la-historia-de-la-mina-tincalayu/>. [Último acceso: 04 11 2019].
- [47] Los Profesorados de Exactas, «La explotación de las sales de boro en Argentina,» [En línea]. Available: http://www.ccpems.exactas.uba.ar/CDs/CDTierra/contents/apartes/boro_arg.htm. [Último acceso: 04 11 2019].
- [48] I. D. Castillo Sánchez, «Técnicas alternativas para la extracción de oro sin el uso de mercurio y su potencial aplicación a pequeña escala y minería artesanal en Colombia,» *UNAD*, 2018.
- [49] INECC, «Bórax,» [En línea]. [Último acceso: 04 11 2019].
- [50] D. Lennett y R. Gutierrez, «Convenio de Minamata sobre el mercurio,» 2014.
- [51] Protección laboral, «Minería artesanal y de pequeña escala (MAPE), inframundo laboral,» 2017.
- [52] International Institute for Environment and Development, «Minería artesanal y a pequeña escala,» Londres, 2015.
- [53] «La ONU y el estado de derecho,» 04 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/ruleoflaw/es/un-and-the-rule-of-law/united-nations-environment-programme/>. [Último acceso: 05 11 2019].
- [54] «Constitución política de Colombia,» Bogotá, 1991.

- [55] El Congreso de Colombia, «Ley 685 de 2001,» Bogotá, 2001.
- [56] Congreso de la república , «Ley 1753 de 2015,» Bogotá, 2015.
- [57] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible , «Resolución 2254 de 2017,» Bogotá, 2017.
- [58] Ministerio de Minas y Energía , «Decreto 1073 de 2015,» Bogotá , 2015.
- [59] Ministerio de Minas y Energía , «Decreto 1421 de 2016,» Bogotá, 2016.
- [60] El Director General de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR, «Decreto 2166 de 2016,» Bogotá, 2016.
- [61] Alcaldía de Suárez Cauca , «Alcaldía de Suárez en Cauca,» 22 10 2018. [En línea]. Available: <http://www.suarez-cauca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>. [Último acceso: 13 10 2019].
- [62] grupocts, «Rio Cauca,» 11 11 2010. [En línea]. Available: <http://riocauca.blogspot.com/2010/11/la-represa-la-salvajina.html>. [Último acceso: 13 10 2019].
- [63] Servicio Geológico Colombiano, «Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio. Suárez, Buenos Aires y el Tambo (Cauca),» Bogotá, 2017.
- [64] J. Lillo, «Impactos de la minería en el medio natural,» 07 05 2013. [En línea]. Available: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Impactos%20de%20la%20miner%C3%ADa%20-%20Javier%20Lillo.pdf>. [Último acceso: 26 10 2019].
- [65] J. Cuthbert Chiimbila, «Aplicación de la Matriz Vester,» [En línea]. Available: https://e-aulas.urosario.edu.co/pluginfile.php/676365/mod_folder/content/0/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20Matriz%20Vester.doc?forcedownload=1. [Último acceso: 05 11 2019].
- [66] A. Leon Amaya y L. A. Lopez Erazo, «La extracción de oro: ¿maldición en Colombia oportunidad en India?,» *Zero*, 9 octubre 2014.

- [67] P. Peter W.U. Appel y L. Na-Oy, « The Borax Method of Gold Extraction for Small-Scale Miners,» vol. 2, junio 2012.
- [68] «Enlaces quimicos,» Química I, 10 10 2012. [En línea]. Available: <http://kimikaa04.blogspot.com/2012/10/resumen-6-completo-unidad-3-enlaces.html>. [Último acceso: 27 02 2020].
- [69] A. Sella, Interviewee, *El mercurio, un metal bello pero fatal*. [Entrevista]. 23 diciembre 2013.
- [70] «La minería aurífera artesanal o de pequeña escala y la salud,» 2017.
- [71] M. Mariz Veiga y M. Correa Velez, *Tecnologías alternativas para el beneficio del oro*, ISBN 978-958-56865-3-3 ed.
- [72] [En línea]. Available: https://www2.uned.es/cristamine/mineral/prop_fis/dureza.htm. [Último acceso: 15 junio 2020].
- [73] H. A. Sudzuki, «PROCESAMIENTO SOSTENIBLE DEL ORO EN SAN CRISTÓBAL, SUR DEL PERÚ,» SAN CRISTOBAL, 2011.
- [74] S. G. Mexicano, «Propiedades Físicas,» 22 marzo 2017. [En línea]. Available: [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Propiedades-Fisicas.html#:~:text=Maleable%3A%20puede%20machacarse%20y%20da,presi%C3%B3n%20ejercida%20\(talco%20foliado\)..](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Minerales/Propiedades-Fisicas.html#:~:text=Maleable%3A%20puede%20machacarse%20y%20da,presi%C3%B3n%20ejercida%20(talco%20foliado)..) [Último acceso: 7 junio 2020].
- [75] INGEOMINAS, «Catálogo de las propiedades mineralógicas, físicas y químicas de los yacimientos auríferos primarios de los departamentos de Cauca, Nariño y Valle del Cauca,» Santiago de Cali, 2003.
- [76] E. A. Blanco, «Universidad de Cantabria,» 2014. [En línea]. Available: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/5._fragmentacion.pdf. [Último acceso: 18 02 2020].
- [77] E. A. Blanco, «BLOQUE IN CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN A LA MINERALURGIA,» 2017.

7 ANEXOS

Anexo 1. Proceso de trituración del mineral



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2. Pesaje de la cantidad de mineral que entra al proceso de molienda.



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3. Entable de recuperación de oro



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4. Proceso de molienda



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 5. Proceso de amalgamación en batea



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 6. Bórax (borato de sodio)



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 7. Separador gravimétrico (elutriador)



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 8. Proceso de deslode



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9. Recuperación de oro



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 10. Mineral (oro encapsulado a la mena)



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 11. Proceso de amalgamación



Fuente: Elaboración propia.

Anexo 12. Distrito Minero de Suárez



Fuente: Elaboración propia.